

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Т. С. Айрапетян, С. В. Лукашенко**

**ТЕХНОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ У**  
**ПРОМИСЛОВОСТІ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології, освітня програма «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології»)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2025**

**Айрапетян Т. С.** Технологія ефективного водокористування у промисловості : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології, освітня програма «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» / Т. С. Айрапетян, С. В. Лукашенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 157 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. Т. С. Айрапетян,  
канд. техн. наук, доц. С. В. Лукашенко

Рецензенти:

**О. Г. Гайдучок**, кандидат технічних наук, доцент (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова);

**А. А. Сироватський**, кандидат технічних наук, доцент (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очищення вод, протокол № 1 від 19.08.2024.*

Конспект лекцій складено з метою допомогти здобувачам будівельних, екологічних спеціальностей ЗВО під час підготовки до занять та іспитів із курсу «Технологія ефективного водокористування у промисловості».

© Т. С. Айрапетян, С. В. Лукашенко, 2025

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
ЗМ 1 ВОДОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	7
1 РОЛЬ ВОДИ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ Й ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ .....	7
1.1 Особливості систем водопостачання промислових підприємств ..	7
1.2 Типи водоспоживання у виробництві .....	9
1.3 Джерела водопостачання .....	11
1.4 Основні схеми виробничого водопостачання та водовідведення ..	13
1.5 Витрати води на промислових підприємствах .....	19
1.6 Втрати води в оборотних циклах водопостачання .....	21
1.7 Вимоги споживачів до якості води .....	22
2 МЕТОДИ ВОДОПІДГОТОВКИ. ОСНОВНІ ТИПИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ВОДИ. ....	28
2.1 Коагуляція і прояснення води. Фізико-хімічні основи процесу коагуляції .....	28
2.2 Основне обладнання та схеми попередньої обробки води .....	33
2.3 Фільтрування води. Освітлювальні фільтри .....	35
2.4 Хімічна обробка води. Реагентне пом'якшення води .....	39
2.5 Знекремнювання води магnezіальними реагентами .....	43
2.6 Обробка води методом іонного обміну .....	44
ЗМ 2 ОХОЛОДЖЕННЯ ВОДИ .....	52
3 ПРОЦЕС ОХОЛОДЖЕННЯ ВОДИ .....	52
3.1 Системи охолодження промислових агрегатів. ....	52
3.2 Споруди для охолодження води .....	57
3.2.1 Водосховища-охолоджувачі. ....	59
3.2.2 Бризкальні басейни .....	63
3.2.3 Класифікація градирень та їх конструкції .....	65
3.2.4 Радіаторні (сухі) градирні .....	71
3.2.5 Ежекційні охолоджувачі .....	74
ЗМ 3 МЕТОДИ ПІДГОТОВКИ ВОДИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ .....	75
4 ЗАПОБІГАННЯ УТВОРЕННЮ КАРБОНАТНИХ ВІДКЛАДЕНЬ ...	75
4.1 Водопідготовка для джерел і систем теплопостачання .....	75
4.1.1 Основні методи очищення води .....	75

4.1.2 Видалення з води розчинних газів . . . . .	79
4.1.3 Опріснення води методом дистиляції. Загальні поняття й визначення . . . . .	82
4.1.4 Накипоутворення. Види накипу, його властивості . . . . .	85
4.2 Характер та причини утворення карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання . . . . .	87
4.3 Теоретична оцінка стабільності води та практичні рекомендації щодо необхідності її обробки . . . . .	92
4.4 Методи запобігання утворенню карбонатних відкладень . . . . .	98
4.5 Дослідження термостабільності води та ефективності методів запобігання утворенню карбонатних відкладень . . . . .	104
4.6 Розведення та освіження оборотної води . . . . .	108
4.7 Підкислення води як метод запобігання карбонатних відкладень . . . . .	109
4.8 Фосфатування води . . . . .	115
4.9 Спільна обробка води підкисленням та фосфатуванням . . . . .	118
4.10 Рекарбонізація оборотної води . . . . .	119
4.11 Пом'якшення води, що додається до системи . . . . .	125
4.12 Інші методи обробки води . . . . .	127
<b>Розділ 5 ЗАХИСТ МЕТАЛУ ВІД КОРОЗІЇ . . . . .</b>	<b>129</b>
5.1 Характер та причини корозії теплообмінних апаратів, трубопроводів та споруд . . . . .	129
5.2 Теоретична та практична оцінка агресивності води . . . . .	138
5.3 Методи захисту металу від корозії . . . . .	141
5.4 Дослідження швидкості корозії та ефективності захисту металу . . . . .	142
5.5 Утворення захисної карбонатної плівки на металі . . . . .	145
5.6 Обробка води сповільнювачами корозії . . . . .	147
5.7 Захисні покриття металу смолами, лаками, фарбами та емалями . . . . .	151
5.8 Електрохімічний захист . . . . .	152
5.9 Лабораторний контроль та оцінка ефективності обробки води та захисних покриттів . . . . .	155
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ . . . . .</b>	<b>156</b>

## ВСТУП

Системи промислового водовідведення забезпечують нормальне та високоефективне функціонування промпідприємства; здійснюють очистку стічних вод до необхідного ступеня з метою їх наступного використання, що сприяє охороні водойм від забруднень і раціональному використанню води.

Водне господарство кожного промислового підприємства має специфічні особливості використання води, свої джерела її забруднення і, отже, вимагає розробки і впровадження конкретних технологічних рішень проблеми очищення води з метою її повторного використання.

Вимоги до якості води, що використовують у промисловості, визначаються технологією виробничих процесів і надзвичайно різноманітні, що зумовлює різноманіття можливих варіантів рішення систем водного господарства промислових підприємств. За вмістом різних хімічних елементів і сполук, розчинних і нерозчинних домішок, газів і солей, придатна для промислового водопостачання вода може значно відрізнятися від питної води. Технологія її підготовки здебільшого також істотно відрізняється від вживаної в комунальному водопостачанні. Це стосується насамперед глибокого пом'якшення і знесолювання води, видалення біогенних елементів, стабілізації і дегазації води, знезалізнення, знекремнювання тощо.

Водне господарство промислових підприємств України є на сьогодні найбільш перспективним для наукових досліджень, що стосуються як захисту навколишнього середовища, так і збереження матеріальних ресурсів промислових підприємств. Комплексне вирішення цих двох завдань відповідає технологіям водопостачання без скиду стічних вод і переведенню технологічних циклів виробництва в режим замкненого водопостачання.

Основою проектування, будівництва та експлуатації сучасного промислового водопостачання є науково обґрунтоване раціональне і комплексне використання водних ресурсів, розробка сучасних систем і технологічних схем промислового водопостачання, які забезпечують охорону водних джерел від виснаження і забруднення, що гарантує мінімальний екологічний збиток навколишньому природному середовищу. Ці основи закріплені у конституції країни, рішеннях уряду, основах водного законодавства, а також нормах будівельного проектування. У зв'язку з цим швидкими темпами росте застосування оборотних, послідовних і замкнених систем водопостачання промислових підприємств із багаторазовим використанням після відповідної обробки технологічних і побутових стічних вод, причому останні розглядають як основний резерв для водопостачання промислових підприємств.

Проектування, будівництво й експлуатація систем промислового водопостачання повинні здійснюватися відповідно до основних нормативних актів у галузі охорони навколишнього середовища і здоров'я населення, до яких насамперед належать такі: Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Водний кодекс України» та інші нормативні акти, що встановлюють правові основи комплексного і раціонального використання й охорони водних об'єктів і покликані сприяти забезпеченню екологічної безпеки господарської та іншої діяльності, яка негативно впливає на стан навколишнього природного середовища.

З огляду на це отримуємо основні завдання у сфері промислового водопостачання, пов'язані з раціональним використанням водних ресурсів, підвищенням ефективності функціонування систем водного господарства промислових підприємств та їх екологічної безпеки:

- впровадження безводних і маловодних технологічних схем;
- здійснення заміни водяного охолодження повітряним або випарним;
- широке застосування оборотних і замкнених систем водопостачання з відповідним очищенням або охолодженням води;
- повторне використання очищених промислових і міських стічних вод;
- нормування відпуску води промисловості і регулювання промислового водоспоживання;
- підвищення якості проектування, будівництва й ефективності експлуатації систем водопостачання, впровадження прогресивних технологічних схем і устаткування, автоматизації і диспетчеризації, скорочення вартості будівництва водного господарства промислових підприємств;
- підвищення надійності і довговічності систем за рахунок використання сучасних конструкцій і більш стійких матеріалів, труб із захисним покриттям, зокрема неметалевих труб, інших способів захисту трубопроводів і споруд від корозії;
- реконструкція існуючих систем водопостачання з метою підвищення ефективності й екологічної безпеки їх роботи, економії енергетичних і природних ресурсів.

## ЗМ 1 ВОДОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

### 1 РОЛЬ ВОДИ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ Й ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

#### 1.1 Особливості систем водопостачання промислових підприємств

Промислові підприємства витрачають велику кількість води, а деякі підприємства вимагають безперервної подачі води. Зі збільшенням потужності підприємств, використанням складних технологічних процесів потреби у воді збільшуються. Витрати води, що споживає промисловість, у десятки разів перевищують кількість води, що споживає населення. Наприклад, кількість води, яку використовують тільки на охолодження металургійні підприємства, складає більше 5 млрд м<sup>3</sup> на рік, що у два рази перевищує водоспоживання населення.

Найбільш великими споживачами води є металургійні, нафтопереробні, хімічні заводи, теплосилові станції, що використовують воду для охолодження; підприємства целюлозно-паперової та гірничодобувної промисловості, де значну кількість води використовують для промивки сировини та продукції.

*Система водопостачання* промислових підприємств становить комплекс споруд, устаткування і трубопроводів, що забезпечують забір із природного джерела, очищення, обробку, транспортування і подачу води необхідної кількості і якості.

У системах технічного водопостачання передбачають також споруди й устаткування, необхідні для прийому відпрацьованої води і підготовки її для повторного використання, а також станції очищення стічних вод.

На підприємствах залежно від впроваджених технологій, виготовленої продукції, потужності, займаних площ може існувати декілька систем водопостачання. Загалом можна виділити такі системи водопостачання: **виробничі; господарсько-питні; протипожежні.**

*Господарсько-питна система* подає воду для питних та інших потреб робітників і службовців протягом зміни, а також для прийняття душу протягом 45-ти хв після закінчення зміни. Залежно від виду виробництва (холодні або гарячі цехи) у розрахунках встановлюють графік витрачання води протягом зміни. Для розрахунків вважають, що воду споживають усі працівники, а душем користуються не всі працівники, а якась їх частина. Кількість працівників, які приймають душ, встановлюють залежно від типу виробництва. Якість води повинна відповідати вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною [1].

*Протипожежна система* має подавати воду тільки під час пожежі із зовнішньої та внутрішньої мереж. Витрати води на пожежогасіння можуть бути великими, але це трапляється дуже рідко. Використовувати можна воду як питної, так і іншої якості.

Вимоги до якості води господарсько-питного призначення і води, що йде на технічні потреби (технічної води), – різні. Тому на більшості промислових підприємств споруджують окремі системи господарсько-питного і технічного водопостачання. Протипожежні потреби можна забезпечити водою з виробничого або господарсько-питного водопроводу. Якщо промислове підприємство розташоване на території міста, то виникає питання про можливість об'єднання його водопостачання з міським. Рішення залежить від необхідних витрат води, її якості, напору і низки місцевих умов.

Для підприємств, що є великими споживачами неочищеної води, зазвичай будують самостійний (окремих від міського) виробничий водопровід.

Іншим характерним типом об'єктів водопостачання є великі підприємства, що розташовані за межами міста. Під час проектування водопроводів подібного промислового підприємства та селища необхідно враховувати витрати на виробничі потреби підприємства, господарсько-питні потреби населення і працівників під час перебування їх на виробництві, на поливання заводської території й зелених насаджень, на гасіння пожежі на підприємстві і в селищі. На промислових підприємствах залежно від якості води, яку воно використовує, можна влаштовувати як об'єднані, так і окремі системи господарсько-питного, виробничого та протипожежного водопроводів. Протипожежний водопровід здебільшого об'єднують із господарсько-питним. На підприємствах з підвищеною небезпечністю влаштовують окремі протипожежні водопроводи. У разі потреби в якісній воді (кращій, ніж питна) для якогось цеху можна робити локальні установки поліпшення якості води.

Іноді система виробничого водопостачання значно ускладнюється тим, що окремі виробничі споживачі, що входять до складу підприємства, висувають різні вимоги до якості води або до напору, під яким вона надходить. Тому доводиться споруджувати декілька систем виробничих водопроводів.

Кількість і якість води для виробничих потреб залежать від характеру виробництва, схеми технологічних процесів, використовуваного обладнання, можливих джерел водопостачання. Звичайно, ці параметри задають технологи, і вони можуть коливатися у дуже широких межах. Різноманітні вимоги до якості води потребують навіть різних виробничих систем.

Вимоги до якості води дуже часто визначають можливі схеми водопостачання. У деяких випадках якість води може визначати питоме водоспоживання. Так, під час охолодження мартенівських печей на Донбасі жорсткою водою на одну піч використовують 250–500 м<sup>3</sup>/год, а на Уралі за більш якісної води – всього 150–300 м<sup>3</sup>/год.

Споживачі технічної води у промисловості та її призначення у виробничих процесах дуже різноманітні. Навіть на одному і тому ж підприємстві воду можуть використовувати для різних цілей.

*Виробнича система* забезпечує водою тільки виробничі процеси. Водночас залежно від типу виробництва на підприємстві можуть бути споживачі з різними вимогами до якості води. Як приклад можна навести водопостачання сучасного заводу синтетичного каучуку, де існує 10 мереж води різної якості.

## 1.2 Типи водоспоживання у виробництві

Воду у промисловості використовують для різноманітних цілей. З усього різноманіття функціонального використання водних ресурсів у промисловості найчастіше воду використовують як охолоджувач (50–70 %), розчинник (15–20 %), транспортуючий агент (15–25 %).

Загалом водоспоживання у виробництві можна класифікувати так: ***охолодження, промивання, пароутворення, гідротранспорт, складова продукції.***

*Охолодження.* Воду на охолодження використовують для конденсації пари, охолодження печей, машин, агрегатів. Зазвичай питома вага цих витрат значно перевищує інші витрати води і безперервно зростає. Наприклад, у чорній і кольоровій металургії, у нафтопереробній промисловості на водяне охолодження використовують 95 % води і тільки 5 % на підсобні потреби, у хімічній і коксохімічній відповідно 90 % і 10 %. Наприклад, на теплових електростанціях 85 % загальної витрати води використовують на охолодження, 12 % – на транспортування золи (на станціях, де вугілля використовують як паливо), 3 % – на приготування пари.

*Промивання водою сировини або продукції.* Велику кількість води витрачають на підсобні потреби (промивання виробів). Наприклад, воду використовують для промивки, замочування та зволоження у целюлозно-паперовій, текстильній, шкіряній промисловості, на фабриках із виробництва штучного волокна. Промивання водою сировини або продукції здійснюють, наприклад, на таких підприємствах, як шкіряні, консервні, овочесушильні,

цукрові тощо.

*Пару*, яку одержують на різноманітному за потужністю та конструкцією паросиловому обладнанні, використовують практично на всіх підприємствах для обігріву приміщень, підігріву різних матеріалів, прогріву продукції – наприклад, залізобетонних плит на заводі будівельної індустрії тощо.

*Гідротранспорт* передбачає транспортування потоком води лотками або жолобами шлаку, золи, сировини тощо. Наприклад, на теплосилових станціях воду використовують для транспортування шлаку і золи, у доменному виробництві – для транспортування шлаку, на збагачувальних фабриках – для транспортування різних відходів, на цукрових заводах – для транспортування цукрових буряків тощо.

*Вода у складі продукції*. Прикладом можуть бути харчова промисловість, будівельна індустрія. Це стосується виготовлення консервів і продукції на овочесушильних виробництвах, молочних заводах, виготовлення цегли на цегельних заводах тощо.

Таким чином, загалом водоспоживання конкретного підприємства – це комплекс, що складається з окремих систем, які забезпечують ті чи інші категорії споживачів.

Залежно від ролі, що виконує вода у системах виробничого водопостачання, її можна поділити на чотири категорії:

1. *Воду I категорії* використовують для охолодження обладнання і продукту в теплообмінних апаратах (без контакту з продуктом). Вода тільки нагрівається і вона практично не забруднюється, тобто виконує роль теплоносія.

2. *Воду II категорії* використовують як середовище, що поглинає та транспортує домішки, без нагрівання (збагачення корисних копалин, гідротранспортування). Вода забруднюється механічними та розчинними домішками, але не нагрівається.

3. *Воду III категорії* використовують також як середовище, що поглинає та транспортує механічні та розчинні домішки із нагріванням (вода також виконує роль теплоносія). У цьому випадку вода використовується комплексно: наприклад, для уловлювання та очистки газів, гасіння коксу тощо.

4. *Воду IV категорії* використовують як розчинник реагентів (наприклад, для флотаційного збагачення руди, вугілля).

### 1.3 Джерела водопостачання

Потреба підприємства у воді всіх категорій задовольняється з природних джерел, що повинні відповідати таким основним вимогам:

- а) забезпечувати безперервне отримання необхідної підприємству кількості води з урахуванням перспективи його розвитку;
- б) подавати воду такої якості, яка найбільшою мірою відповідає вимогам споживачів або дозволяє досягти її за рахунок простої обробки вихідної води;
- в) забезпечувати можливість подачі води споживачам із найменшими витратами;
- г) мати таку потужність, щоб розрахунковий відбір води з нього не порушував екологічну систему, що склалася.

Під час вибору джерела водопостачання потрібно враховувати якість води і його потужність. Вибір джерела води визначається переважно місцевими природними умовами, тому заздалегідь проводять топографічні, гідрологічні, санітарні та інші дослідження.

Правильне вирішення питання про вибір джерела водопостачання для конкретного споживача вимагає ретельного вивчення й аналізу водних ресурсів району, в якому розташований споживач.

Для водопостачання промислових підприємств використовують поверхневі й підземні води. До поверхневих джерел належать річки, озера, водосховища. Підземні води залежно від глибини залягання й умов їхнього живлення поділяють на артезіанські напірні, міжпластові безнапірні, верховодні, джерельні (ключі).

Властивості води визначаються концентрацією окремих домішок, сукупність яких визначає якість води. Для практичних цілей промислового водопостачання достатнім є лабораторний контроль за фізичними, хімічними та бактеріологічними показниками води.

Води поверхневих і підземних джерел містять гази, різноманітні мікроорганізми, різні домішки як органічного, так і неорганічного походження.

За фізико-хімічним складом і розмірами (дисперсністю) забруднюючих домішок виділяють чотири групи:

- грубо дисперсні (розмір більше  $10^{-4}$  мм);
- колоїдно розчинені (розмір від  $10^{-4}$  мм до  $10^{-6}$  мм);
- молекулярні розчини (розмір менше  $10^{-6}$  мм, вони розподілені у воді у вигляді іонів, молекул);
- іонні розчини (розмір від  $10^{-6}$  мм до  $10^{-8}$  мм), здебільшого мінеральні солі, що збагачують воду іонами.

До першої групи входять домішки, що знаходяться у завислому стані, це досить великі частинки (частинки погано розчинних глин, пісок, карбонатні породи, нерозчинні гідроокси металів), які нестійкі й легко розшаровуються і входять до складу суспензії.

До другої групи входять колоїдні та високомолекулярні сполуки (мінеральні частинки гумусових речовин, що надають воді забарвлення). Це домішки органічного походження – продукти розкладання органічних речовин, гумінові речовини; або мінерального походження – кремнекислота, сполуки заліза тощо.

До третьої групи (молекулярно-дисперсних домішок) входять розчинені у воді гази ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ), а також катіони та аніони солей, кислот, лугів ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $OH^-$  тощо).

Четверта група об'єднує речовини, що дисоціюють у воді на іони. До них належать солі (зокрема солі твердості), основи і кислоти.

Усі води характеризують такими показниками якості:

- фізичні (температура, вміст завислих речовин, розчинених газів, кольоровість, запах тощо);
- хімічні (твердість, лужність, активна реакція, окисність, наявність хлоридів, сульфатів, сухий залишок тощо);
- біологічні та бактеріологічні (загальна кількість бактерій, колі-індекс).

Вода в більшості річок має значну каламутність, високий вміст органічних речовин і бактерій, а часто і значну забарвленість. Водночас річкова вода характеризується відносно невеликою жорсткістю. Вода озер зазвичай відрізняється невеликим вмістом завислих речовин (тобто малою каламутністю). Якість усіх поверхневих вод сильно залежить від атмосферних опадів і танення снігу, у період паводків їх каламутність і бактеріальна забрудненість зростає, а твердість зменшується.

Підземні води зазвичай не містять завислих речовин, мають низьку бактеріальну забрудненість, але разом з цими позитивними якостями вони у багатьох випадках сильно мінералізовані. Залежно від характеру розчинених у них солей, вони можуть мати ті або інші негативні властивості: підвищену жорсткість, наявність неприємного присмаку і деякими іншими.

Питання про вибір джерела водопостачання є одним з головних під час проектування схеми та системи виробничого водопостачання, оскільки воно визначає наявність тих або інших споруд, а отже, вартість будівництва й експлуатації.

## 1.4 Основні схеми виробничого водопостачання та водовідведення

Система водного господарства – це складне поняття, що містить принцип будівництва всього господарства від подачі води до водовідведення.

Системи виробничого водопостачання призначені для забезпечення подачі води на виробництво у необхідних кількостях і відповідної якості. Вони складаються з комплексу взаємопов'язаних споруд водозабірних пристроїв, насосних станцій, водоводів, устаткування для очищення і поліпшення якості води, регулюючих і запасних ємностей, охолоджувачів води і розвідної мережі. Залежно від призначення і місцевих умов деякі з перерахованих споруд у системі можуть бути відсутніми.

Особливості водоспоживання (якість води, що подається, витрати, напір тощо) на різних промислових підприємствах і різноманітність місцевих природних умов (наявність джерел водопостачання, їх потужність, якість води, економічні та екологічні чинники) зумовлюють і різноманітність схем водопостачання, які можуть бути застосовані на підприємствах: від простих прямоочних до найскладніших.

Для більшості промислових підприємств вимоги до якості води значно менш жорсткі, ніж до складу вод, що підлягають скиданню у водні об'єкти або міську систему водовідведення. Тому виробничі стічні води значно вигідніше спрямовувати на повторне використання у системах оборотного та послідовного водопостачання, ніж очищувати їх, що відповідає вимогам скидання.

Існують три основні схеми виробничого водопостачання:

- прямоочні;
- з повторним використанням води;
- оборотні схеми з охолодженням води й оборотні схеми з очищенням води.

Вибір схеми виробничого водопостачання здійснюють, враховуючи такі фактори:

- наявність тих чи інших джерел водопостачання, їх потужність і якість води в них;
- режим споживання води, її кількість і вимоги до якості;
- типи споживачів і їх розміщення;
- відстань від джерела до промислового підприємства;
- характер забруднення води після її використання на підприємстві;
- місцеві природні умови.

Найчастіше у системах промислового водопостачання використовують оборотне і послідовне використання води, зрідка – прямоточне.

Водночас навіть на одному підприємстві іноді використовують одну або дві чи всі три перелічені системи – для різних цехів. Так, деякі цехи можуть мати оборотне водопостачання, а інші – прямоточне або послідовне. У цьому випадку схема водопостачання промпідприємства фактично є змішаною або комбінованою.

Розглянемо перші дві схеми – прямоточну та схему з повторним використанням води.

У разі *прямоточної схеми* (рис. 1.1, а) всю необхідну для підприємства воду забирають безпосередньо з джерела водопостачання. Відпрацьовану воду після використання на промисловому підприємстві скидають у водойму без очищення, якщо вона не забруднена, або після очищення.

Така схема досить проста і дешева. Великим недоліком прямоточної системи є значне навантаження на водойму як з точки зору відбирання свіжої води на одиницю продукції, так і скидання відпрацьованої води, що зрештою призводить до забруднення та виснаження природних джерел.

Умови застосування прямоточної системи водопостачання:

- достатньо потужне джерело водопостачання, розташоване поблизу промислового підприємства (не більше 1,5–2 км);
- невелика різниця відміток майданчика підприємства і горизонту води джерела водопостачання ( $\leq 15$  м);
- неможливість чи недоцільність використання скидної води.

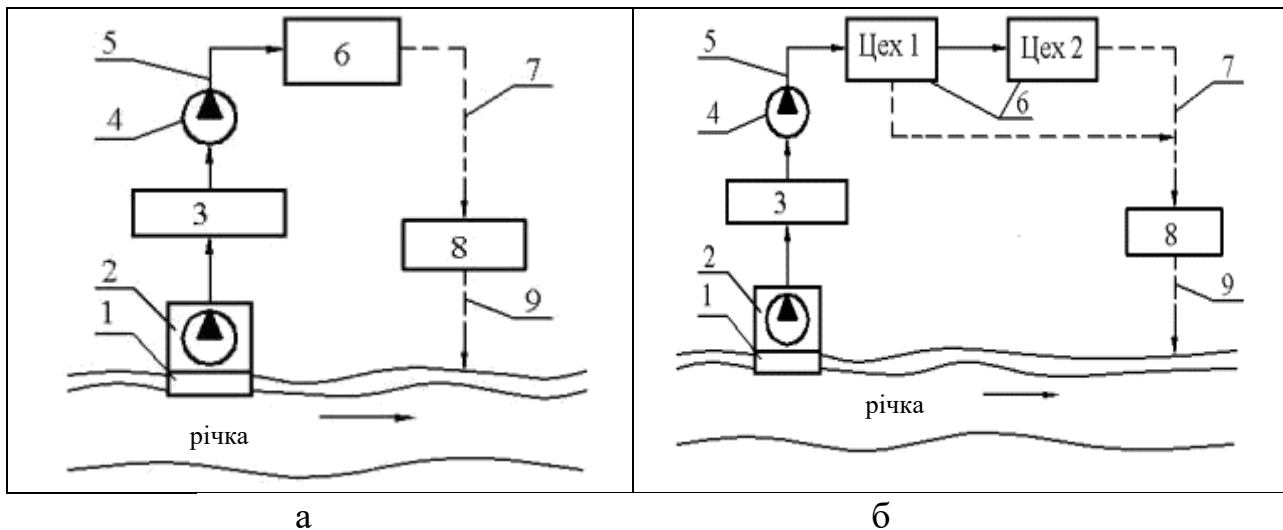


Рисунок 1.1 – Системи виробничого водопостачання:

а – прямоточна; б – із повторним використанням води;

- 1 – водозабір; 2 – насосна станція I підйому; 3 – водоочисні споруди;
- 4 – насосна станція II; 5 – подача річкової води; 6 – промислове підприємство;
- 7 – відведення відпрацьованої води; 8 – станція очистки стічних вод;
- 9 – скидання води у річку

Особливими є вимоги до температури води, яку використовують для виробничих потреб. Так, наприклад, на теплоелектростанціях більш низька температура охолоджувальної води забезпечує підвищений виробіток електроенергії.

Прямоточна система водопостачання не може бути впроваджена у разі хімічного забруднення відпрацьованої нагрітої води, яку без спеціальної очистки не можна скидати у водойму, але за умовами технологічного процесу можна знову використовувати після охолодження.

Промислові стічні води можна очищувати разом із міськими або на позамайданчикових очисних спорудах. Перед скиданням в об'єкт водопостачання такі води потребують розбавлення водою. Кратність розбавлення: для нафтопереробної промисловості – у 60 разів, целюлозно-паперової – у 20–40 разів, для виробництва синтетичного волокна – у 10–15 разів, для азотної промисловості – у 10 разів, для виробництва синтетичного каучуку – у 2 000 разів.

У разі недостатнього очищення й розведення відпрацьованої води відбувається забруднення поверхневих джерел. Вид забруднення залежить від функціонального використання води. Якщо вода використовується як теплоносій, то вона забруднюється механічно та термічно. Якщо воду використовують для поглинання та транспортування різних домішок у виробництві, то в цьому випадку наявні ще й хімічні забруднення.

*Схема з повторним використанням води* (рис. 1.1, б) відрізняється від попередньої тим, що забруднену воду в першому виробничому процесі повторно використовують у другому виробничому процесі. Водночас якість води після забруднення у першому виробничому процесі має відповідати потребам другого виробничого процесу. Прикладом застосування такої схеми може бути використання води, що витрачається на охолодження конденсаторів паротурбінних установок на великих теплоенергетичних об'єктах, оскільки ця вода тільки нагрівається і не забруднюється якимись компонентами, а тому може повторно використовуватися іншими споживачами, які забруднюють цю воду і не висувають завищених вимог до температури води. Після використання вони скидають свої стічні води після відповідної очистки. Завдяки такому рішенню відпадає необхідність подачі води споживачу II безпосередньо з джерела – таким чином економиться електроенергія на підймання води на висоту  $\Delta H$  (на цю висоту вода вже була піднята під час надання її споживачу I).

Ця схема більш прогресивна, ніж перша, оскільки дозволяє зекономити приблизно у два рази кількість свіжої води, що забирають підприємства з водних об'єктів. До того ж зменшуються розміри і вартість водозабірних споруд, насосної станції першого підйому і водоводів, хоча виникає необхідність у додаткових витратах на спорудження приймального резервуару або охолоджувача і насосної станції II підйому. Однак і ця система не скорочує кількості забруднень, що скидаються у водні об'єкти. Така система можлива у разі  $Q = Q_I \geq Q_{II}$ .

Умови застосування схеми із повторним використанням води:

- відносно невелика потужність джерела водопостачання;
- висока вартість поданої води;
- можливість повторного використання води;
- достатній напір на скиді (тобто не потрібне вторинне перекачування води).

З економічних міркувань, вимог екології, а також у разі обмежених запасів води у природних джерелах на промислових підприємствах рекомендується споруджувати **оборотні системи** технічного водопостачання. В оборотних системах технічного водопостачання воду використовують багато разів.

Вода в оборотному циклі водопостачання може нагріватись та забруднюватись. У разі оборотного водопостачання воду після використання споживачем не скидають, а знову подають цьому ж споживачеві після тієї чи іншої обробки. Завдяки цьому загальна кількість води, що витрачається на одиницю продукції, залишається тією ж самою, а кількість свіжої води, що забирають з джерела, зменшується у 10–20 разів і становить 5–10 % від кількості оборотної води (залежно від характеру виробничого процесу). Звичайно воду, що повторного використовується, необхідно кожен раз охолоджувати, очищувати, щоб вона відповідала технологічним вимогам.

Найбільшого поширення оборотні схеми набули у теплообмінних циклах, де технологічну воду використовують для відведення тепла від працюючих агрегатів (рис. 1.2, а), а після використання охолоджують у градирнях, бризкальних басейнах, ставках.

У процесі охолодження 2–3 % води випаровується чи розбризкується. До того ж через негерметичність теплообмінної або водопровідної мережі можуть бути витоки води. За рахунок випаровування в оборотному циклі зростають мінералізація та твердість води, що призводить до відкладення солей (карбонатів кальцію і магнію) на стінках теплообмінної апаратури та

водопровідних труб. Щоб забезпечити певний сольовий склад, із системи постійно скидають частину води та додають певну кількість свіжої (підживлюють), тобто здійснюють продувку системи.

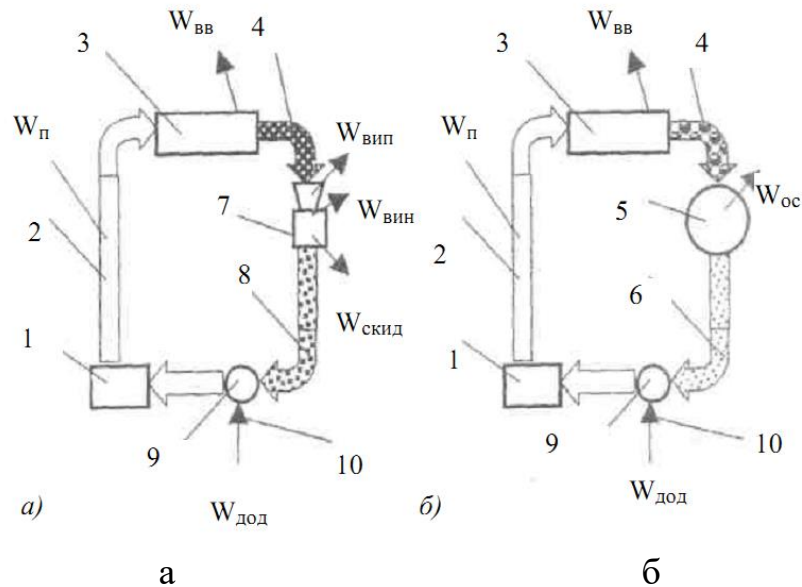


Рисунок 1.2 – Оборотні схеми водопостачання:

а – оборотна з охолодженням; б – оборотна з очищенням води;

1 – станція; 2 – подача чистої води;

3 – підприємство; 4 – відведення відпрацьованої води;

5 – очисні споруди; 6 – відведення очищеної води; 7 – охолоджувальний пристрій; 8 – подавання охолодженої води, 9 – підживлювальний колодезь;

10 – подача підживлювальної води;  $W_n$  – кількість води, що подають на виробничий процес;  $W_{вв}$  – виробничі витрати води;  $W_{ос}$  – кількість води, що втрачається з осадом на водоочисній станції;  $W_{скид}$  – кількість води, що скидають у водойму

Оборотні схеми з очищенням (рис. 1.2, б) – це такі системи, в яких вихідну воду використовують, а стічну воду очищають на очисних спорудах від домішок і використовують знову на тому самому виробництві. Наприклад, у гальванічному виробництві стічні води забруднюються солями важких металів; очищення води на досить складних очисних спорудах дозволяє повернути воду у виробництво і захистити водойми від забруднення токсичними елементами.

Оборотне водопостачання дозволяє в десятки разів зменшити споживання вод. Так, наприклад, у виробництві синтетичного каучуку із прямоочною системою водопостачання на кожну тону продукції витрачають  $2\ 100\ \text{м}^3$  води, а із оборотною системою додавання свіжої води всього  $165\ \text{м}^3$  на 1 т каучуку.

Оборотне водопостачання лише тоді вигідніше за прямоточне, коли вартість додаткових споруд у разі його реалізації перекривається економією під час будівництва головних споруд, водоводів і з урахуванням зменшення витрат електроенергії на подачу свіжої води.

Переваги оборотної системи водопостачання порівняно з прямоточною:

- зменшуються розміри головних споруд і водоводів;
- зменшуються витрати електроенергії для подачі води від джерела до підприємства;
- зменшуються розміри колекторів скидної води;
- більша надійність (безперервність) водопостачання, оскільки в цьому випадку завжди є деякий запас води на майданчику підприємства.

Недоліки оборотної системи:

- ускладнення системи водопостачання;
- необхідність у багатьох випадках застосовувати хімічну обробку води для запобігання корозії, боротьби з відкладеннями і біологічними обростаннями;
- збільшуються безповоротні втрати води.

Схему виробничого водопостачання обирають за результатами аналізу призначення води, яку використовують, технічних і місцевих умов (наприклад, потужністю джерела та якістю води в ньому), відстані підприємства від джерела, санітарних вимог до скидання стічних вод. Проте в усіх випадках потрібно більше використовувати оборотні системи.

Випадком оборотної системи водопостачання є *замкнена система виробничого водопостачання*, коли скидання відпрацьованої води за межі підприємства немає. З точки зору захисту навколишнього середовища та захисту водойм від забруднення стічними водами ця система найбільш прогресивна. Однак за цієї системи дуже складно забезпечити стабільність води в оборотному циклі, суттєво зростають вимоги до якості підживлюючої (свіжої) води, доводиться застосовувати більш складні технологічні схеми очистки як свіжої, так і оборотної води на локальних очисних спорудах, ускладнюється експлуатація всієї системи водного господарства промислового підприємства, збільшуються безповоротні втрати води.

Однією з основних причин, що перешкоджають повному використанню забруднених або нагрітих стічних вод в обороті, є утворення щільних сольових відкладень за трактом руху води – в одних випадках, а також корозійні процеси – в інших. Дуже часто ці обидва процеси протікають одночасно і нерозривно пов'язані. Таким чином, під час переходу на замкнений режим

роботи виникає необхідність вивчення водно-сольового балансу систем оборотного водопостачання.

Отже, основні питання, що характеризують роботу систем оборотного водопостачання, такі:

- водний і сольовий баланси;
- оцінка небезпечності та інтенсивності утворення щільних сольових відкладень в обладнанні та трубопроводах;
- оцінка небезпечності корозійної спрацьованості;
- методи стабілізаційної обробки води.

Системи оборотного водопостачання поділяють на відкриті й закриті.

*Відкриті системи* – це такі системи, у яких охолодження води здійснюється у градирнях, бризкальних басейнах, ставках-охолоджувачах із використанням обладнання та споруд відкритого типу у разі безпосереднього контакту охолоджуючої води та повітря.

*Закриті системи* – це такі системи, в яких охолоджуюча вода не вступає у безпосередній контакт з повітрям і охолоджується в закритих теплообмінниках, тобто через стінку.

У відкритій системі втрати води складаються із втрат на випаровування та на крапельний винос з вітром. Поповнення втрат води здійснюється за рахунок підживлення. Втрати води називаються незворотними.

У закритих системах втрати води зведені до мінімуму та визначаються тільки витіканням із нещільних з'єднань трубопроводів і арматури. Сучасні закриті систем застосовуються переважно в охолоджуючих системах водопостачання, де вода тільки нагрівається і не забруднюється механічними домішками. Для забруднених систем закриті теплообмінники поки що не застосовують.

На підприємствах часто кількість охолоджуючих систем значно перевищує інші, в яких вода забруднюється. В охолоджуючих системах використовують до 70–80 % води від загальної витрати, що споживає підприємство. Це так звані умовно-чисті цикли.

### **1.5 Витрати та втрати води на промислових підприємствах**

Промислові підприємства використовують значну кількість води – на виробничі, господарсько-питні та протипожежні потреби. До найбільш значних виробничих споживачів належать металургійні, нафтопереробні, хімічні заводи, теплові електростанції, що використовують воду для охолодження, підприємства целюлозно-паперової та гірничодобувної промисловості, де

значна кількість води використовується для промивання сировини і продукції.

Вода використовується для конденсації й отримання пари, гідротранспортування, пиловловлювання і для багатьох інших потреб. Залежно від призначення води у виробництві до якості води висувають різні вимоги.

Значні обсяги споживання води у промисловості потребують особливої уваги до питань її економії та раціонального використання, усунення втрат води з витокami і в охолоджувачах оборотної води. Для оборотних систем водопостачання промислових підприємств важливо розрізняти витрати оборотної води, необхідні для виробництва продукції, і витрати «свіжої води», яку забирають з джерела водопостачання для поповнення втрат води на виробництві. Для підвищення ефективності роботи системи водного господарства промислових підприємств і захисту навколишнього природного середовища необхідно прагнути скорочення витрат свіжої води і зменшення об'ємів стічних вод, що скидають у водойми.

Витрати води на виробничі потреби підприємств залежать від характеру й обсягу виробництва та застосованих технологічних процесів і визначають за нормами водоспоживання або питомими витратами води на одиницю продукції.

Норма водоспоживання для виробництва однакової продукції визначається низкою факторів:

- видом і якістю сировини;
- технологічною схемою виробництва;
- застосуванням обладнання;
- системою водопостачання;
- місцевими умовами;
- якістю води, що використовується;
- умовами використання води (температурою нагріву, ступенем забруднення).

Також потрібно зазначити, що для одного і того ж виробництва норма водоспоживання може змінюватися в широких межах залежно від різної якості води. Для охолодження конденсаторів турбін на 1 кВт потужності витрачається 300 л води за температури 25 °С, а за температури 15 °С – 200 л.

*Нормою водоспоживання* вважається доцільна кількість води, що необхідна для виробничого процесу і встановлена на основі передового досвіду або науково обґрунтованого розрахунку.

Орієнтовно для розрахунків споживання води на виробничі потреби норми водоспоживання обирають за довідником «Укрупнені норми витрат води та відведення стічних вод на одиницю продукції для різних галузей

промисловості».

Для різних підприємств витрати води на одиницю продукції змінюються у широких межах:

- підприємства вугільної промисловості – 3–5 м<sup>3</sup>/т;
- металургійні заводи з повним циклом виробництва (доменні печі, мартенівські печі, газоочищення, прокатні стани, повітродувні станції)

на 1 т чавуну – 150–200 м<sup>3</sup>/т;

- нафтопереробні заводи – 100–120 м<sup>3</sup>/т;
- заводи синтетичного каучуку – 600–1 000 м<sup>3</sup>/т;
- виробництво пластмас – 200–250 м<sup>3</sup>/т;
- машинобудівельні заводи – 15–20 м<sup>3</sup>/т;
- молочні заводи – 15–20 м<sup>3</sup>/т;
- м'ясокомбінати – 10–15 м<sup>3</sup>/т;
- підприємства целюлозно-паперової промисловості – 50–800.

Значні витрати води характерні для теплоелектростанцій (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Витрати води на ТЕС

Потужність, тис. кВт	25	50	100	200	1 200
Витрата води, м <sup>3</sup> /год	5 000	12 000	20 000	40 000	200 000

За таких великих витрат зазвичай застосовують оборотне водопостачання із додаванням 3–5 % свіжої води.

Режим витрачання води на промисловому підприємстві відрізняється від режиму роботи комунального водопостачання і залежить від особливостей технологічного процесу: може бути рівномірним, нерівномірним та епізодичним.

### 1.6 Втрати води в оборотних циклах водопостачання

Під час використання й охолодження води у системах оборотного водопостачання частина її втрачається на випаровування, краплинне винесення, на виробництво, на осад, що видаляється з очисних споруд, на скидання води із системи (продувку системи). Співвідношення величин цих втрат характеризує водний режим оборотного циклу водопостачання.

*Продувка* – це освіження циркулюючої води за рахунок скидання частини води, що призводить до зменшення рівня забруднень циркулюючої в системі води.

Втрата води на продувку системи залежить від продуктивності системи

оборотного водопостачання, карбонатної твердості води, що додається у систему та способу її обробки. Для сучасних систем оборотного водопостачання втрата води на продувку становить 1–3 % витрати циркулюючої в системі води.

Втрати води у вигляді шламової пульпи видаляється з очисних споруд. Кількість цієї води коливається для різних систем у межах від 2–3 % до 5 % і більше.

Усі втрати в системі оборотного водопостачання компенсуються підживленням за рахунок поповнення свіжою водою.

Позначимо кількість води, що перебуває в обороті  $Q_{об}$ , м<sup>3</sup>/год, тоді

$$q_d = \frac{P_d \cdot Q_{об}}{100} ; \quad q_1 = \frac{P_1 \cdot Q_{об}}{100} ; \quad q_{пр} = \frac{P_3 \cdot Q_{об}}{100} .$$

### 1.7 Вимоги споживачів до якості води

Основними показниками, що визначають придатність води для різних категорій водоспоживачів, є склад і концентрація домішок, що містяться в ній. За специфікою вимог до якості очищеної води розрізняють воду, що використовується для господарсько-питних потреб працівників промислових підприємств, для охолодження елементів технологічних агрегатів у теплоенергетиці й інших галузях народного господарства, підживлення парових котлів, технологічних потреб промисловості тощо.

Якість і властивості води, яку подають для виробничих потреб, встановлюють у кожному конкретному випадку залежно від ролі води та вимог технологічного процесу виробництва з урахуванням сировини, що використовують.

Загальними є такі вимоги до якості та властивостей технічної води:

1) вода не повинна бути шкідливою для здоров'я обслуговуючого персоналу;

2) не повинна погіршувати якість продукції;

3) не повинна викликати корозії;

4) не повинна давати карбонатних та інших сольових відкладень і не викликати біологічного обростання;

5) не повинна погіршувати техніко-економічні показники виробничого процесу.

У промисловості найбільшу кількість води використовують для охолодження технологічного обладнання, пари, рідких і газоподібних продуктів, конденсаторів парових турбін, доменних і мартенівських печей.

Водночас застосовують прямоточні й оборотні системи водопостачання.

Вимоги до води, що використовують для технологічних процесів, відрізняються значним різноманіттям, обумовленим специфікою виробництва, і загалом вони нижчі за вимоги ДСанПіН 2.2.4-171-10 Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною [1] – таку воду називають технічною. Однак для низки виробництв за деякими показниками ці вимоги можуть бути значно вищі, оскільки для багатьох галузей промисловості винятково важливе значення мають вимоги відносно вмісту у воді різних речовин. Наприклад, лімітується твердість води під час її використання на підприємствах паперової і текстильної промисловості, виробництві штучних волокон. Вміст заліза і марганцю строго обмежено у воді, яку використовують під час виробництва пластмас. У харчовій і текстильній промисловості обмежена окисність води і вміст хлоридів. У воді, яку використовують для приготування розчинів кислот, лугів, барвників, мила, твердість води не повинна перевищувати 0,35 мг-екв/л. Вода, яка використовується з промивною метою, не повинна містити речовин, які негативно впливають на матеріал, що промивається. Специфічні вимоги висувають до води, що входить до складу продукції.

Для низки виробництв, у гірничодобувній промисловості у разі збагачення корисних копалин, у воді для гідротранспорту, обмивання і сортування сировини повинно бути грубодисперсних домішок.

Вимоги до якості охолоджуючої води під час її комплексного використання як середовища, яке поглинає і транспортує забруднення у разі безпосереднього зіткнення із продуктом (пиловловлення й очистка газів, гасіння коксу тощо) визначаються властивостями, видом, складом цього продукту, а також умовами використання води.

Температура води зазвичай повинна бути  $\leq 25\text{--}30$  °С, завислі речовини  $\leq 150\text{--}200$  мг/л, запах до 4 балів, рН 7,2–8,5, поверхнево-активних речовин  $\leq 15$  мг/л.

Унаслідок неможливості встановити єдині усереднені показники для всіх підприємств, у таблиці 1.2 наведено приблизні загальні вимоги до якості води, що використовують у системах оборотного водопостачання підприємств чорної металургії.

Таблиця 1.2 – Приблизні загальні вимоги до якості води, що використовують у системах оборотного водопостачання

Показники якості води	Вода I категорії, яку використовують для охолодження обладнання і продукту в теплообмінних апаратах (без зіткнення з ним), що працюють за температур охолодження продукту чи стінки			Вода, яку використовують як середовище, що поглинає і транспортує домішки	
	$\leq 80$ °C	80–400 °C <sup>*2</sup>	$\geq 400$ °C (із вогневим обігрівом) <sup>*3</sup>	Без нагрівання (збагачення корисних копалин, гідрозоло-видалення тощо). Вода II категорії	З нагріванням (уловлювання і очистка газів гасіння коксу тощо). Вода III категорії
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<i>Фізичні:</i>					
Температура <sup>*1</sup> , °C	25–28	28–40	40–45	Не нормується	30–45
Завислі речовини в оборотній воді <sup>*4</sup> , мг/л	20–30	10–20	5–10	У разі гравітації до 1 000–10 000, у разі флотації до 200	150–200
Олії і смолоутворюючі продукти (ефіророзчинні), мг/л	$\leq 20$	10–20	$\leq 10$	Не нормується	Не нормується
Запах, бали	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 4$
<i>Хімічні:</i>					
pH	6,5–8,5	6,5–8,5	6,5–8,5	Не нормується	6,5–9
Твердість загальна, мг-екв/л	Не нормується	$\leq 7$	$\leq 5$	Не нормується	Не нормується
Твердість карбонатна, мг-екв/л в оборотній воді в підживлюючій воді	2–3,5 $\geq 1,5$ та $\leq 2,5$	1,5–3	1,5–2,5	Не нормується Не нормується	Під час очищення газів необхідна вода
Лужність загальна в оборотній воді, мг-екв/л	4	3,5	$\leq 3$	Не нормується	Не нормується

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6
Загальний солевміст (сухий залишок) в оборотній воді, мг/л	≤ 2 000	≤ 1 300	≤ 800	Не нормується	Не нормується
Показники якості води	Вода I категорії, яку використовують для охолодження обладнання і продукту в теплообмінних апаратах (без зіткнення з ним), що працюють за температур охолодження продукту чи стінки			Вода, яку використовують як середовище, що поглинає і транспортує домішки	
	≤ 80°C	80–400 °C* <sup>2</sup>	≥ 400 °C (з вогневим обігрівом)* <sup>3</sup>	Без нагрівання (збагачення корисних копалин, гідрозоло-видалення тощо). Вода II категорії	З нагріванням (уловлювання і очистка газів, гасіння коксу тощо). Вода III категорії
Хлориди в оборотній воді, мг/л	≤ 350	≤ 350	≤ 150	Не нормується	Не нормується
Сульфати в оборотній воді, мг/л	≤ 500	≤ 600	≤ 250	Не нормується	Не нормується
Fe <sub>заг</sub> , мг/л	1-4	≤ 2	≤ 1,5	У разі гравітації не нормується, у разі флотації до 10	Не нормується
Окисність перманганатна	≤ 20	≤ 20	≤ 20	Не нормується	Не нормується
ХПК у підживлюючій воді, мг/л	100–150	Не нормується	Не нормується	Не нормується	Не нормується
<i>Біологічні:</i>					
БПК <sub>5</sub> в оборотній воді	15–30	10–15	10–5	Не нормується	Не нормується
Біогенні елементи у підживлюючій воді, мг/л					
Азот загальний	50–80	50–80	≤ 8	Не нормується	Не нормується
Фосфати P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,5	2,5	–	Не нормується	Не нормується
Примітка 1. * <sup>1</sup> – уточнюють залежно від технологічного процесу за допустимою різницею температур. Примітка 2. * <sup>2</sup> – водяне охолодження може бути замінене повітряним. Примітка 3. * <sup>3</sup> – на металургійних печах застосовують випарне охолодження. Примітка 4 * <sup>4</sup> – уточнюють залежно від швидкості руху охолоджуючої води в теплообмінних апаратах.					

Основні вимоги зводяться до забезпечення вискоєфективної роботи теплообмінного обладнання. Водночас на поверхні охолоджуючих елементів не повинно виникати корозійних процесів і утворення сольових механічних або біологічних відкладень. Інакше будуть порушені умови теплопередачі, збільшаться енергетичні витрати, погіршаться експлуатаційні характеристики системи та буде відбуватися руйнування конструкційних матеріалів.

Якість охолоджуючої води визначається умовами застосування. Так, зазвичай обмежується максимальна температура нагріву води і бікарбонатів кальцію і магнію, загальна твердість води, вміст завислих речовин, їхній гранулометричний склад, вміст заліза, марганцю, органічних з'єднань для запобігання утворення накипу, засмічення відкладеннями суспензії або біообростання холодильних апаратів чи конденсаторів, а також трубопроводів, що знижує ефективність роботи всієї системи охолодження і збільшує витрати на експлуатацію.

Для запобігання утворення накипу в оборотних системах під час нагріву води нормується як карбонатна тимчасова твердість, так і некарбонатна твердість. Наявність у воді солей марганцю і заліза, а також біогенних елементів азоту і фосфору може сприяти розвитку біологічних обростань апаратів і труб (зменшенню живого перерізу і внаслідок цього збільшенню втрат напору).

В охолоджуючій воді нормується рН (6,5–8,5), обмежується вміст сульфатів та хлоридів, у разі підвищеного вмісту яких вода стає агресивною щодо бетону.

Якість води для підприємств теплоенергетики відображає специфіку цієї галузі, де більшу кількість води використовують для охолодження конденсаторів парових турбін, підживлення теплових мереж та інших потреб.

Природні води, що використовують у системах технічного водопостачання, і в яких не відбувається сольових відкладень, тобто не випадають солі карбонатної твердості за температури 40–60 °С, прийнято називати *термостабільними*. Карбонатна твердість цих вод не перевищує 4 мг-екв/л для прямого водопостачання, та 2–3 мг-екв/л – для оборотного.

*Обмежено термостабільними* називають води, в яких утворення карбонатних відкладень відбувається у разі накопичення солей кальцію.

*Не термостабільні* води – води, під час нагрівання яких відразу утворюються відкладення.

У практиці водопідготовки *стабільною* називають воду, яка за визначеної температури не виділяє нерозчинні сполуки карбонату кальцію та не є

агресивною, тобто не руйнує конструкційні матеріали.

Особливу роль в охолоджуючій воді відіграють розчинені гази та кисень, вуглекислота, сірководень, метан. Вуглекислота, кисень, сірководень за певних умов надають воді корозійних властивостей щодо металів і бетонів. Наявність у воді вуглекислоти суттєво впливає на її якість.

За концентрацією агресивної вуглекислоти (це різниця між вільною і рівноважною вуглекислотою) можна судити про агресивність або стабільність води. У поверхневих водах наявність вуглекислоти виключена, а в підземних може бути значною. Наявність у воді сірководню та кисню інтенсифікує процес корозії металів.

До води, яку використовують для живлення парових котлів, висувають завищені вимоги порівняно з водою, що використовують для охолодження. Під час використання води для потреб паросилового господарства вона не повинна утворювати накипу, викликати корозію металу, спінюватися, призводити до забруднення пари і відкладення різних домішок на лопатках турбін.

Використання жорсткої води призводить до утворення відкладень накипу на поверхні нагріву казанів, погіршує теплопередачу, викликає перегрів і прогар металу деталей у місцях утворення накипу, сприяє перевитраті палива, скорочує термін служби устаткування і призводить до аварій різної тяжкості.

Термічний розпад бікарбонатів і підвищення концентрації солей, пов'язане з безперервним випаровуванням, інтенсифікує процес випадання їх із розчину й утворення твердого накипу на стінках котлів.

Найбільшу небезпеку становлять солі, розчинність яких зменшується із підвищенням температури: карбонат кальцію, сульфат кальцію, силікати магнію і кальцію. Наявність у воді інших солей – наприклад, хлориду, сульфіту, сульфату натрію, що створює ризик відкладення у разі значної концентрації їх у воді, – зменшує розчинність солей кальцію і магнію, сприяє утворенню накипу.

Тому в теплоенергетиці вміст солей для цілої низки процесів допускається не більше 10–15 мг/л, а вміст солей твердості має бути у десятки і сотні разів меншим, ніж для води, що використовують під час охолодження. Така вода зазвичай має підлягати частковому або глибокому знесолюванню і пом'якшуванню. Для казанів високого тиску недопустима наявність кремнієвої кислоти, яка сприяє утворенню щільних відкладень накипу. Окисність води повинна бути у декілька разів нижчою, ніж для систем охолодження.

Недопустиме спінювання котлової води, що звичайно зумовлене наявністю фосфатів, лугів, нафтопродуктів, поверхнево-активних речовин і призводить до забруднення пари різними домішками та подальшого

відкладення забруднень на лопатках турбін. Луги, з одного боку, створюють небезпеку забруднення пари, а з іншого боку, сприяють утворенню щільної плівки гідроокису заліза на поверхні казана, що запобігає корозії металу. Тому доцільно підтримувати у живильній воді деякий мінімальний вміст лугів у межах 20–50 мг/л їдкого натру.

### **Контрольні запитання**

1. Які системи технічного водопостачання застосовують на промислових підприємствах?
2. На які цілі витрачається вода на теплових електростанціях?
3. Поясніть принципову схему прямого водопостачання.
4. Норми водопостачання та водовідведення на промислових підприємствах.
5. Вимоги до якості води, які використовують для живлення парових котлів.
6. Послідовно-оборотні системи водопостачання. Їхні переваги перед прямоочними системами.
7. Втрати води в оборотних системах водопостачання.

## **2 МЕТОДИ ВОДОПІДГОТОВКИ. ОСНОВНІ ТИПИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ВОДИ**

### **2.1 Коагуляція і прояснення води**

Необхідність видалення з води грубодисперсних і колоїдних домішок на перших стадіях очистки води обумовлюється вимогами покращення техніко-економічних показників наступних ступенів очистки природних вод від інших видів домішок. З досвіду експлуатації устаткувань іонообмінного знесолення води відомо, що наявність у вихідній воді органічних речовин призводить до «старіння» іонітів, тобто веде до незворотної зміни їхніх технологічних властивостей. Зменшення терміну служби іонітів у 4–7 разів викликає не тільки підвищення вартості знесоленої води, але й необхідність збільшення виробництва іонообмінних матеріалів.

Попередню очистку води здійснюють шляхом поєднання декількох технологічних процесів. На цей час попередню очистку води на установках водопідготовки здійснюють із поєднанням таких процесів: коагуляції та прояснення; коагуляції, вапнування і прояснення; коагуляції, вапнування, магнезійного знекремнювання і прояснення води.

Коагуляція – це процес, у якому відбувається зменшення ступеня дисперсності колоїдно-розчинених домішок внаслідок агломерації їх частинок з утворенням макрофази. Під час коагуляції відбувається процес укрупнення завислих та колоїдних частинок за рахунок їх взаємного злипання під дією молекулярних сил. Завершується процес утворенням великих пластівців розміром 1–10 мм із наступним їх видаленням із води.

Оскільки всі однорідні частинки мають на поверхні ковзання заряди одного знаку, то між ними діють сили взаємного відштовхування, які, так само як і сили взаємного тяжіння, зменшуються зі збільшенням відстані між частинками.

Для того щоб відбулася коагуляція, тобто взаємне тяжіння і злипання частинок, що рухаються, вони повинні подолати максимальну результуючу силу відштовхування – «силовий бар'єр» (БД). Чим вищий «силовий бар'єр», тим важче його подолати та викликати коагуляцію. Чим менша величина електричних зарядів, тим менша сила взаємного відштовхування, тим нижчий «силовий бар'єр». Зменшення величини зарядів частинок може бути досягнуто збільшенням концентрації протиіонів у розчині шляхом додавання до цього розчину відповідних електролітів.

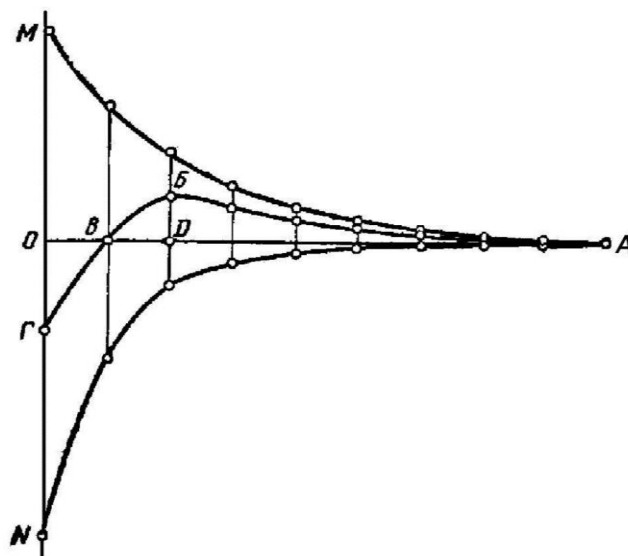
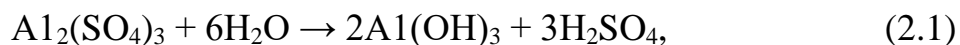


Рисунок 2.1 – Залежність взаємодії сил відштовхування та тяжіння від відстані між колоїдними частинками:

OA – відстань між колоїдними частинками; AM – крива відштовхування;  
AN – крива тяжіння; ABΓ – результуюча крива взаємодії колоїдних частинок;  
BD – «силовий бар'єр»

Для здійснення технологічного процесу коагулювання колоїдних домішок, що містяться у воді як коагулянти, застосовуються сульфат алюмінію  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , сульфат заліза і хлорид заліза  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{FeCl}_3$ .

У результаті реакцій гідролізу



і наступного окиснення гідроксиду заліза (2+) розчиненим у воді киснем за реакцією



утворюються майже нерозчинні у воді гідроксиди алюмінію та заліза, які є нестійкими компонентами колоїдної системи.

Для прискорення процесу коагуляції застосовують підігрів коагулюючої води до 30–40 °С і перемішування її, завдяки чому колоїдні частинки забруднень і коагулянту зазнають більш частих та сильних зіткнень, що призводять до їх злипання. Однак перемішування не повинно проводитися занадто енергійно, щоб не роздробити пластівці, що утворилися. Підвищення температури понад 40 °С погіршує ефект освітлення внаслідок більш швидкого броунівського руху колоїдних частинок і гальмування адсорбції їх пластівцями.

Процес коагуляції в деяких випадках можна прискорити також у разі застосування суміші коагулянтів  $\text{FeCl}_3$  та  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Для прискорення процесу коагуляції останнім часом дедалі частіше застосовується поліакриламід. Додавання поліакриlamіду в коагульовану воду після утворення пластівців коагулянту навіть у дуже малих дозах (0,5–2,0 мг/кг) значно укрупнює та обтяжує пластівці коагулянту, що призводить до прискорення їх осадження та дає можливість підвищити швидкість підйому води в освітлювачах та їх продуктивність.

Поліакриламід випускається у вигляді студнеподібної маси і застосовується у вигляді розчину 0,1–0,2-відсоткової концентрації.

Сульфат заліза ( $\text{FeSO}_4$ ) як коагулянт має такі переваги порівняно із сульфатом алюмінію  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ :

а) процес коагуляції сульфатом заліза залежить від температури води і тому вимагає її підігріву;

б) швидкість осадження гідроксиду заліза вища, ніж гідроксиду алюмінію, оскільки щільність гідроксиду заліза у 1,5 рази більша за щільність гідроксиду алюмінію, що дозволяє зменшити тривалість відстоювання та розміри освітлювачів.

Незважаючи на ці переваги сульфату заліза, у прямоочних коагуляційних установках доцільніше застосовувати як коагулянт сульфат алюмінію, що не вимагає, як правило, підлужування води за наявності достатньої для створення оптимального рН природної лужності (карбонатної твердості).

Вибір виду та експлуатаційної дози коагулянту, а також дози лужного реагенту та оптимальної величини рН проводять на основі результатів пробної коагуляції води різними реагентами, проведеними у лабораторних умовах у характерні для джерела водопостачання періоди року.

#### *Коагуляція води в освітлювачах*

Великі завислі частинки видаляються відстоюванням, дрібні – фільтруванням. Для фільтруючого завантаження використовують пісок, мармурову крихту, антрацит, сульфовугілля.

Для видалення колоїдних речовин з води з низькою лужністю (до 2,5 мг-екв/дм<sup>3</sup>) зазвичай воду обробляють коагулянтами, які сприяють укрупненню завислих речовин (сірчаноокисле залізо FeCl<sub>3</sub> і сірчаноокислий алюміній Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). Ці речовини гідротуються з утворенням пластівців (Al(OH)<sub>3</sub> і Fe(OH)<sub>3</sub>). Після цього осад видаляється в освітлювачах.

*Освітлювач* є апаратом, у якому одночасно протікають хімічні реакції, пов'язані з введенням реагентів, а також фізичні процеси формування утворених осадів (шламу) в об'ємі води освітлювача і фільтрації обробленої води через їхній шар. Контактне середовище в освітлювачі – шламований фільтр, утворений з раніше утворених і знову утворених частинок шламу, що перебувають у завислому стані за рахунок дії вихідного потоку води. Вода, що пройшла через шламований фільтр, звільняється від грубодисперсних частинок, що містяться у вихідній воді та утворилися у результаті хімічних реакцій в освітлювачі. Їх остаточної концентрація перебуває у межах 5–10 мг/дм<sup>3</sup>.

Освітлювачі використовуються для реалізації осідання під час обробки води коагулянтами, гашеним вапном, содою, магнезитом.

В освітлювачі відбувається утворення пластівців та прояснення води. Освітлена вода надходить у проміжний бак, з якого насосами подається на освітлювальні фільтри для остаточного звільнення від тонкої зависі, не затриманої в освітлювачі. З фільтрів завись видаляється розпушуючою промивкою зворотним током води. Промивні води збираються у спеціальному відстійнику, з якого рівномірно перекачуються насосом у лінію вихідної води. Крім економії води, тепла і реагентів, ця операція дозволяє інтенсифікувати утворення пластівців внаслідок сприятливого впливу зависі, що міститься у

промивній воді. Для більш глибокого видалення органічних речовин з коагульованої води її після освітлювальних фільтрів пропускають через сорбційні фільтри, завантажені активованим вугіллям.

У теплоенергетиці під час вапнування води використовують освітлювачі із завислим осадом, які розроблені ЦНДІ МПС на продуктивність від 30 м<sup>3</sup>/год до 1 000 м<sup>3</sup>/год і становлять металеві відкриті зверху місткості (рис. 2.2).

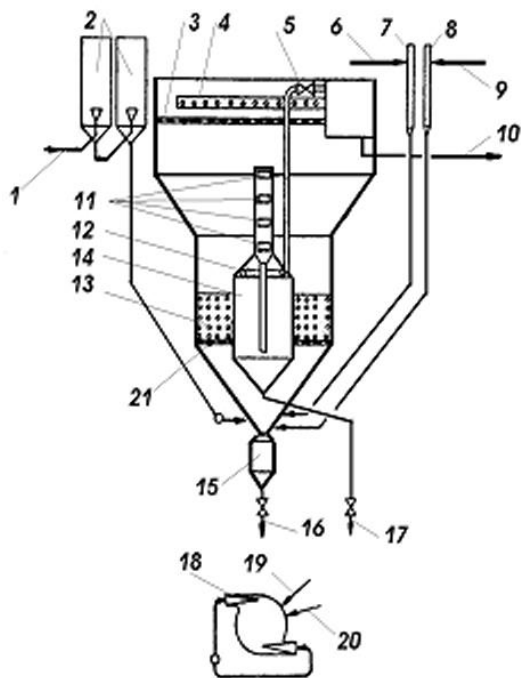


Рисунок 2.2 – Схема освітлювача із завислим осадом ЦНДІ:

- 1 – подача вихідної води;
- 2 – повітровідділювачі; 3 – решітка;
- 4 – водозбірний жолоб; 5 – засувка повертання води із шламовідділювача;
- 6, 9 – підведення коагулянту та вапна;
- 7, 8 – повітровідділювачі реагентів;
- 10 – відведення очищеної води;
- 11 – шлакоприймальні вікна; 12 – колектор проясненої води; 13 – гасник турбулентного потоку; 14 – шламовідділювач;
- 15 – брудозбірник; 16 – періодична продувка; 17 – безперервна продувка;
- 18 – сопло для вводу вихідної води;
- 19, 20 – введення реагентів; 21 – решітка

Вихідна вода (1) подається у повітровідділювач (2), де видаляються бульбашки повітря, а далі через сопло тангенціально надходить до нижньої частини освітлювача. Туди ж так само надходять реагенти. У верхній частині освітлена вода збирається збірним трубопроводом та трубопроводом (10) відводиться на фільтри. Для того щоб осад менше захоплювався освітленою водою, у верхній частині освітлювач розширюється. Для підтримки постійної висоти завислого шару та його оновлення, осад (шлам) постійно відсмоктується через вікна у шламовідділювач (14). Зі шламовідділювача осад (шлам) безперервно видаляється трубопроводом (17). Під час продувки (випускання певної кількості осаду) випускається 1,5–3 % води від продуктивності освітлювача.

Для води з більш високою лужністю коагуляцію поєднують із вапнуванням. Разом з вапном може застосовуватися також сода. Ці процеси проводяться в освітлювачі, де осад, що утворився в результаті вапнування і коагуляції, фільтрується через зважений у висхідному потоці води шар шламу.

Застосування вапна дозволяє зменшити лужність і твердість води, що обробляється і, як наслідок, скоротити витрати реагентів (кислоти і луку) для регенерації іонообмінних фільтрів під час подальшого хімічного знесолення.

Водночас використання вапна призводить до утворення великого обсягу шламових вод, що відводяться із продувкою прояснювача, утилізація яких є серйозною проблемою. Для утилізації шламових вод можуть застосовуватись фільтри-преси різної конструкції (отриманий на фільтр-прес шлам вивозиться на полігон відходів). Крім того, шламові води можна скерувати на золовідвал пиловугільної ТЕС. Зі свого боку, застосування різних коагулянтів веде до збільшення концентрації сульфат-іонів і хлорид-іонів, що стає додатковим навантаженням на перший ступінь знесолення.

## **2.2 Основне обладнання та схеми попередньої обробки води**

За принципом течії води системи водопідготовки поділяють на самопливні (безнапірні) та напірні. У самопливних спорудах вода тече внаслідок дії сили тяжіння у відкритих спорудах, а рівень води у кожній наступній споруді нижчий, ніж у попередній. У напірних спорудах вода тече спорудами закритого типу під тиском, який створює насос. Усі споруди можуть бути розташовані на одному рівні. Напірні споруди зазвичай використовуються на станціях підготовки води для технічних цілей та на станціях підготовки питної води невеликої продуктивності. Схеми освітлення і знебарвлення поділяють на безреагентні (в яких частинка затримується завдяки своїм природним даним) і реагентні, в яких частинка затримується за допомогою введених реагентів.

Попереднє очищення може проводитись на двох типах споруд: на спорудах загальних для господарсько-питного та виробничого водопроводу; на спорудах водопідготовки тільки виробничого призначення. Технологічна схема першого типу споруд для освітлення і знебарвлення або знезалізнення води передбачає здебільшого самопливний варіант, на кінцевому етапі якого передбачається знезараження. Розташовуються споруди зазвичай біля джерела, і найчастіше обирається безреагентна схема під час знезалізнення, реагентна одноступенева схема – під час очистки малокаламутних, забарвлених вод і двоступенева – під час очистки каламутних вод.

У разі каламутності води до 120 мг/л, кольоровості до 120 град ПКШ та будь-якої продуктивності станції використовують схему із контактними освітлювачами (рис. 2.3, а). Вихідну воду попередньо очищують від планктону, сміття на барабанних сітках або мікрофільтрах (2), змішують у трубопроводі з

хлором (3) і подають до контактного резервуару, де окислюються органічні речовини. З резервуару вода надходить у змішувач (4), де вона змішується з коагулянтном (4). Далі вода надходить безпосередньо до контактного освітлювача (6) із зернистою засипкою, де, рухаючись знизу вгору, освітлюється й збирається у резервуарі чистої води.

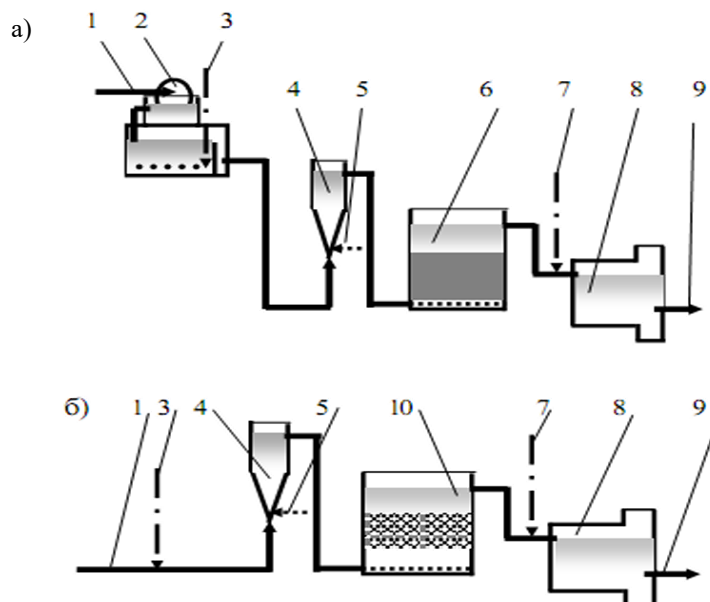


Рисунок 2.3 – Одноступеневі реагентні схеми освітлення і знебарвлення води:

а – з контактними освітлювачами; б – з контактними пінополістирольними фільтрами;

1 – подача води на очищення; 2 – мікрофільтр; 3 – введення первинного хлору; 4 – змішувач; 5 – введення коагулянту; 6 – контактний освітлювач; 7 – введення вторинного хлору; 8 – резервуар чистої води; 9 – подача води на насосну станцію; 10 – контактний пінополістирольно-вугільний фільтр

У разі каламутності вихідної води до 100 мг/л, кольоровості до 100 град ПКШ і будь-якої продуктивності станції можна використовувати схему із контактними пінополістирольними або пінополістирольно-вугільними фільтрами (рис. 2.3, б), на які вода, змішана із реагентами, потрапляє зі змішувача (4). Проходячи через шар плаваючого пінополістиролу знизу вгору, вода прояснюється й знебарвлюється, а у шарі активованого вугілля дезодорується.

За продуктивності станції до 5 000 м<sup>3</sup>/добу рекомендується двоступенева схема із вертикальними відстійниками (перший ступінь очистки) і швидкими фільтрами (другий ступінь очистки).

За продуктивності станції більше 30 000 м<sup>3</sup>/добу замість вертикальних використовують горизонтальні відстійники. Перед ними у схемі обов'язково влаштовуються камери утворення пластівців, конструкція яких залежить від

якості вихідної води. Вода із добре сформованими пластівцями після камери рухається повільним горизонтальним потоком через відстійник і пластівці осідають по всій довжині у нижній частині відстійника. Інші споруди в цій схемі такі самі, як у попередній. В інтервалі продуктивності від 5 000 м<sup>3</sup>/добу до 30 000 м<sup>3</sup>/добу замість відстійників широко використовують освітлювачі із шаром завислого осаду.

На освітлювачі вода, змішана із реагентами, подається безпосередньо зі змішувача (4). У самих освітлювачах вода рухається вертикальним висхідним потоком через шар раніше затриманих пластівців, який і затримує нові порції забруднень. Освітлена вода з верхньої частини освітлювача також, як і в попередніх схемах, відводиться на швидкі фільтри (7). Така сама схема, але з напірними фільтрами, може використовуватись під час попередньої підготовки води на станціях хімічної обробки води. Водночас разом із коагуляцією передбачається вапнування для зменшення твердості, лужності тощо.

У теплоенергетиці у разі каламутної води віддається перевага освітлювачам із завислим осадом на першому етапі реагентного очищення та напірним фільтрам на другому етапі. У разі малокаламутної води попередня реагентна схема передбачає напірні фільтри з одношаровою або двошаровою засипкою із окислюваністю до 15 мг/л. Споруди розташовують на території підприємства.

### **2.3 Фільтрування води. Освітлювальні фільтри**

Практично в усіх технологічних схемах водопідготовки використовуються споруди для фільтрування води. Фільтрування застосовується для глибокого видалення води грубодисперсних частинок, пластівців коагулянту і зкоагульованих колоїдних частинок. Під час фільтрування води тверді частинки затримуються на поверхні або товщі фільтруючого матеріалу.

За відсутності попередньої коагуляції в освітлювачах вода, що містить грубодисперсну суспензію, утворює на поверхні фільтруючого матеріалу фільтруючу плівку. Якщо ж застосовується попередня коагуляція в освітлювачі, у якому затримується основна маса суспензії, і на фільтри надходить вода, що містить дрібні завислі частинки, то фільтрування відбувається не на поверхні, а у товщі фільтруючого шару. Під час такого процесу повніше використовується вся товща зернистого завантаження фільтра та забезпечується високий ступінь прояснення.

Освітлювальні фільтри поділяють на горизонтальні і вертикальні; одношарові, двошарові і багатошарові; одно-, дво- і трикамерні (в одному вертикальному корпусі декілька паралельних камер); на одно- і двопотокові (мають дренаж). За конструкцією фільтри є безнапірні та напірні.

На рисунку 2.4 наведено схеми освітлювальних фільтрів, які застосовуються на водопідготовчих установках електростанцій:

1) за типом – на вертикальні (а – л) та горизонтальні (м, н);

2) за тиском води над фільтруючим шаром – на самопливні або відкриті (а), що працюють під напором, створюваним різницею рівнів води у фільтрі і збірному баку освітленої води, і напірні або закриті (б – н), що працюють під напором, створюваним насосом або високо розташованим баком;

3) за кількістю послідовно працюючих фільтруючих шарів – на одношарові (а, б, в, е, л, м, н) та двошарові (г, д); в одношарових фільтрах фільтруючий шар складається з одного матеріалу (дрібний гравій, кварцовий пісок, активоване вугілля, антрацит, напівспалений доломітовий вапняк), у багатошарових – з різних матеріалів;

4) за кількістю паралельно працюючих камер – на однокамерні (а, б, в, д, м, н), двокамерні (е), двокамерні (г, ж), трикамерні (і);

5) за способом фільтрування – на однопотокові (а, б, г, д, м) та двопотокові (в, н).

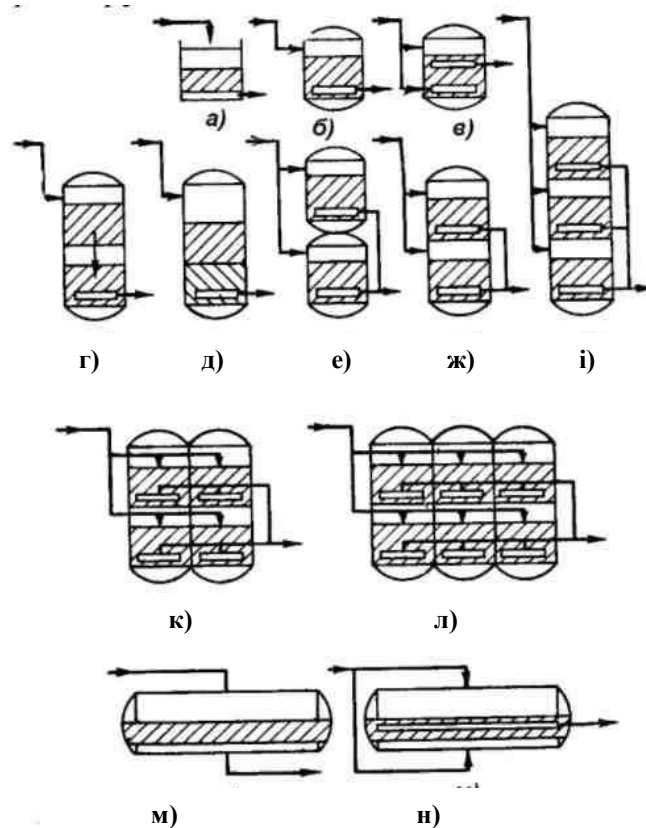


Рисунок 2.4 – Принципові схеми освітлювальних фільтрів

На електростанціях найбільш поширені вертикальні напірні однопоточні

фільтри діаметром до 3 400 мм, що визначається габаритами транспортабельності, з граничною продуктивністю до 90 м<sup>3</sup>/год.

У схемах обробки води на ТЕС, промислових і опалювальних котельнях найпоширенішими є вертикальні напірні освітлювальні фільтри.

*Напірні фільтри* становлять замкнені резервуари циліндричної форми, що можуть витримувати значний тиск (рис. 2.5). Основні елементи напірних фільтрів такі самі, як у безнапірних фільтрах – фільтрувальне завантаження і підтримуючі шари, дренажна система, призначена для відведення проясненої води й подавання промивної води, розподільний пристрій для стисненого повітря тощо. Фільтри розраховані на тиск 0,4–0,6 МПа. Їх виготовляють діаметром від 0,3–0,5 м до 3,4 м.

Фільтр складається з корпусу, верхнього та нижнього розподільних пристроїв, трубопроводів, запірної арматури, пробовідбірною пристроєм та фільтруючого завантаження. Дренажно-розподільні пристрої є найважливішим елементом конструкції освітлювального фільтра. Верхній дренажно-розподільний пристрій призначений для підведення у фільтр і рівномірного розподілу за площею поперечного перерізу води. Нижній дренажно-розподільний пристрій забезпечує відведення освітленої води та рівномірний розподіл за перерізом фільтра води для промивання і стисненого повітря. Трубопроводи та запірні арматури дозволяють у процесі експлуатації перемикаєти потоки води та стисненого повітря.

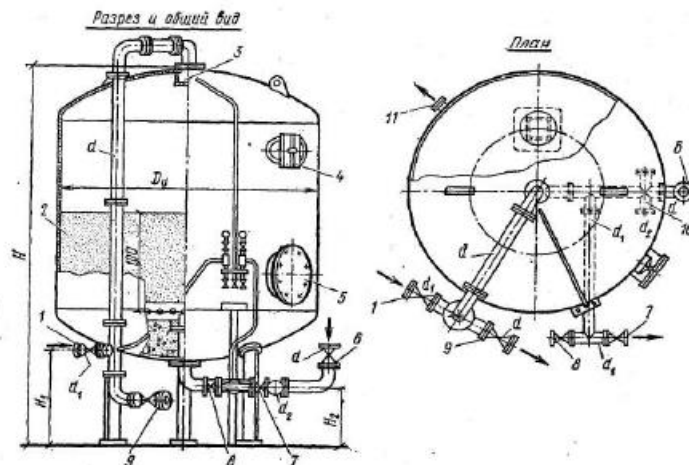


Рисунок 2.5 – Напірний вертикальний фільтр із зернистим завантаженням:

- 1 – подача води на очищення; 2 – фільтруючий шар із зернистим завантаженням; 3 – верхній розподільний пристрій; 4 – контрольний еліптичний лаз; 5 – круглий лаз; 6 – підведення промивної води; 7 – відведення першого фільтрату; 8 – відведення очищеної води; 9 – відведення промивної води; 10 – підведення стислого повітря; 11 – штуцер для гідравлічного вивантаження і завантаження фільтра

Висота шару фільтруючого матеріалу становить зазвичай 1 000–1 200 мм. Вода на очистку подається під напором у верхню частину камери фільтра. Потім у спадному потоці вода проходить фільтруючий шар, освітлюється і через трубчастий дренаж видаляється під залишковим напором за межі фільтра. У разі забруднення фільтруючого шару, зі збільшенням його опору до 0,15 МПа фільтр виводиться на промивку, що полягає у подаванні води і стисненого повітря зворотним струмом – знизу нагору. Подача повітря потрібна для розпушення зерен фільтруючого матеріалу й кращого відмивання їх від забруднень.

Напірні фільтри мають напрямок фільтрування зверху донизу, швидкість фільтрування 5–12 м/год, а тривалість фільтроциклу 12–48 год залежно від якості стічних вод. Залишковий вміст у воді нафтопродуктів допускається 7–20 мг/л (початковий вміст 40–80 мг/л), механічних домішок – 10–20 мг/л (початковий вміст 30–60 мг/л).

Напірні фільтри з двома та трьома камерами, що практично становлять два або три фільтри, розташовані один над одним, дозволяють підвищити у 2–3 рази продуктивність очищення води без збільшення діаметра фільтра.

Конструкції дво- і трикамерних освітлювальних фільтрів складаються із таких самих основних елементів. Відрізняються тим, що корпуси цих фільтрів за висотою поділені глухими плоскими перегородками, і кожна камера має верхній та нижній розподільчий пристрій.

У практиці водопостачання використовуються спеціальні сорбційні фільтри, які призначені для затримання органічних домішок, для зменшення інтенсивності присмаків і запахів. Принцип їхньої роботи такий самий, як у швидких фільтрів.

Сорбційне очищення води можна здійснювати за допомогою сорбентів природного або штучного походження. Природні сорбенти зазвичай представлені глинистими породами, цеолітом та іншими породами. Природні сорбенти найчастіше використовуються для знебарвлення води, видалення неорганічних домішок та особливо токсичних хлорорганічних речовин, проте мають великий коефіцієнт неоднорідності, за певних умов можуть забезпечити великий опір за наявності дрібних фракцій. Найчастіше використовуються у практиці водоочищення штучні сорбенти – активоване вугілля. Водночас використовуються порошкове та гранульоване вугілля.

## 2.4 Хімічна обробка води. Реагентне пом'якшення води

На хімічну обробку повинна надходити вода, попередньо очищена від колоїдних та завислих речовин, органічних домішок, зокрема від кольоровості, в окремих випадках – знезаражена.

Недостатня попередня обробка води значно підвищує навантаження на споруди хімічної обробки та збільшує собівартість очистки, а в окремих випадках навіть знижує якість хімічно обробленої води. Проте частково функції споруд хімічної обробки води можуть покладатися на споруди попередньої підготовки. На додаток живильна вода повинна пройти корекційну (стабілізаційну) обробку.

Отже, існує два етапи підготовки води: попередній і кінцевий (хімічний). На першому (попередньому) етапі підготовки води здійснюються такі процеси:

- прояснення – зменшення каламутності, видалення колоїдних і завислих частинок;
- знебарвлення – зменшення кольоровості;
- дезодорація – зменшення інтенсивності запаху і присмаку;
- знезараження – знищення бактерій і вірусів, які містяться у воді;
- знезалізнення – зменшення концентрації заліза (може також належати до другого етапу очищення).

На кінцевому етапі хімічної обробки води використовують:

- пом'якшення – видалення з води солей кальцію і магнію ( $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ ), що зумовлюють твердість;
- знесолення – видалення з води розчинених солей;
- знекремнювання (видалення із води кремнієвої кислоти та її солей);
- дегазація – видалення з води газів, насамперед кисню і вільної вуглекислоти;
- стабілізаційна обробка води (хімічна обробка з метою зменшення корозійних властивостей води і запобігання випадінню солей).

**Реагентний метод** забезпечує часткове зменшення лужності (декарбонізацію) води, твердості, сухого залишку, вмісту кремнієвої кислоти. Залежно від типу реагентів та їх дози буде забезпечуватись певний ступінь її ефективності очищення.

Загалом, за реагентним методом передбачається введення реагентів у воду, перетворення розчинених солей у нерозчинені, затримання їх осадженням і фільтруванням у шарі зернистої засипки.

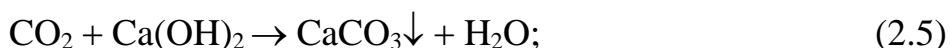
Реагентний метод полягає у зв'язуванні іонів кальцію і магнію хімічними речовинами у малорозчинні та осідаючі сполуки (карбонат кальцію і гідроксид

магнію). Залежно від використаної хімічної речовини може бути вапняний, вапняно-содовий, їдконатрієвий, фосфатний метод пом'якшення води.

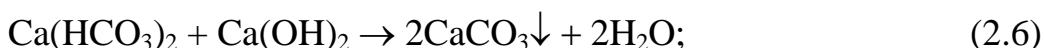
Вапнування води, як і коагуляція, є реагентним осаджувальним методом попередньої обробки води. Під час вапнування у воду додають у вигляді розчину гашене вапно  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , яке зв'язує вільний вуглекислий газ і катіони, що видаляються з води у важкорозчинні сполуки.

Основним призначенням вапнування є видалення з води зв'язаної чи вільної вуглекислоти, зменшення лужності та сухого залишку з одночасним її пом'якшенням. Під час вапнування, поєднаного з коагуляцією, досягається знезалізнення та часткове знекремнювання (на 30–40 %). Для більш повного видалення кремнію ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) (до 0,8–1,5 мг/л) разом з вапном дозується оксид магнію ( $\text{MgO}$ ). Під час вапнування води (додавання  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) відбуваються такі процеси:

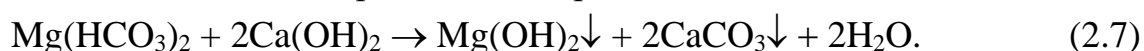
а) видалення вільної вуглекислоти



б) видалення кальцієвої карбонатної твердості



в) видалення магнієвої карбонатної твердості



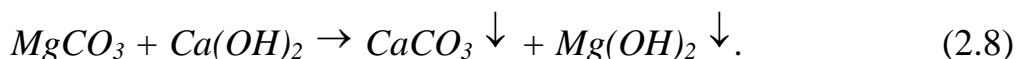
Реагентне пом'якшення води здійснюють як без її підігрівання, так і з підігріванням. Пом'якшення води вапнуванням (декарбонізація) застосовується у разі високої карбонатної і низької некарбонатної твердості, а також, якщо не потрібно видаляти з води солі некарбонатної твердості.

Також застосовується вапняно-содовий метод, у разі якого з води видаляється основна маса солей тимчасової (карбонатної) та постійної (некарбонатної) твердості.

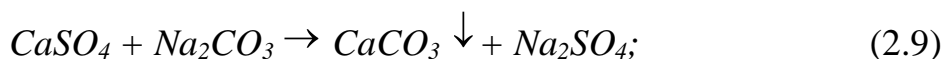
Сутність вапняково-содового методу пом'якшення води зводиться до декількох процесів.

Гашене вапно реагує з розчиненим у воді вуглекислим газом, а також вступає у реакцію з гідрокарбонатами кальцію і магнію.

У разі надлишку вапна карбонат магнію взаємодіє з ним із утворенням гідроксиду магнію, що випадає в осад



Видалення солей некарбонатної твердості відбувається так:



Потім  $MgCO_3$  реагує з  $Ca(OH)_2$  із утворенням  $Mg(OH)_2$ .

Контроль за процесом реагентного пом'якшення здійснюють за величиною гідратної лужності. У разі осадження  $Ca^{2+}$  лужність  $L = 0,1-0,2$  мг-екв/дм<sup>3</sup> і у разі осадження  $Ca^{2+}$  та  $Mg^{2+}$   $L = 0,3-0,5$  мг-екв/дм<sup>3</sup>. Содово-вапняний метод ефективний за підвищеної температури. У результаті застосування цього методу отримують воду із залишковою жорсткістю від 0,1 мг-екв/дм<sup>3</sup> до 0,3 мг-екв/дм<sup>3</sup>, вміст кремнієвої кислоти зменшується до 2 мг/л.

За допомогою реагентного методу з води видаляється основна маса солей тимчасової та постійної твердості. Однак повністю усунути твердість цим методом не вдається через певну розчинність  $CaCO_3$  і  $Mg(OH)_2$ , тому його застосовують лише для відносно неглибокого пом'якшення (до 1,4–1,8 мг-екв/л). Під час підігрівання і введення певного надлишку реагентів (10–20 %) кінцева твердість може бути зменшена до 0,35–1 мг-екв/л.

Реагентне пом'якшення води здійснюється на установках, до складу яких входять реагентне господарство, змішувач або вихровий реактор, освітлювач із завислим осадом або відстійники із камерами утворення пластівців, швидкі (освітлювальні) фільтри, пристрої для стабілізаційної обробки пом'якшеної води.

У технологічному процесі повинні бути створені умови для кристалізації речовин, які випадають в осад. Саме тому до схеми додається реактор (спірактор) із зернистою контактною масою. На зернах відкладається  $CaCO_3$  і розміри зерен збільшуються до 1,5–2 мм, зерна осідають у нижній частині конусу та виводяться. Реактори можуть бути напірні та самопливні.

Ефективним для пом'якшення води вапняним або вапняно-содовим методом є вихровий реактор (спірактор напірний або відкритий). Вихровий реактор є залізобетонним або сталевим корпусом, звуженим до низу (кут конусності 15–20°) і наповнений приблизно до половини висоти контактною масою. Як контактну масу застосовують пісок або мармурову крихту з розміром зерен 0,2–0,3 мм, з розрахунку 10 кг на 1 м<sup>3</sup> об'єму реактора. Швидкість руху води у нижній вузькій частині вихрового реактора дорівнює 0,8–1 м/с; швидкість висхідного потоку у верхній частині на рівні водовідвідних пристроїв – 4–6 мм/с. Тривалість перебування води у вихровому реакторі становить 5–15 хв. Коли діаметр кульок збільшується до 1,2 мм, крупну, найбільш важку контактну масу випускають з нижньої частини реактора і завантажують свіжу.

У технологічних схемах реагентного пом'якшення води з освітлювачами замість вихрових реакторів застосовують вертикальні змішувачі.

В освітлювачах необхідно підтримувати постійну температуру, не допускаючи коливань більше 1 °С протягом години, оскільки виникають конвекційні струми, змучування осаду та його винесення. Подібну технологію застосовують для пом'якшення каламутних вод, що містять велику кількість солей магнію. У такому випадку змішувачі завантажують контактною масою.

У разі вапняного або вапняно-содового пом'якшення вихідну воду подають у вихровий реактор, у нижню частину якого вводять реагенти. Вихровий реактор завантажують кварцовим піском або мармуровою крихтою крупністю 0,1–0,3 мм, які відіграють роль контактної маси. Карбонат кальцію відкладається на зернах контактної маси, яку періодично видаляють.

Воду подають до реактору в нижній частині по дотичній зі швидкістю 0,8–1 м/с і, піднімаючись угору, вона підтримує контактну масу в завислому стані. Для видалення суспензії використовуються освітлювачі із завислим осадом зі швидкістю руху води 1,3–1,6 мм/с.

Кількість завислих речовин на виході із освітлювача повинна бути не більше 15 мг/л. Швидкість фільтрування на фільтрах обирається до 6 м/год із крупністю зерен 0,5–1,25 мм та із товщиною шару засипки 0,8–1 м.

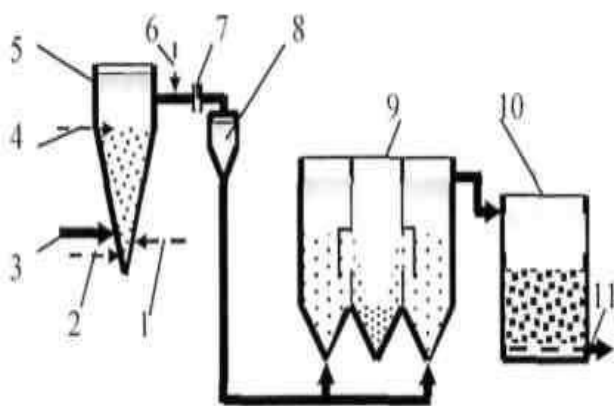


Рисунок 2.6 – Схема вапняно-содового пом'якшення води:

- 1 – введення вапна; 2 – введення соди;
- 3 – подача вихідної води; 4 – подача контактної маси;
- 5 – вихровий реактор; 6 – введення коагулянту;
- 7 – шайбовий змішувач;
- 8 – повітровідділювач;
- 9 – освітлювач з завислим осадом;
- 10 – фільтр; 11 – відведення води

Утворення осаду в процесі пом'якшення води реагентними методами відбувається у дві стадії.

Перша стадія – процес утворення малорозчинних сполук  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  відбувається практично миттєво.

Друга стадія – процес кристалізації утворених осадів і агломерація їх у пластівці – значно триваліша за часом. Загальний час пом'якшення визначається інтенсивністю перебігу другої стадії.

Конструкція промислових освітлювачів передбачає здійснення двох описаних процесів. Для першого процесу необхідно інтенсивне перемішування,

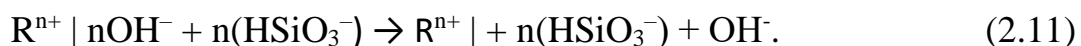
для другого – створення зон руху оброблюваної води зі швидкістю меншою, ніж швидкість вільного осадження пластівців.

Згідно із нормами технологічного проектування ТЕС рекомендують встановлювати для попередньої очистки не менше двох освітлювачів, сумарну продуктивність яких вибирають із запасом 10 % від розрахункової кількості освітленої води.

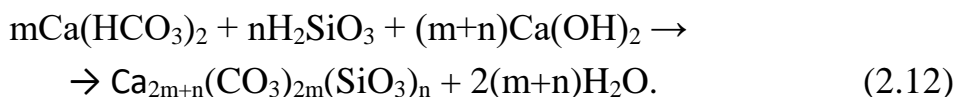
## 2.5 Знекремнювання води магnezіальними реагентами

Для знекремнювання води як реагент зазвичай застосовується каустичний магнезит  $MgO$ , що є продуктом випалу магнезиту  $MgCO_3$  за температури  $750\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ . Каустичний магнезит може дозуватися у вигляді порошку (сухе дозування), який потім за допомогою водяного ежектора прямує до освітлювача. Одночасно із магnezіальним знекремнюванням води проводиться і вапнування з метою зменшення лужності пом'якшеної води та створення оптимальної величини рН. Окис магнію, доданий до оброблюваної води як каустичний магнезит, частково чи повністю підлягає гідратації, утворюючи асоціацію складних молекул типу  $(MgO)_p [Mg(OH)_2]_q$ . Молекули  $Mg(OH)_2$  частково підлягають дисоціації, і частина гідроксид-іонів перетворюється на розчин. Під час цього утворюється складна позитивно заряджена міцела, оточена іонами  $OH^-$ . Ступінь дисоціації  $Mg(OH)_2$  та міцність зв'язку іонів із позитивно зарядженими міцелами визначаються значенням рН середовища.

Гідросилікат-іони  $HSiO_3^-$  вступають в аніонний обмін із гідроксид-іонами, що відщеплюються від складної молекули знекремлюючого реагенту



Під час цього утворюється хімічна сполука, менш розчинна у воді, ніж вихідні силікати, внаслідок чого вони виводяться із розчину. Часткове видалення з розчину кремнієвої кислоти під час вапнування та виділення  $CaCO_3$  можна уявити як явище співосадження



Ефективність магnezіального знекремнювання води залежить від якості знекремлюючого реагенту та його питомих доз (у міліграмах) на 1 мг  $SiO_3$ , тривалості контакту води, що обробляється, із завислим осадом, складу і властивостей осаду, температури оброблюваної води і режиму вапнування та коагуляції.

## 2.6 Обробка води методом іонного обміну

Технології іонного обміну застосовуються для більш глибокого пом'якшення води, оскільки реагентним методом можна зменшити загальну твердість води тільки до 0,4–0,8 мг-екв/л. У результаті іонообмінної технології видаляється та частина солей, що залишилися у воді, а також, якщо потрібно з води виділити аніони (хлориди, сульфати тощо).

Іонний обмін є процесом взаємодії розчину з твердою фазою (іонітом), здатною обмінювати іони, які містяться у ній, на еквівалентну кількість інших іонів, що містяться у вихідній воді та мають заряд того ж знаку.

Обробка води методом іонного обміну заснована на здатності деяких нерозчинних у воді речовин, які називаються іонообмінними матеріалами або іонітами, змінювати іонний склад води. Для цього оброблювана вода пропускається через фільтри. Просочуючись через зерна іоніту, вода обмінює частину іонів розчинених у ній електролітів на еквівалентну кількість іонів іоніту, у результаті цього змінюється іонний склад як води, що фільтрується, так і самого іоніту.

Обробка води методом іонного обміну принципово відрізняється від обробки води методами осадження тим, що домішки, які видаляються з неї, не утворюють осаду, і тим, що така обробка не вимагає безперервного дозування реагентів. У зв'язку з цим експлуатація водопідготовчих установок, що працюють за методом іонного обміну, значно простіша, габарити апаратів менші, а ефект обробки вищий, ніж установок, що працюють за методом осадження.

Основною сферою використання технології іонообмінного обміну є водопідготовка (пом'якшення і демінералізація води) та очищення стічних вод промислових підприємств. Найбільші споживачі такої води – електроенергетика, виробництво напоїв, виробництво напівпровідників, фармацевтичні виробництва.

Як іоніти використовуються сульфовугілля та синтетичні смоли. Відмінною рисою синтетичних смол є розміри та структура їхніх молекул, що складаються із тисяч, а іноді десятків тисяч міцно пов'язаних атомів. Речовини, що складаються з таких молекул-гігантів, отримали назву високомолекулярних речовин. Іоніти, що належать до високомолекулярних речовин, характеризуються такими специфічними властивостями: набухання, нерозчинність у воді та здатність до реакцій іонного обміну.

Із катіонітів найбільш широко застосовуються сульфовугілля, а також катіоніт марки КУ-2, що є синтетичною смолою і має більш високу обмінну

ємність, ніж сульфовугілля, більш високу хімічну стійкість до кислот, лугів, органічних розчинників.

Ключовими особливостями іонообмінних процесів є:

1. Стехіометричність. Обмін протиіонів на іони того ж заряду, що перебувають у розчині, відбувається строго відповідно до принципу еквівалентності.

2. Зворотність. Іонообмінні реакції відбуваються до стану рівноваги, після досягнення якого іонна форма іонообмінної смоли може бути відрегенована, тобто переведена у вихідну.

3. Багатостадійність. Стадії іонного обміну такі:

- перенесення іонів розчину до поверхні гранули іоніту;
- дифузія іонів всередині гранули;
- здійснення реакції іонного обміну;
- дифузія протиіону, який витісняється із гранули, зсередини до поверхні гранули;
- перенесення протиіону від поверхні гранули іоніту в об'єм розчину.

За знаком заряду іонів, якими обмінюються, іоніти поділяють на катіоніти та аніоніти.

Залежно від характеру активних функціональних груп іоніту його рухливі, здатні до обміну іони можуть мати або позитивні заряди, і тоді такий іоніт називають катіонітом, або негативні заряди, і тоді такий іоніт називають аніонітом.

*Технологічні процеси під час обробки води методом іонообмінного обміну*

У технології водопідготовки для видалення певних іонів з води застосовують два процеси:

– **катіонування** – видалення катіонів: залежно від обмінного іона процеси отримали назву водень-катіонування (обмінний катіон  $H^+$ ) або Na-катіонування (обмінний катіон  $Na^+$ );

– **аніонування** – видалення з води аніонів: обмінними іонами під час аніонування є аніони  $OH^-$  та  $Cl^-$ .

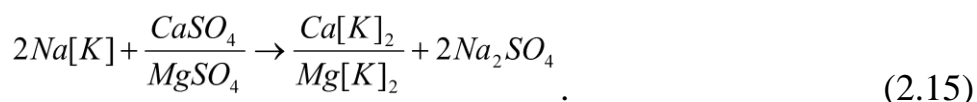
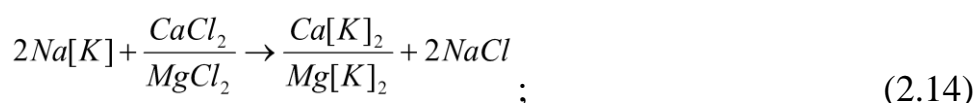
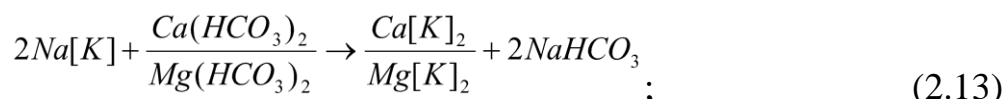
Отже, якщо в результаті обробки води методом іонного обміну відбувається обмін катіонів, такий процес називається катіонуванням; якщо відбувається обмін аніонів, то такий процес називається аніонуванням.

Процеси катіонування води мають самостійне застосування у схемах пом'якшення води. Аніонування застосовується лише у комплексі з катіонуванням у схемах знесолення води.

### Na-катіонування

Видалення з води катіонів шляхом Na-катіонування полягає у фільтруванні її через шар катіоніту, який містить у якості обмінних іонів катіони  $\text{Na}^+$ . Водночас катіоніт поглинає з води катіони  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$ , що обумовлюють твердість води, а натомість у воду із катіоніту переходять іони  $\text{Na}^+$ .

Під час обробки води на Na-катіонітових фільтрах іони кальцію і магнію поглинає іоніт, а у воду переходять іони натрію. Процес Na-катіонування описується такими реакціями:



Процес Na-катіонування може бути як одноступеневим, так і двоступеневим. Сутність цієї технології полягає в тому, що вода послідовно проходить через один або два ступені катіоніту, який містить у вигляді обмінних іонів катіони натрію.

Найбільш проста – це схема одноступеневого Na-катіонування.

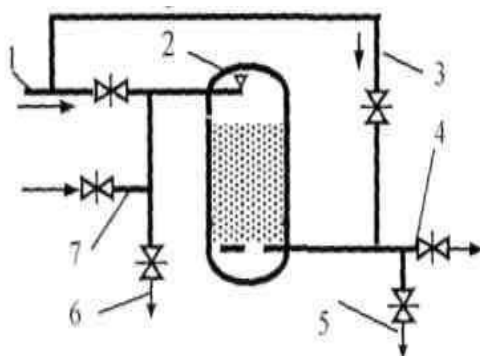


Рисунок 2.7 – Принципова схема Na-катіонітового пом'якшення води:

1 – подача вихідної води; 2 – катіонітний фільтр; 3 – подача розпушувальної води; 4 – відведення пом'якшеної води; 5 – відведення регенеруючого розчину; 6 – відведення води у каналізацію; 7 – подача регенеруючого розчину

Загальна твердість води зменшується у процесі одноступеневого Na-катіонування до 0,05–0,1 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Проте для багатьох котлів і насамперед для екранованих потрібен більш високий ступінь обробки води, тому використовують послідовне Na-катіонування на двох ступенях, яке забезпечує зменшення загальної твердості води до 0,01 мг-екв/л. На очищення повинна

поступати вода після попередньої очистки з каламутністю, не більшою за 5–8 мг/л, окисністю не більше 15 мг/л.

Однак схема одноступеневого Na-катіонування має певні недоліки, що обмежують її застосування: неможливість глибокого пом'якшення води (до 0,01–0,02 мг-екв/л), висока питома витрата солі на регенерацію, неповне використання ємності катіоніту.

Більш глибокого пом'якшення води, економії солі і збільшення фільтроциклу досягають двоступеневим Na-катіонуванням. У цьому випадку після Na-катіонітових фільтрів I ступеня остаточно твердість становить 0,1–0,2 мг-екв/л за звичайної швидкості фільтрування 15–25 м/год, після Na-катіонітових фільтрів II ступеня твердість води зменшується до 0,02–0,01 мг-екв/л.

Серед більшості різних іонообмінних процесів на ТЕС найбільш часто після попередньої очистки застосовують одноступеневе чи двоступеневе Na-катіонування для підготовки живильної води випарників-пароутворювачів і підживлення закритих теплових мереж.

Швидкість фільтрування залежно від твердості вихідної води для фільтрів I ступеня становить від 5 м/год до 25 м/год, а для II ступеня – до 60 м/год.

Основним недоліком процесу Na-катіонування є незмінність значення лужності води, тому цей процес може мати самостійне значення лише під час підготовки води для підживлення тепломережі та додаткової води для котлів низького та середнього тиску за порівняно низької лужності вихідної води. Другий недолік розглянутої технології визначається збільшенням масової концентрації катіонів, оскільки еквівалентна маса іона  $\text{Na}^+$  вище еквівалентних мас іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$ . Внаслідок цього солевміст фільтрату буде трохи вищий солевмісту води, що надходить на фільтр.

Для кількісної оцінки обмінної здатності катіоніту впроваджено поняття «обмінна ємність». Тобто кожен катіоніт має певну обмінну ємність, яка вимірюється кількістю катіонів, які катіоніт може обміняти протягом циклу фільтрування.

Розрізняють повну та робочу обмінні ємності катіоніту.

*Повна обмінна ємність* – це та кількість грам-еквівалентів катіонів, що затримує 1 м<sup>3</sup> катіоніту, що перебуває у робочому стані до моменту, коли твердість фільтрату співпадає із жорсткістю вихідної води.

*Робоча обмінна ємність* має менше значення – це та кількість грам-еквівалентів катіонів, що затримує 1 м<sup>3</sup> катіоніту до моменту проскоку у фільтрат катіонів.

Обмінна ємність, яка належить до всього об'єму катіоніту, завантаженого у фільтр, називається *ємністю поглинання фільтра*.

У процесі фільтрування іонообмінна смола Na-катіонітових фільтрів поступово насичується солями твердості, і через певний час фільтри необхідно регенерувати, тобто відновлювати їх іонообмінну здатність. Для відновлення катіонів натрію через фільтр пропускають розчин кухонної солі NaCl.

Отже, процес пом'якшення під час натрій-катіонування закінчується із настанням проскоку твердості. Для відновлення обмінних властивостей катіоніту використовують кухонну сіль у вигляді розчину 6–10 % концентрації NaCl. Внаслідок відносно великої концентрації іонів натрію у регенераційному розчині відбувається заміна поглинених раніше катіонів твердості. Водночас іони Ca і Mg, поглинені під час пом'якшення води, вимиваються і переходять у промивну воду, а Na відновлюється у катіонообмінному матеріалі (у разі використання Na-катіонування).

Під час цього протікають такі реакції:



Регенерацію іонообмінних фільтрів проводять зазвичай за протиточною схемою. Водночас оброблювана вода і регенераційний розчин рухаються у протилежних напрямках.

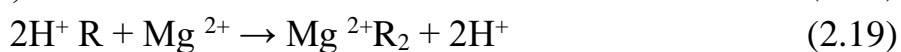
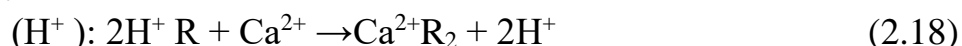
У результаті регенерації Na-катіонітових фільтрів утворюються стічні води, що містять кухонну сіль, а також солі кальцію і магнію (CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>). Хімічний склад стічних вод від регенерації Na-катіонітових фільтрів характеризується високим солевмістом і високою жорсткістю. Ці води складають основний об'єм хімічно забруднених стічних вод, що утворюються у процесі хімічної підготовки води.

#### *Водень-катіонування (H-катіонування)*

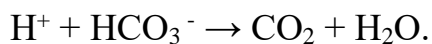
Обробка води методом H-катіонування призначена для видалення всіх катіонів з води із заміною їх на іони водню.

Вода на виході з фільтра має кислу реакцію.

Під час пропускання води через катіоніт у H-формі відбуваються реакції обміну всіх наявних у воді катіонів на катіон водню



Частина катіонів водню взаємодіє з наявним у воді бікарбонатним аніоном, утворюючи вуглекислоту та воду



Решта катіонів водню врівноважує аніони кислот, що залишилися у воді, з утворенням мінеральних кислот.

*H-катіонітові фільтри* подібні до *Na-катіонітових* за принципом роботи. Регенерація *H-катіоніту* проводиться 4–6-відсотковим розчином кислоти ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Для відновлення властивостей катіоніту під час *H-катіонування* з техніко-економічних причин використовують сірчану кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , з покроковим збільшенням концентрації, зазвичай 1–3–5 %. Регенерація соляною кислотою дозволяє досягти кращого відновлення обмінних властивостей, проте економічно це невигідно, оскільки потребує інших матеріалів дренажних систем.

У процесі *H-катіонування* води значно знижується рН фільтрату за рахунок кислот, що утворюються внаслідок процесу.

Видалення двоокису вуглецю, що виділяється під час реакцій пом'якшення, здійснюють у дегазаторах з кислототривкими керамічними насадками розміром 25 мм × 25 мм × 4 мм і щільністю зрошення 60 м<sup>3</sup>/год на метр квадратний площі дегазатора. Взагалі дегазатори – це колони, які завантажені певною насадкою, вода проходить крізь неї окремими дрібними потоками й одночасно продувається повітрям. Висота насадки обирається 3–5,7 м.

У разі потреби видалення тільки карбонатної твердості (лужності) води використовують технологію *H-катіонування* з «голодною» регенерацією, за якої витрата кислоти становить 1,05–1,1 г-екв/г-екв. Особливістю роботи катіонітів під час «голодної» регенерації є їхня здатність обмінювати катіони, пов'язані лише з бікарбонат-іонами, тобто руйнувати карбонатну твердість (лужність) води. Водночас катіони, пов'язані з аніонами сильних кислот, на катіон водню не обмінюються. Ефективне застосування цього методу можливе під час обробки сирової води зі співвідношенням бікарбонат-іону до іонів сильних кислот 3:1.

Відключення на регенерацію проводиться у разі підвищення твердості (лужності) води на 0,2–0,3 мг-екв/дм<sup>3</sup>.

### **Водень-натрій катіонування**

*H-Na-катіонування* використовують для зменшення твердості, загальної лужності і мінералізації води. *H-Na-катіонування* може бути послідовним (рис. 2.8) або паралельним (рис. 2.9). Спільне водень-натрій-катіонування

спочатку як водень-катионітове, потім після виснаження катионіту по водню – переходу у нейтральне середовище – передбачає роботу фільтра як натрій-катионітового до проскоку твердості.

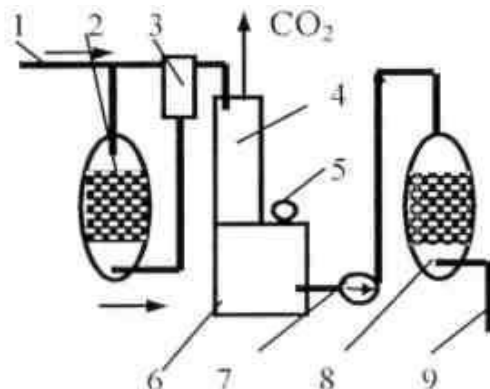


Рисунок 2.8 – Схема послідовного H-Na-катионування:

- 1 – подача вихідної води; 2 – H-катионітовий фільтр; 3 – змішувач;  
4 – декарбонізатор; 5 – вентилятор; 6 – бак; 7 – насос; 8 – Na-катионітовий  
фільтр; 9 – відведення обробленої води

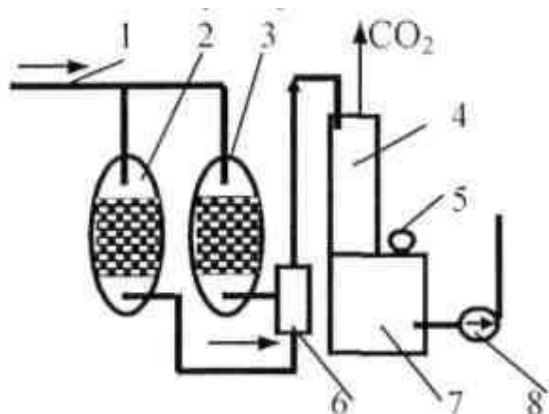


Рисунок 2.9 – Схема паралельного H-Na-катионування:

- 1 – подача вихідної води;  
2 – H-катионітові фільтри;  
3 – Na-катионітові фільтри;  
4 – декарбонізатор; 5 – вентилятор;  
6 – змішувач; 7 – бак; 8 – помпа

*H-Na*-катионування передбачає змішування двох потоків води – кислої після *H*-катионування і лужної після *Na*-катионування, після чого проходить реакція нейтралізації. Залишкову лужність після змішування обирають 0,3–0,4 мг-екв/л. Вільну вуглекислоту, що утворилася, видаляють у декарбонізаторі.

У разі паралельного *H-Na*-катионування частина вихідної води проходить *H*-катионітові фільтри, а частина – *Na*-катионітові фільтри.

За такою схемою можна отримати воду із загальною жорсткістю 0,1 мг-екв/л і залишковою лужністю 0,4 мг-екв/л.

Для підготовки води для підживлення закритої тепломережі найчастіше проводиться пом'якшення за схемою одно- або двоступеневого *Na*-катионування; може застосовуватися також паралельне *H-Na*-катионування, *Na*-катионування з підкисленням та подальшою декарбонізацією.

До переваг іонного обміну належать:

- можливість автоматизації;
- надійність роботи у разі різного солевмісту вихідної води;
- поширеність та хороша вивченість методу;
- високий ступінь знесолення очищеної води.

Основні недоліки методу іонообмінного знесолення:

- високі питомі витрати реагентів на регенерацію (зазвичай перевищують стехіометричні у 1,5–3,0 рази);
- утворення значної кількості високомінералізованих стічних вод.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке коагуляція? Для чого вона використовується?
2. Які фактори, що впливають на процес коагуляції?
3. З яких основних етапів складається процес водопідготовки?
4. Основні технологічні процеси й споруди, що використовують під час підготовки води.
5. Від чого залежить вибір способу обробки води?
6. У чому полягає завдання попередньої очистки води.
7. Що розуміють під процесом фільтрування? Які фільтри існують?
8. Конструкція і принцип роботи безнапірних швидких кварцових і пінополістирольних фільтрів, напірних фільтрів.
9. Що називається твердістю води, одиниці її вимірювання?
10. Яка існує твердість води і якими солями вона зумовлена?
11. Як класифікується вода за твердістю?
12. Які способи пом'якшення води існують і в чому полягає їх суть?
13. Яка різниця між катіонами та аніонами?
14. Що таке амфотерні іони?
15. Що таке селективність іонів?
16. Назвіть переваги та недоліки методу натрій-катіонування води.
17. Напишіть рівняння регенерації для натрій-катіонного фільтру.

## ЗМ 2 ОХОЛОДЖЕННЯ ВОДИ

### 3 ПРОЦЕС ОХОЛОДЖЕННЯ ВОДИ

#### 3.1 Системи охолодження промислових агрегатів

На промислових підприємствах основну кількість води витрачають для охолодження. Охолодження водою здійснюють з метою підтримки необхідної для нормальних умов технологічного процесу температури; для зниження температури продукції до необхідних меж і запобігання прогару і перегріву, за яких можлива втрата міцності елементів конструкцій, деталей обладнання металургійних агрегатів.

Процес охолодження – це відведення теплоти від стінки, що обігривається, та утримання її температури у заданих межах. Температура визначається технологічним процесом і стійкістю матеріалу охолоджувального елемента. Наприклад, у теплоенергетиці оптимальна температура охолоджувальної води  $t_{\text{опт}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , гранична температура  $t_{\text{гран.}} = 30\text{--}33 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Гранична температура різна для різних матеріалів: наприклад, для сталі –  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура, за якої втрачається стійкість сталі, становить  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , для чавуну відповідно –  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Нижче розглянуто основні види і системи охолодження, що застосовують.

#### *Охолодження рідини або газу у теплообмінних пристроях*

Для охолодження застосовують теплообмінні пристрої (теплообмінники) кожухотрубного або пластинчастого типу. Кожухотрубний теплообмінник – це охолоджувальний апарат, всередині кожуха якого проходить пучок паралельних трубочок. Процес охолодження полягає в тому, що охолоджувана рідина (вода, масло тощо) або газ, проходячи по теплообміннику, віддає своє тепло через стінки трубочок охолоджуючій воді, що проходить у них. Вода під час цього нагрівається. Іноді конструкцією теплообмінника передбачається пропуск охолоджуючої води через порожнину теплообмінника, а середовища, що охолоджують, – по трубках.

#### *Охолодження виробничих агрегатів і устаткування за допомогою трубчастих порожнистих холодильників*

У разі цього виду охолодження необхідно відводити тепло від деталей і конструкцій охолоджуваних елементів, для того щоб їх температура не підвищувалася вище певних меж, за яких відбувається різка втрата міцності охолоджуваних матеріалів. Наприклад, для звичайної низьковуглецевої сталі ця межа становить  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для сірого чавуну – межа  $375 \text{ }^\circ\text{C}$ . У цьому випадку

температура охолоджуючої води не відіграє істотної ролі, оскільки вона дуже мала порівняно з робочою температурою елементів, що охолоджуються. Витрату охолоджуючої води визначають за рівнянням теплового балансу.

*Системи охолодження* теплообмінної температури існують такі:

- 1) водяне охолодження холодною та гарячою водою;
- 2) випарне охолодження з пароутворенням всередині та поза конструкцією, що охолоджується;
- 3) охолодження висококиплячим теплоносієм.

***Водяні низькотемпературні системи охолодження.*** Температура охолоджуючого продукту знижується незначно (на 20–40 °С). Система може бути прямоточна або оборотна. Вода проходить через холодильники (теплообмінники), розташовані у конструкції, що охолоджується та відбирає тепло. Витрати води залежать від кількості тепла, що відводиться, величини температурного перепаду та якості води. Система проста, але вона не дозволяє використовувати тепло, а підвищення перепаду температури може призвести до відкладення солей твердості.

***Водяне охолодження гарячою водою (без кип'ятіння).*** Температура охолоджуючого продукту знижується від 120 °С до 80–90 °С. У цій схемі використовують хімічно очищену воду. Нагріта до 90–95 °С вода може використовуватись для гарячого водопостачання або для підігріву конденсату, теплофікації. Циркуляційний контур охолоджуючої води роблять замкненим. Втрати води у системі поповнюють хімічно очищеною водою.

Перевагами системи охолодження гарячою водою є можливість використання тепла охолоджуючої води. Крім того, виключається можливість прогару холодильників, тому що не утворюється накип внаслідок використання пом'якшеної води. Недоліки системи: складність комунікацій і залежність від споживача тепла.

***Випарне охолодження (охолодження водою, що кипить).*** Вперше систему випарного охолодження було впроваджено на мартенівських печах Донецького металургійного заводу. Робота відзначена Державною премією першого ступеня і є реалізацією вітчизняного винаходу (автори Андоньєв С. М., Крушель Г. Є.), який широко застосовують у наші часи.

У системах випарного охолодження холодну охолоджуючу воду замінено киплячою, коефіцієнт теплопередачі якої значно вищий. Охолодження відбувається внаслідок відводу пари. Тепло, яке відбирається охолоджуючою водою, витрачається на випаровування цієї води. Установка працює на хімічно

очищеній воді. Таку систему застосовують, якщо температура води не впливає на технологічний процес, тобто для збільшення стійкості деталей під час їхньої роботи в зоні високих температур (металургійні печі, печі будівельної індустрії тощо).

**Системи охолодження з пароутворенням всередині деталі.** У таких системах випарного охолодження (рис. 3.1) охолоджувані деталі приєднані двома трубами до бака-сепаратора.

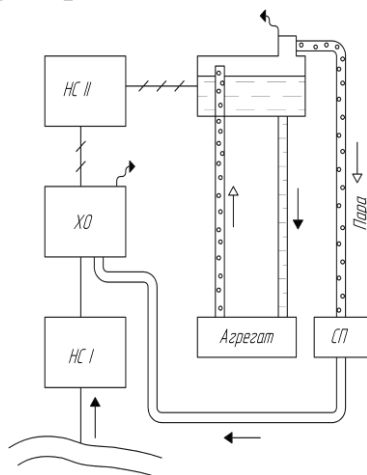


Рисунок 3.1 – Схема випарного охолодження металургійних печей з природною циркуляцією:

ХО – станція хімічного очищення; СП – споживач пари; БС – бак-сепаратор

По опускній трубі бака-сепаратора підводиться до деталі вода, а пароводяна суміш, що утворилася, по підійомній трубі відводиться у бак-сепаратор, де пара відокремлюється від води і відводиться по паропроводу. Пара виходить низького тиску. Вода у системі циркулює безперервно. Водночас застосовують як природну циркуляцію, так і штучну. У системі із примусовою циркуляцією між баком-сепаратором і агрегатом встановлюють циркуляційний насос.

Природна циркуляція заснована на різниці щільності води і пароповітряної суміші в опускній і підійомній трубах. Водночас досягається саморегулювання процесу охолодження. Збільшення температури агрегату призводить до збільшення вмісту пари у пароводяній суміші і зменшення щільності її у підійомній трубі, внаслідок чого кратність циркуляції води зростає і температура агрегату стабілізується.

Вода, що відводиться у вигляді пари, поповнюється хімічно очищеною водою, яка подається у бак-сепаратор. Під час використання пари і поворотного конденсату втрати води становлять не більше 15 % від звичайних втрат у разі водяного охолодження.

Переваги випарного охолодження:

- збільшується термін служби охолоджуваних деталей, виключаються ремонти через прогар деталей, оскільки використовується хімічно очищена вода;
- немає охолоджувальних пристроїв (градирень, ставок-охолоджувачів, бризкальних басейнів), водоводів великих діаметрів, потужних pomp;
- тепло охолоджуючої води можна використовувати без зміни умов експлуатації системи, оскільки система не залежить від споживачів тепла (за необхідності можна видаляти надлишки пари в атмосферу);
- зменшуються капіталовкладення і спрощується експлуатація системи через зменшення витрати води на охолодження.

**Системи охолодження з пароутворенням поза деталлю.** Різновидом схеми випарного охолодження, наведеної на рисунку 3.1, є схема (рис. 3.2) з пароутворенням поза деталлю.

У системах охолодження з пароутворенням поза деталлю охолоджуючим агентом може бути вода або висококиплячі теплоносії. В охолоджуваних деталях пара не утворюється, тому можна застосовувати конструкції звичайного водяного охолодження. Сутність замкненої системи водяного охолодження з винесеним випаровувачем полягає в тому, що тиск води в охолоджуваній деталі вищий, ніж у баку-сепараторі, тому в деталі не утворюється пара, закипання відбувається у баку-сепараторі.

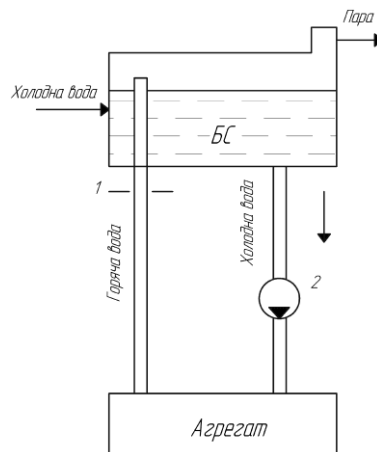


Рисунок 3.2 – Схема випарного охолодження з пароутворенням поза деталлю:  
БС – бак сепаратор; 1 – діафрагма; 2 – циркуляційна помпа

Система працює з примусовою циркуляцією, вона складна в експлуатації і виготовленні.

### **Системи охолодження висококиплячим теплоносієм (ВТ)**

застосовують, коли немає необхідності дуже знижувати температуру нагрітої деталі. Охолоджуючі деталі охолоджуються циркулюючим ВТ, а сам ВТ охолоджується шляхом випаровувального охолодження водою, тобто в цій схемі є два охолоджуючих контури (рис. 3.3). Як ВТ для охолодження деталей використовують спеціальні масла, ртуть, розчини висококиплячих мінеральних або органічних солей, тобто теплоносії, що мають високу температуру кипіння. Внаслідок цього охолодження деталей відбувається за невеликого тиску і високої температури теплоносія, тепло якого використовується у теплообміннику бака-сепаратора для отримання пари високого тиску. Система може працювати як із примусовою, так і з природною циркуляцією.

Двоконтурна схема охолодження із застосуванням ВТ складається з контуру циркуляції агента для охолодження деталей печі і системи охолодження ВТ. Теплоносій, що нагрівається деталлю до 200–250 °С, охолоджується водою у трубчастому теплообміннику, у якому за цієї температури виходить пара високого тиску.

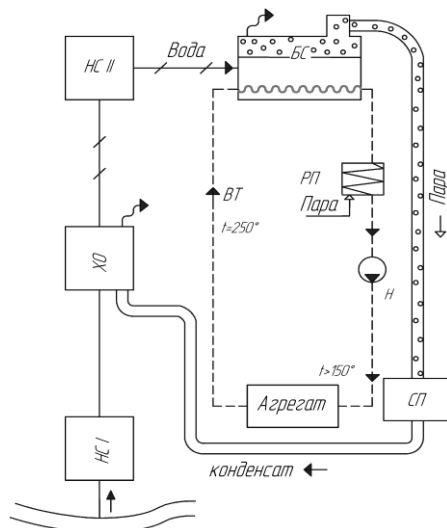


Рисунок 3.3 – Система охолодження металургійних печей з висококиплячим теплоносієм (ВТ):

ХО – станція хімічно-водоочистки;

СП – споживач пари; РП – резервний підігрівач;

ВТ – висококиплячий теплоносій

Істотним недоліком систем випарного охолодження із застосуванням ВТ є застигання агента за низьких температур, що ускладнює експлуатацію в зимовий період. Тому у контур циркуляції теплоносія вмонтовують резервний підігрівач ВТ, який забезпечує підігрів теплоносія у разі падіння його температури нижче за 50 °С.

Основні технологічні й економічні вимоги до систем охолодження можна сформулювати таким чином:

1. Втрати тепла з охолоджуючою водою повинні бути мінімальними.
2. Витрати енергії на експлуатацію систем охолодження повинні бути мінімальними, а тепло, що відводиться від охолоджуваних деталей, повинне використовуватися за економічно вигідною схемою.
3. Капіталовкладення з комплексу охолоджуючої системи повинні бути мінімальними, а енергетичне господарство – найбільш простим.

### **3.2 Споруди для охолодження води**

У разі оборотного водопостачання промислового об'єкта охолоджувальний пристрій (охолоджувач) повинен забезпечити охолодження циркуляційної води до температур, що відповідають оптимальним техніко-економічним показникам роботи об'єкта.

Зниження температури води в охолоджувачах здійснюється у результаті віддачі її тепла повітрю. Ефективність процесу охолодження залежить від температури повітря, його вологості, швидкості руху повітря та поверхні зіткнення охолоджуваної води з повітрям.

*За способом передачі тепла охолоджувачі* поділяють на:

- випарні (відкриті), в яких охолодження води відбувається за рахунок випаровування у разі безпосереднього контакту з повітрям (випаровування 1 % води знижує температуру на 6 °С);
- радіаторні (поверхневі), у яких теплопередача здійснюється за рахунок передачі тепла води до трубок радіатора, а від них – до повітря, тобто немає безпосереднього контакту з повітрям.

*За способом підводу повітря охолоджувачі* поділяють на: відкриті; баштові; вентиляторні.

До відкритих охолоджувачів належать водосховища-охолоджувачі, бризкальні басейни, відкриті градирні, у яких рух повітря забезпечується вітром або природною конвекцією. Баштові й вентиляторні охолоджувачі називаються градирнями. У баштових градирнях рух повітря забезпечується природною тягою, яка утворюється високою витяжною баштою. Вентиляторні градирні можуть бути обладнані нагнітальним чи всмоктувальним вентилятором, що забезпечує інтенсивний рух повітря.

Необхідна площа контакту у бризкальних охолоджувачах створюється розбрикуванням води через спеціальні сопла або насадки. У краплинних, плівкових та комбінованих охолоджувачах необхідна площа контакту

створюється шляхом розподілення води над спеціальними зрошуючими пристроями, які забезпечують подрібнення краплин до необхідних розмірів або створення тонких плівок для ефективного охолодження нагрітої води.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика водяних охолоджувачів

Охолоджувачі	Максимальне питоме теплове навантаження, тис. ккал/(м <sup>2</sup> ·год)	Рекомендова- ний перепад температур води, °С	Мінімальна різниця температур охолодженої води і повітря за змоченим термометром, °С
Водосховища- охолоджувачі	0,2–0,4	5–10	10–20
Бризкальні басейни	7–15	5–10	10–12
Баштові градирні	60–80	5–12	8–10
Вентиляторні градирні	80–100	3–20	4–5

Кількісними характеристиками охолоджувача вважаються гідравлічне та теплове навантаження.

Гідравлічне навантаження (щільність зрошення) показує кількість води (м<sup>3</sup>/год), яка необхідна для квадратного метра активної (робочої) площі охолоджувача у плані.

Теплове навантаження охолоджувача відображає кількість тепла, що віддає вода повітрю на квадратний метр охолоджувача.

Якісна сторона охолоджувача (охолоджуючий ефект) характеризується показниками:

1) перепадом температур або шириною зони охолодження – різницею між температурою води, що надходить до охолоджувача, і температурою охолодженої води

$$\Delta t = t_1 - t_2,$$

де  $t_1$  – температура гарячої води, °С;

$t_2$  – температура охолодженої води, °С;

2) висотою зони охолодження (ступенем наближення температури охолодженої води до теоретичної межі охолодження).

Під час проєктування градирень здійснюють теплотехнічні й аеродинамічні розрахунки. У разі прив'язування типових проєктів

аеродинамічні розрахунки не виконують. Теплотехнічними розрахунками визначають або необхідну площу охолоджувача із заданими витратами води і кінцевою температурою охолодженої води, що потребується, або кінцевою температурою охолодженої води для заданої площі охолоджувача і заданої витрати води. Теплотехнічні розрахунки здійснюються для конкретних метеорологічних умов, за емпіричними формулами та номограмами.

### 3.2.1 Водосховища-охолоджувачі

*Водосховища-охолоджувачі* (рис. 3.4, а) зазвичай влаштовуються на водотоках, потужність яких невелика та не дозволяє здійснювати охолодження обладнання по прямоточній системі. У цьому випадку на водотоку влаштовується гребля, завдяки чому піднімається рівень води у водотоці та створюється водосховище з площею дзеркала води, що забезпечує охолодження необхідної кількості води.

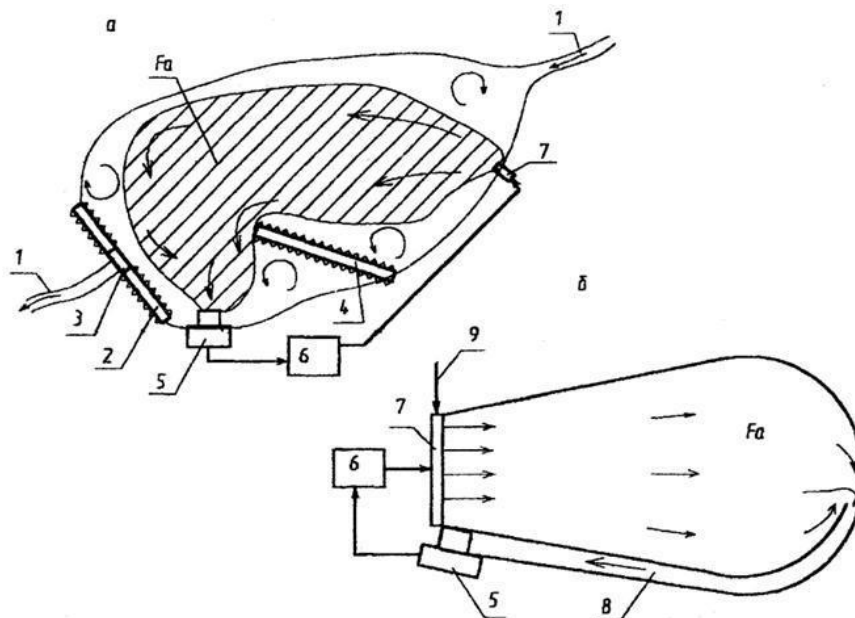


Рисунок 3.4 – Схема водосховища та ставка-охолоджувача:

а – водосховище-охолоджувач; б – ставок-охолоджувач;

1 – водотік; 2 – гребля; 3 – водопропускні отвори; 4 – струмененапрямна дамба; 5 – водозабір із насосною станцією; 6 – виробничий водоспоживач;

7 – випуск відпрацьованої води; 8 – канал охолодженої води; 9 – подача

води на заповнення та підживлення;  $F_a$  – площа активної зони

Для організації руху циркуляційного потоку води від випуску до водозабору та створення необхідної площі активної зони  $F_a$  часто влаштовуються струмененапрявні дамби. Заповнення водою та подальше підживлення водосховища здійснюються водою з водотоку. Крім охолодження

води оборотної системи, водосховища можуть одночасно використовуватися для інших цілей, таких як рибництво, відпочинок тощо.

*Активна зона* – частина водосховища (без застійних зон), яка бере участь у охолодженні оборотної води.

*Ставки-охолоджувачі* (рис. 3.4, б) – зазвичай повністю штучні споруди, створювані поза водотоками. Схема ставка-охолоджувача відпрацьовується на гідравлічній моделі, та створюється конфігурація, у якій циркуляційний потік води охоплює всю площу ставка, тобто вся площа ставка є активною зоною, що бере участь у охолодженні води.

Заповнення ставка та його підживлення здійснюються із зовнішнього джерела водопостачання. Проектування водосховищ та ставків-охолоджувачів здійснюють за нормами проектування гідротехнічних споруд.

Орієнтовна площа активної зони водосховищ і ставків-охолоджувачів може бути визначена з огляду на розрахунок 30–50 м<sup>2</sup> на кожний 1 м<sup>3</sup>/год циркуляційної води у разі охолодження на 8–10 °С. Температура охолодженої води для конкретних кліматичних умов визначається тепловим розрахунком.

Водосховища та ставки-охолоджувачі найчастіше застосовуються для охолодження незабрудненої води в оборотних системах великої продуктивності (теплових електростанціях тощо). Є приклади використання цих споруд для охолодження забрудненої води (металургійна промисловість). Водночас здійснюється охолодження та освітлення циркуляційної води, тому в таких спорудах повинна бути передбачена можливість періодичного очищення від забруднень, що накопичилися.

Водосховища та ставки-охолоджувачі вимагають великих площ та значних капітальних витрат на їх спорудження. Однак вони прості в експлуатації та мало енерговитратні, тому що не потрібне створення великих напорів на транспортування води.

Під час використання для охолодження оборотної води глибоких водосховищ-охолоджувачів, у яких під дією теплового скиду, сонячної радіації та інших факторів формується щільне розшарування (термічна стратифікація), на даний момент найбільш ефективною схемою експлуатації водойми є *об'ємна* схема. За цією схемою випуск нагрітої води здійснюється широким фронтом у верхній шар водойми, а забір здійснюється із нижнього шару за допомогою глибинного щілинного водозабору, який розташований з метою зменшення довжини комунікацій недалеко від водовипуску або поєднаний з ним (селективний водозабір) (рис. 3.5). Така схема сприяє формуванню щільнішого розшарування та забезпечує забір більш холодної води (на 2–3 °С) порівняно із

забором із верхнього шару.

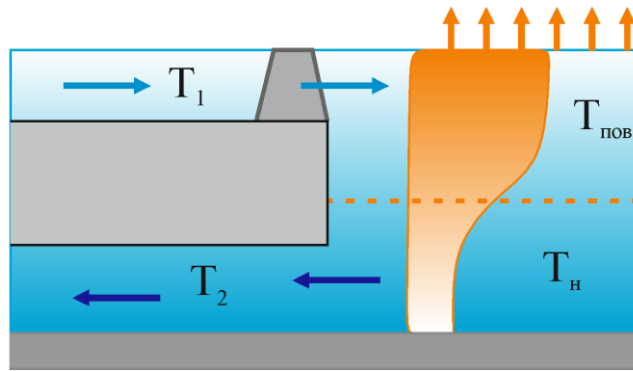


Рисунок 3.5 – Схема селективного водозабору

Наявність термоклину (ділянки різкої зміни температури води) різко уповільнює процеси теплоперенесення між верхнім та нижнім шарами водосховища та перешкоджає перемішуванню теплої та охолодженої води у ближньому полі водосховища.

На рисунку 3.6 подано схему зміни за глибиною, площею та часом термічної структури дальнього поля водосховища-охолоджувача з глибинним водозабіром.

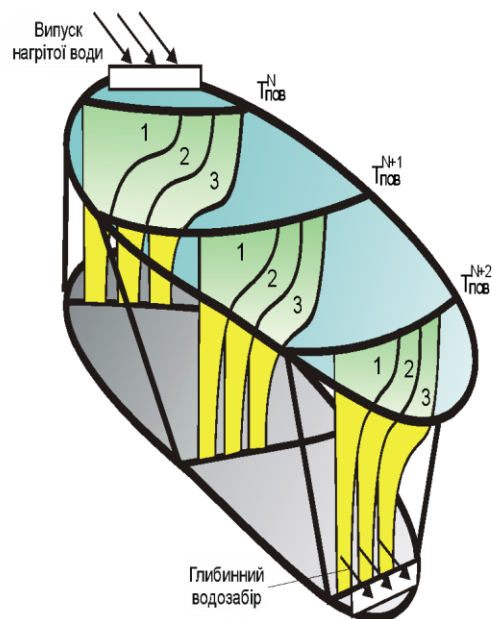


Рисунок 3.6 – Схема зміни термічної структури дальнього поля водосховища-охолоджувача із глибинним водозабіром:

1, 2, 3 – температурний вертикальний профіль, що змінюється у часі ( $t_1 < t_2 < t_3$ )

Падіння поверхневої температури  $T_{пов}$  пов'язане із теплообміном верхнього шару водосховища з атмосферою. Збільшення товщини верхнього шару обумовлено спрацьовуванням нижнього шару в результаті відбору з нього циркуляційної витрати, а також турбулентною дифузією тепла вглиб водойми.

Розрахунок водосховища-охолоджувача із забором води з верхнього шару проводиться для метеорологічних умов найбільш несприятливої для охолодження води декади.

Влаштування глибинного водозабору дозволяє забирати більш холодну воду з нижнього шару протягом часу, необхідного для спрацьовування цього нижнього шару. Цей час визначається швидкістю конвективного та дифузійного перенесення тепла у напрямку глибини, а також величиною  $\otimes h = h_{\text{н}} - h_{\text{п}}$  (рис. 3.7).

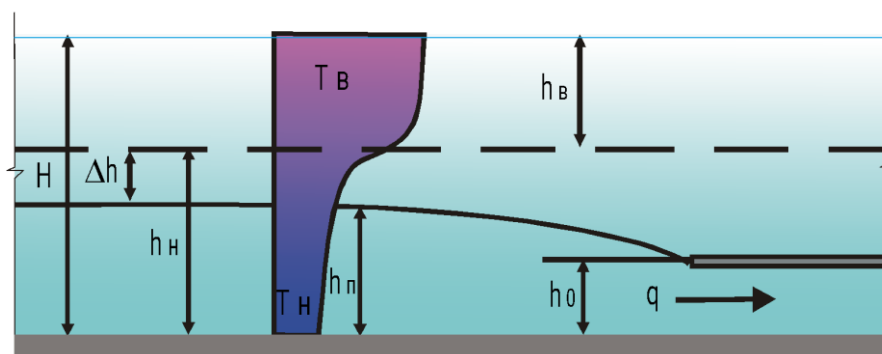


Рисунок 3.7 – Схема глибинного водозабору зі стратифікованого водоймища:

$h_{\text{н}}$  – товщина нижнього шару,  $h_{\text{в}}$  – товщина верхнього шару,  
 $h_0$  – висота водозабірної отвори;  $h_{\text{п}}$  – глибина живлення водозабору

*Глибина живлення водозабору* – це критична товщина нижнього шару, коли відбувається потрапляння у водозабір теплої води з верхнього шару.

Варіант використання стратифікованого водосховища-охолоджувача із глибинним водозбором має переваги перед варіантом забору води з верхнього шару, але не є найбільш раціональним.

Більш раціональною є комбінована схема використання глибокого водосховища-охолоджувача, за якої з нижнього шару проводиться забір тільки частини циркуляційної витрати (близько 30–40 %), а частина, що залишилася, забирається з верхнього шару, та змішана вода подається на охолодження конденсаторів.

За такою схемою температура охолоджуючої води буде збільшуватися порівняно із водою у об'ємній схемі на початку теплого періоду року і зменшуватися в середині. Оскільки залежність ККД турбін від температури охолоджуючої води нелінійна, то збільшення падіння ККД на початку теплого періоду незначне, тому що зміна температури охолоджуючої води відбувається у сфері невисоких температур (15–25 °С), а зменшення падіння ККД у середині теплого (несприятливого) періоду значне, тому що зміна температури охолоджуючої води відбувається у сфері високих температур (30–35 °С). Таким

чином, середнє значення ККД турбін протягом теплого періоду року за комбінованою схемою більше, ніж за об'ємною.

Також під час використання комбінованої схеми забору охолоджуючої води спрацьовування нижнього шару відбувається повільніше, ніж у 100-відсотковому глибинному водозаборі, оскільки у цьому випадку з нижнього шару забирається лише частина циркуляційної витрати. Це призводить до зменшення глибини живлення водозабору (рис. 3.7), а, отже, до збільшення об'єму холодної води, акумульованої у нижньому шарі.

Застосування комбінованої схеми дозволяє отримати більшу різницю температур води між верхнім та нижнім шарами. Отже, більше значення градієнта температури у зоні термоклину робить більш стійкою стратифікацію водойми, демпфується перемішування.

### **3.2.2 Бризкальні басейни**

Бризкальні басейни становлять відкриті резервуари, над поверхнею яких розбризкується вода. Резервуари можуть бути штучними або природними водоймами. Розбризкування води забезпечується системою розподільних труб для подачі води і сопел (рис. 3.8). Відстань між розподільчими трубами і між насадками (соплами), а також ширина коридорів повинні забезпечувати найкращі умови для розбризкування води. Факели від окремих насадок не повинні перетинатися.

Бризкальні басейни потребують незначних капітальних вкладень, прості в експлуатації, але мають невисокий охолоджуючий ефект і потребують спланованого майданчика. Зазвичай їх використовують в умовах, коли не потрібно постійно підтримувати низьку температуру.

Охолодження нагрітої води відбувається більш холодним повітрям у процесі падіння крапель води, що утворюються під час роботи розбризкувальних насадок. Охолоджена вода збирається у басейні, звідки надходить до всмоктувального колодязя і далі подається помпами до системи оборотного водопостачання.

Глибина басейну зазвичай становить 1,5–2 м, відстань від рівня води до брівки укусу 0,3 м, сопла розташовують на висоті 1,2–1,5 м від поверхні води (рис. 3.9).

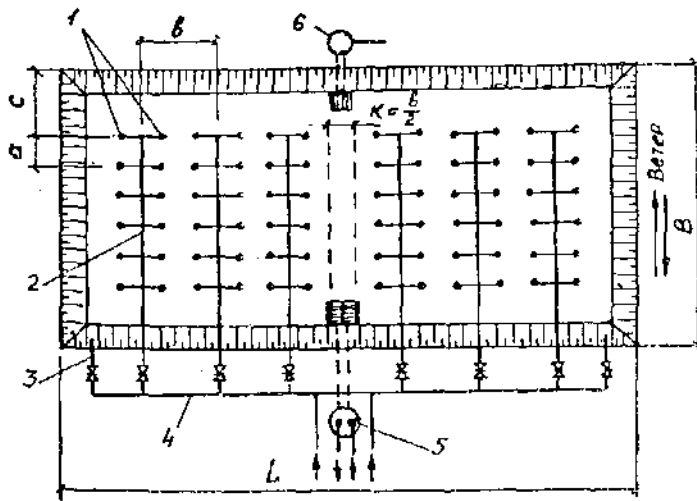


Рисунок 3.8 – Схема бризкального басейну:

- 1 – насадки або сопла;
- 2 – розподільні труби;
- 3 – випуски для скидання води;
- 4 – магістральний трубо-провід або головний колектор;
- 5 – всмоктувальний колодезь охолодженої води;
- 6 – колодезь спорожнення

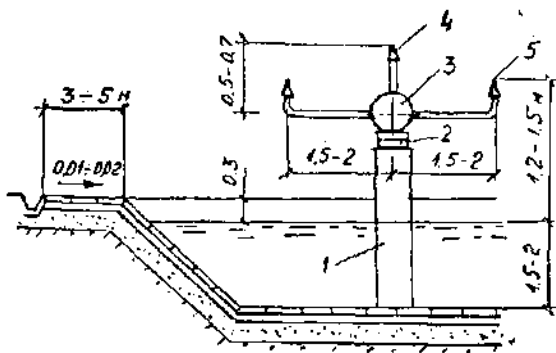


Рисунок 3.9 – Фрагмент бризкального басейну в розрізі:  
 1 – опорний стовп; 2 – ковзаючі опори для компенсації температурної деформації; 3 – розподільний трубопровід; 4 – насадки; 5 – насадкоутримувачі

Розміри басейнів встановлюються з умов гідравлічного навантаження 0,8–1,3 м<sup>3</sup>/год на квадратний метр площі. Ширина бризкального басейна повинна бути не більше 50 м.

Бризкальний басейн обладнують водоприймальним і водоспусковим колодезями. У водоприймальний колодезь, що розташовується на відстані 5–6 м від брівки басейну йде самопливна лінія. На кінці її в басейні розміщені грубі решітки, а у всмоктувальному колодезі встановлена очисна сітка. Також басейн обладнують грязьовим випуском для спорожнення басейну і переливною лінією. Під час проєктування бризкальних басейнів передбачаються випуски води безпосередньо у басейн для скидання її без розбризкування у зимовий період.

Кількість секцій бризкальних басейнів повинна бути зазвичай не менше двох. Застосування однієї секції допускається для оборотних систем із періодичним режимом роботи.

Кількість басейнів повинна бути не менше двох. Через значне винесення краплинної вологи їх розташовують на відстані 50–100 м від інших споруд.

*Розбризувальні сопла* або насадки є найважливішим елементом бризкальних басейнів. Сопла повинні забезпечувати максимальне розбрикування води. Це забезпечується формою сопла та напором води перед ним. Зазвичай вільний напір перед соплом становить 5–8 м.

Сопла розташовують на висоті 1,2–1,5 м над рівнем води по одному або пучками, які складаються із 3–5 штук.

### **3.2.3 Класифікація градирень та їх конструкції**

Градирні є найбільш досконалими та ефективними охолоджувачами, які застосовуються у системах оборотного водопостачання.

За способом підведення охолоджуючого повітря градирні поділяються на:

- відкриті;
- баштові;
- вентиляторні.

У відкритих градирнях рух повітря обумовлений вітром та природною конвекцією. Це малоефективні градирні, їх гідравлічне навантаження до 4,0 м<sup>3</sup>/год та теплове навантаження до 50 кВт/год на 1 м<sup>2</sup> площі у плані.

У баштових градирнях рух повітря обумовлено природною тягою, що створюється витяжною вежею. Висота вежі розраховується таким чином, щоб у найспекотніші періоди року забезпечити подачу необхідної кількості повітря для ефективного охолодження води.

Баштові градирні допускають гідравлічне навантаження до 8 м<sup>3</sup>/год та теплове навантаження до 90 кВт/год на 1 м<sup>2</sup> площі у плані. Водночас вода охолоджується до температури, що на 8–12 °С перевищує теоретичну межу охолодження у разі перепаду температур 8–12 °С.

У вентиляторних градирнях рух повітря обумовлений тягою чи тиском вентилятора. Це найдосконаліші градирні, що допускають гідравлічне навантаження до 12 м<sup>3</sup>/год та теплове навантаження до 120 кВт/год на 1 м<sup>2</sup> площі у плані. Водночас вода охолоджується до температури, що на 4–6 °С перевищує теоретичну межу охолодження у разі перепаду температур до 17 °С.

Баштові та вентиляторні градирні застосовуються у широкому діапазоні продуктивностей і за рівних вимог до температури охолодженої води можуть порівнюватися між собою.

Баштові градирні за капітальними витратами дорожчі за вентиляторні, але дешевше й простіше в експлуатації.

Вентиляторні градирні дешевші та вимагають меншої площі забудови. Завдяки регулюванню продуктивності вентилятори забезпечують стійке

кероване охолодження води. Однак для приводу вентиляторів потрібна значна витрата електроенергії, а самі вентилятори потребують постійного обслуговування, що збільшує вартість експлуатації. Вибір цих градирень у кожному випадку здійснюється на підставі техніко-економічного аналізу.

Відкриті градирні (рис. 3.10) – це резервуари з шириною 2–4 м, довжиною до 20 м, над яким за допомогою сопел водорозподільника розбризкується вода, що охолоджується. Для зниження крапельного винесення по периметру влаштовується огорожа у вигляді жалюзійних ґрат.

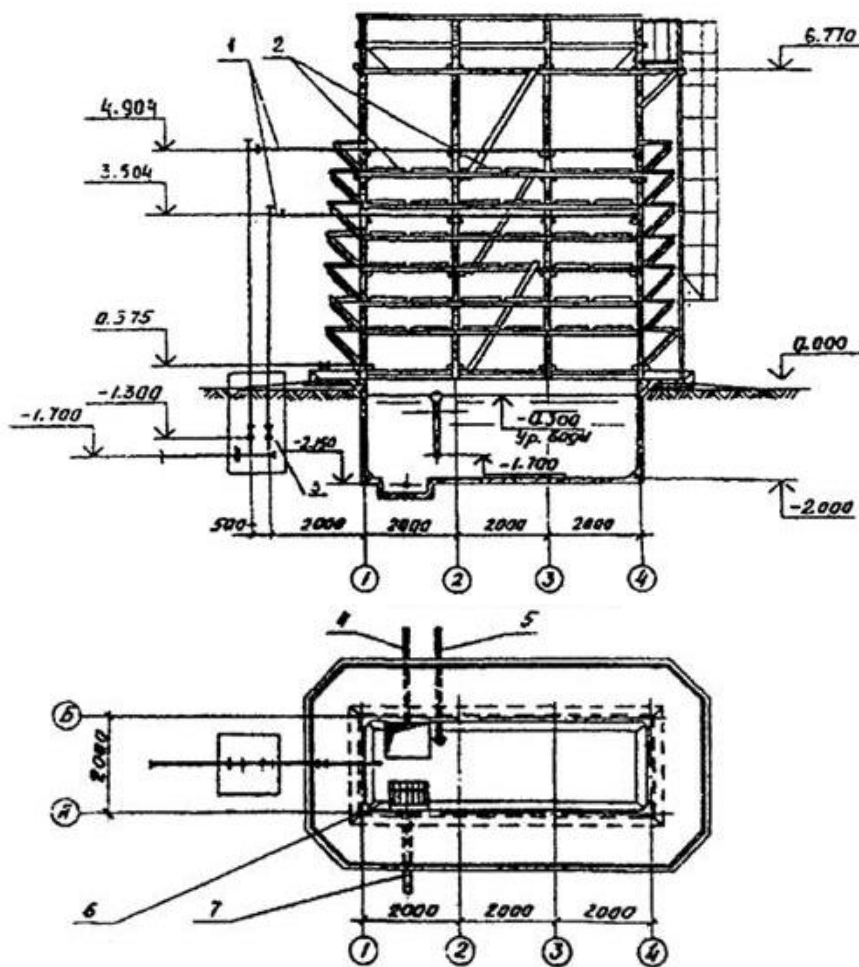


Рисунок 3.10 – Відкрита градирня із крапельним зрошувачем:

- 1 – водорозподільна система; 2 – щити крапельного зрошувача; 3 – засувки;
- 4 – труба грязьова; 5 – труба переливна; 6 – захисні ґрати; 7 – труба відвідна

Відкриті градирні можуть мати крапельний зрошувач, що підвищує ефективність охолодження води.

Застосовуються відкриті градирні в оборотних системах водопостачання невеликої продуктивності за невисоких вимог до температури охолодженої води. Широко використовуються для тимчасових систем оборотного водопостачання.

Баштові градирні у плані можуть бути квадратними, багатограними та круглими. Перші використовуються для охолодження води в оборотних системах невеликої продуктивності. Багатогранні градирні можуть мати досить великі площі (сотні квадратних метрів) та застосовуватися у системах середньої та великої продуктивності. Круглі градирні застосовуються у дуже великих системах оборотного водопостачання та мають площу кілька тисяч квадратних метрів.

Квадратні та багатогранні градирні конструктивно виготовляються каркасно-обшивними. Вони мають каркас зі сталевого профілю, до якого зсередини кріпиться обшивка із дерев'яних щитів, азбестоцементних листів або листового корозійно-стійкого металу.

Круглі градирні виконують у вигляді тонкошарової залізобетонної оболонки гіперболічної форми, яка спирається на похилі залізобетонні колони, що утворюють вхідні вікна для проходження повітря.

Вентиляторні градирні знайшли широке застосування в оборотних системах виробничого водопостачання завдяки компактності та високій ефективності. Одновентиляторні градирні, що стоять окремо, мають площу від 400 до 1 200 м<sup>2</sup> та застосовуються в досить великих системах оборотного водопостачання.

Зазвичай використовують секційні вентиляторні градирні (рис. 3.11), що будуються за типовими проектами, які забезпечують широкий діапазон площ від 2 м<sup>2</sup> до 400 м<sup>2</sup> на одну секцію.

Секційні градирні дешевші за ті, що розташовані окремо. Зводяться вони з уніфікованих конструктивних елементів. Найменша кількість секцій – 2, оптимальна – від 4-х до 8-ми.

Наявність декількох секцій дозволяє створювати найкращі умови охолодження води зі зміною кількості води, що подається залежно від кліматичних умов.

Кожна секція градирні (рис. 3.11) обладнується витяжним вентилятором (1) з регульованою продуктивністю, що забезпечує підсмоктування у градирню необхідної кількості повітря залежно від температур, що змінюються, води та повітря.

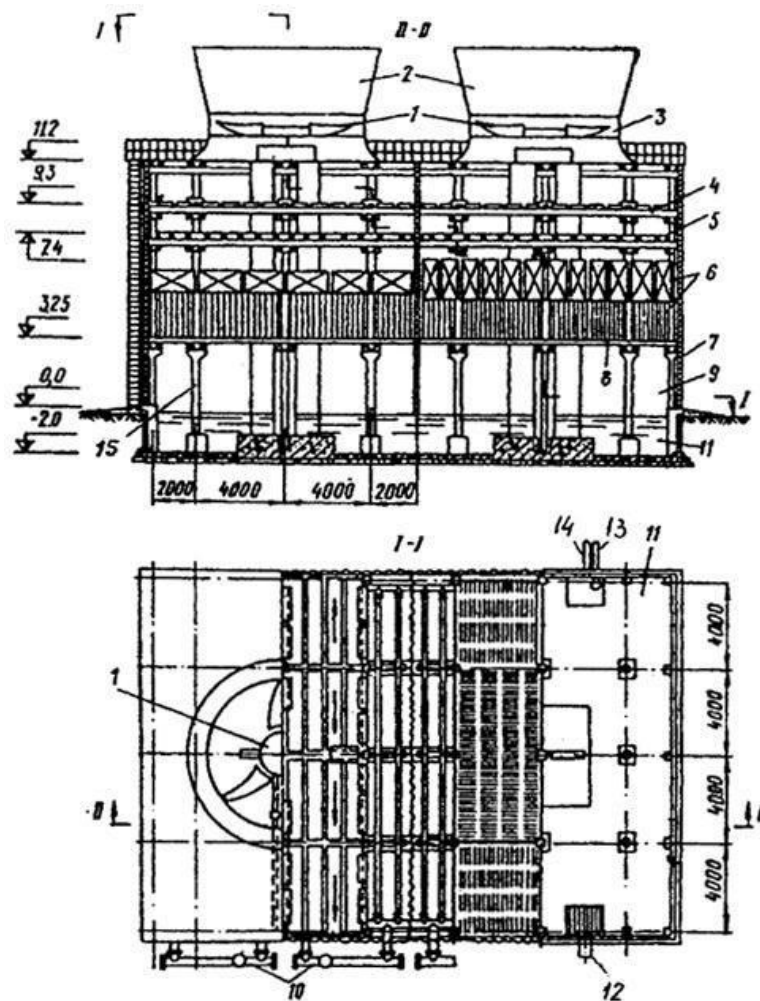


Рисунок 3.11 – Секційна вентиляторна градирня:

- 1 – вентилятор; 2 – дифузор; 3 – конфузор; 4 – водовловлювач;  
 5 – водорозподільник; 6 – зрошувач; 7 – обшивка; 8 – розподільник повітря;  
 9 – вікна для входу повітря; 10 – подача води до водорозподільників;  
 11 – резервуар; 12 – трубопровід для відведення охолодженої води;  
 13 – переливний трубопровід; 14 – грязьовий трубопровід; 15 – каркас

Вода, яка охолоджується, подається до градирні через водорозподільник (5), задачею якого є рівномірний розподіл води по площі секції.

Потім вода гравітаційно надходить на зрошувач (6), який є найважливішим та найдорожчим елементом градирні та забезпечує необхідну площу контакту води з охолоджуючим повітрям. Саме в цьому елементі здійснюється охолодження води.

Охолоджена вода збирається у резервуарі градирні (11), який обладнується трубопроводами для відведення охолодженої води (12), переливним (13) та

грязьовим (14) для спорожнення резервуара та відведення забруднень під час очищення резервуара.

Для зменшення втрат води у вигляді дрібних крапель, що захоплюються повітрям, над водорозподільником встановлюється водовловлювач (4).

Несучим елементом градирні є залізобетонний або металевий каркас (15), до якого зовні кріпляться листи обшивки (7), що створює замкнений простір всередині градирні. З боків обшивка не доходить до низу, та через ці вікна (9) охолоджувальне повітря входить всередину градирні. Для рівномірного розподілу повітря за площею градирні під зрошувачем встановлюється розподільник повітря (8) у вигляді решітки, виготовленої із дощок, поставлених на ребро.

Зрошувачі градирень (рис. 3.12, 3.13) можуть бути:

- крапельними;
- плівковими;
- комбінованими крапельно-плівковими.

Крапельні зрошувачі виконуються із дерев'яних рейок прямокутного (рис. 3.12, а) або трикутного (рис. 3.12, б) перерізу. Крапельні зрошувачі найдешевші, але й найменш ефективні, вони застосовуються, якщо немає потреби глибокого охолодження води.

Плівкові зрошувачі найбільш дорогі, але і найбільш ефективні, дозволяють проводити глибоке охолодження води у разі великих гідравлічних та теплових навантажень. Вони виконуються:

- з дерев'яних дощок (рис. 3.12, в, г);
- азбестоцементних листів (рис. 3.12, д, е);
- пластмасових елементів різної конфігурації (рис. 3.12, ж, і; рис. 3.13).

Крапельно-плівкові зрошувачі (рис. 3.12, к) займають середнє положення між краплинними та плівковими зрошувачами як за ефективністю охолодження, так і за вартістю.

Сучасні вентиляторні градирні обладнуються зазвичай трубчастими напірними водорозподільчими системами. Водорозподільник складається із розподільчих труб, обладнаних соплами різної конструкції.

Значного поширення набули сопла відцентрові та ударні з відбивачами. Сопла можуть виготовлятися з чавуну, кольорових металів та пластмас. Останнім часом перевага надається соплам із пластмас. Вони дешевші, не підлягають корозії, простіші у виготовленні і мають меншу шорсткість поверхні, що за інших рівних умов збільшує їх пропускну здатність.

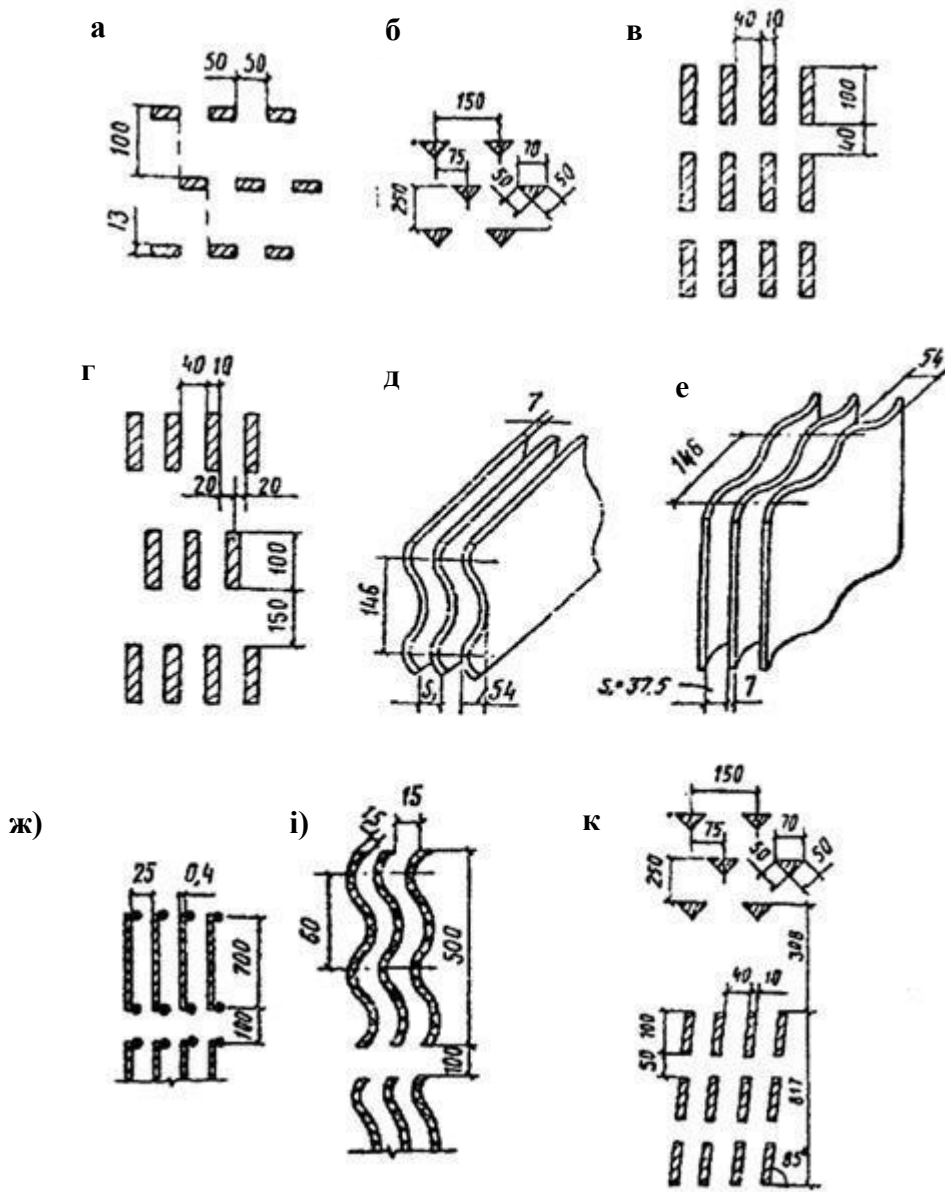


Рисунок 3.12 – Зрошувачі градирень:

а, б – крапельні із дерев'яних рейок; г – плівкові із дерев'яних дощок;  
 д, е – плівкові із азбестоцементних листів; ж, і – плівкові із пластмас;  
 к – комбінований

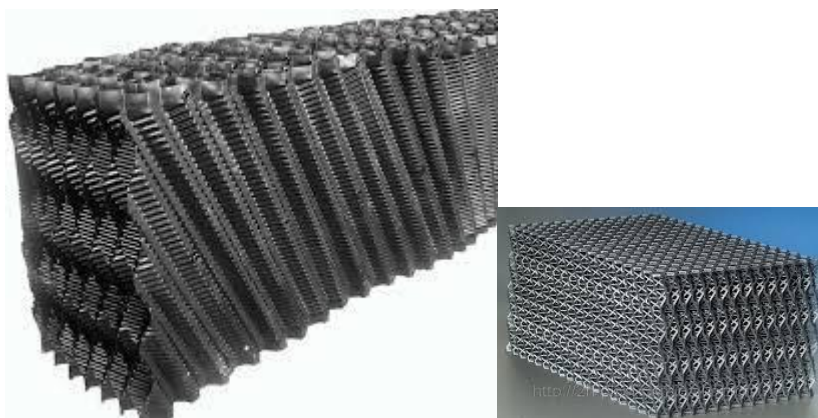


Рисунок 3.13 – Плівковий зрошувач

Водовловлювачі (рис. 3.14) – це решітки з похилих дощок (жалюзі), азбоцементних, металевих або пластмасових елементів, можуть бути одно- і дворядними, останні – ефективніші. Водовловлювачі, крім зменшення крапельного винесення, створюють рівномірність поля швидкостей руху повітря перед вентилятором, що забезпечує надійну роботу особливо великих вентиляторів.



Рисунок 3.14 – Водовловлювач

Розроблено серію типових проєктів секційних вентиляторних градирень із різними зрошувачами у широкому діапазоні продуктивностей.

Малогабаритні вентиляторні градирні застосовуються для створення локальних оборотних систем водопостачання невеликої продуктивності. Ці градирні виготовляються комплектно на заводах, мають невелику масу та можуть встановлюватись на дахах будівель та споруд.

### 3.2.4 Радіаторні (сухі) градирні

У радіаторних (сухих) градирнях (рис. 3.15 та 3.16) вода охолоджується повітрям без безпосереднього контакту через перегородку.

*Перевагою* цих градирень є відсутність втрат води та її забруднення, що має місце у випарних охолоджувачах.



Рисунок 3.15 – Суха вентиляторна градирня

До недоліків радіаторних градирень належать:

- невеликий ефект охолодження;
- високі температури охолодженої води (завжди вище за температуру повітря, виміряну сухим термометром);
- велика витрата повітря (у п'ять разів більша, ніж у випарних градирнях) і відповідно великі енерговитрати;
- велику вартість у зв'язку із використанням дорогих кольорових металів для виготовлення радіаторів.

Тому радіаторні градирні застосовуються переважно у маловодних районах із дефіцитом і великою вартістю води, і навіть у випадках, коли система заповнюється спеціально підготовленою дорогою водою, або коли вода оборотної системи становить небезпеку для навколишнього середовища.

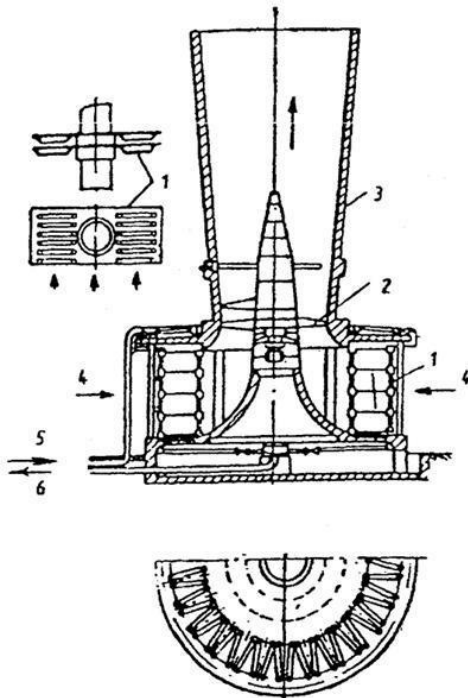


Рисунок 3.16 – Радіаторна (суха) градирня:

- 1 – радіатори; 2 – вентилятор;
- 3 – дифузор; 4 – підведення повітря;
- 5 – подача води на охолодження;
- 6 – відведення охолодженої води

Основним елементом сухої градирні (рис. 3.16) є радіатори, розташовані на її бічній поверхні. Радіатори складаються з алюмінієвих трубок із насадженими на них алюмінієвими ребрами, які збільшують площу контакту з охолоджуючим повітрям і, відповідно, поверхню теплопередачі та кількість тепла, що відводиться. Вода, що охолоджується, по трубопроводах подається у верхню частину градирні та рухається по трубках радіаторів зверху вниз.

Внизу охолоджена вода збирається у колекторі та без розриву струменя трубами відводиться з градирні.

Охолоджуюче повітря омиває поверхню радіаторів, рухаючись у поперечному напрямку від напрямку руху води, тому така градирня називається поперечно-точною.

Охолодження води у градирнях радіаторів може бути інтенсифіковано шляхом зрошення водою зовнішньої поверхні радіаторів. Водночас за рахунок витрати теплової енергії на випаровування цієї води підвищується загальна кількість тепла, що відводиться від градирні. З метою економії води зрошення радіаторів відбувається лише у найспекотніші періоди року.

### 3.2.5 Ежекційні охолоджувачі

Ежекційні охолоджувачі застосовують у хімічній промисловості. Повітря до них надходить за рахунок ефекту ежекції, створюваного потоком крапель води, що охолоджується та розпорошується за допомогою спеціальних форсунок (рис. 3.17).

Вода, що охолоджується, подається у форсунки під тиском 0,2–0,4 МПа та утворює, виходячи із них, краплинний факел. Потік крапель, що швидко летять, аеродинамічно впливає на навколишнє повітря та передає йому частину свого імпульсу, тобто під час руху крапель рідини поступово зменшується їхня швидкість і рух крапель загальмовуються, а швидкість повітря (газу), навпаки, зростає. Оскільки факел на початковій ділянці розширюється, у його порожнину ежектується все більша кількість повітря. У зоні контакту води, що охолоджується, із повітрям (3) відбувається передача тепла і охолодження води.

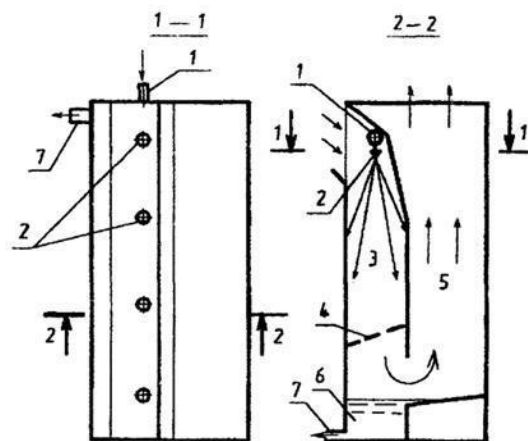


Рисунок 3.17 – Ежекційний охолоджувач води:

1 – подача води, що охолоджується; 2 – форсунки; 3 – зона контакту охолоджуючого повітря з краплями води; 4 – дробник; 5 – зона сепарації; 6 – резервуар охолодженої води; 7 – відведення охолодженої води; 8 – вхід повітря, що охолоджує; 9 – вихід повітря з охолоджувача

Додаткове дроблення крапель води на дробнику (4) підсилює ефект охолодження води за рахунок оновлення поверхні контакту води та повітря. Із

зони (3) повітря надходить до сепаратора (5), де відокремлюється від захоплених дрібних крапель води та виходить із охолоджувача.

Перевагами ежекційних охолоджувачів є простота конструкції та експлуатації, а також можливість встановлення безпосередньо у виробничих цехах.

### **Контрольні запитання**

1. Класифікація споруд для охолодження води.
2. Водосховища-охолоджувачі. Типи, умови використання.
3. Застосування водосховищ-охолоджувачів та бризкальних басейнів для охолодження води. Переваги й недоліки.
4. Кількісні та якісні характеристики охолоджувачів.
5. Водорозподільні системи й зрошувальні устрої градирень.
6. Типи зрошувачів.
7. Як здійснюється охолодження води у градирнях відкритого типу?
8. Баштові та вентиляторні градирні. Конструкція, умови використання.
9. Радіаторні (сухі) градирні. Конструкція, умови використання.
10. Ежекційні охолоджувачі. Конструкція, умови використання.

## **ЗМ 3 МЕТОДИ ПІДГОТОВКИ ВОДИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ**

### **4 ЗАПОБІГАННЯ УТВОРЕННЮ КАРБОНАТНИХ ВІДКЛАДЕНЬ**

#### **4.1 Водопідготовка для джерел і систем теплопостачання**

##### **4.1.1 Основні методи очищення води**

Вода в енергетиці використовується в процесі виробництва електроенергії як теплоносій робочого тіла, сповільнювача нейтронів, розчинника, транспортера твердих продуктів тощо. Обсяги води, що використовуються в енергетиці, величезні – більше 50 % промислового споживання води в Україні.

На вироблення 1 кВт·год використовується до 0,18 т води. На охолодження використовується до 98 % води, що застосовується в енергетиці, остання частина використовується як робоче тіло, уповільнювач тощо;

1 % втрачається безповоротно. Залежно від призначення води вибирається відповідна технологічна схема її обробки або очистки.

У цей час нові електростанції проєктують із замкненою системою оборотного охолодження конденсаторів із нормованою продувкою, що впливає на навколишнє середовище хімічним і тепловим впливом. Зовсім природно, що найближчими роками в Україні будуть ухвалені більш тверді норми на скидання рідких відходів зі станцій і в перспективі скидання води буде повністю заборонено.

У наш час на підприємствах теплоенергетики – залежно від якості вихідної води та вимог, що висуваються до додаткової води, – застосовуються різні схеми водопідготовчих установок (далі – ВПУ). Загалом усі вони містять попереднє очищення води (очищення від механічних домішок) та іонний обмін.

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

Устаткування сучасних ТЕЦ експлуатується за високих теплових навантажень, що вимагає твердого обмеження товщини відкладень на поверхні нагрівання за умовами температурного режиму їхнього металу протягом робочої кампанії. Такі відкладення утворюються з домішок, що надходять у цикли електростанцій, зокрема і з додатковою водою, тому забезпечення високої якості водних теплоносіїв ТЕС, ТЕЦ і АЕС є найважливішим завданням. Використання водного теплоносія високої якості спрощує також рішення завдань одержання чистої пари, мінімізації швидкостей корозії конструктивних матеріалів казанів, турбін та устаткування конденсатно-випарного тракту.

Вода є, по суті, вихідною сировиною, яка після належної обробки (очищення) використовується: як вихідна речовина для одержання пари у казанах, парогенераторах, ядерних реакторах киплячого типу, випарниках, пароперетворювачах; для конденсації пари, що відпрацювала у парових турбінах; для охолодження різних апаратів та агрегатів ТЕС і АЕС; як теплоносій у теплових мережах і системах гарячого водопостачання.

Для задоволення різноманітних вимог до якості води, споживаної під час вироблення електричної й теплової енергії, виникає необхідність спеціальної фізико-хімічної її обробки.

Вимоги до води для технологічних потреб визначені у відповідних ДСТ, ТУ, ДБН тощо. Ці вимоги для різних виробництв дуже відрізняються одні від одних як за допустимим вмістом різних хімічних і механічних забруднень, так і за спеціальними вимогами, наприклад, до біологічної стерильності тощо.

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

Розчинені у воді речовини можуть викликати несправності у роботі енергетичного устаткування. Здебільшого це пов'язано із накипними відкладеннями у теплових агрегатах і корозією. У теплообмінній апаратурі, що працює за 25–50 °С, виникають низькотемпературні відкладення, основним компонентом яких є карбонат кальцію  $\text{CaCO}_3$ . Накипні відкладення, що утворюються, зменшують теплопродуктивність і збільшують втрати напору у трубах.

Під час обробки води використовуються багато комбінацій іонообмінних фільтрів. Вони містять попереднє очищення, пом'якшення, демінералізацію (первинна система) і фінішне очищення.

**Попередня обробка.** Перед фільтрацією через іонообмінну колонку вихідний розчин має бути ретельно відфільтрований для очищення від ГДП. Органічні речовини можуть бути частково вилучені за допомогою коагуляції (флокуляції) використанням хлориду заліза, сульфату заліза або сульфату алюмінію із можливим додаванням поліелектролітів або на фільтрах, завантажених органоуцільнювачами.

Для високолувної сирі води з метою видалення карбонату кальцію може використовуватися класичний процес вапнування. Для повного пом'якшення води застосовують процес содопом'якшення. Для вод із підвищеним вмістом силікатів доцільно використовувати процес магнезійного знекремнювання. Ці процеси значно зменшують іонне навантаження на наступні, іонообмінні фільтри.

#### *Вибір схеми водопідготовчої (ВПУ) системи теплопостачання*

Під час вибору схеми ВПУ ТС необхідно враховувати сезонність роботи теплового та водопідготовчого устаткування. Найбільш доцільне застосування комбінованих схем ВПУ, що становлять низку різних способів обробки води, об'єднаних у загальну технологічну схему, окремі елементи якої під'єднують для часткової або повної обробки вихідної води відповідно до теплового графіка.

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

Під час проектування схем ВПУ і складання режимних карт, що враховують сезонність роботи системи теплопостачання, варто визначити необхідну частку пом'якшення за правилами.

У виробничих і опалювальних теплогенеруючих установках вода, що надходить із різноманітних джерел, витрачається на надолуження втрат конденсату, пари, води із теплової мережі і на власні потреби котельні.

Втрати води під час виробництва пари відбуваються у межах власне теплогенеруючих установок за рахунок витрати частини пари на власні потреби і за рахунок втрат конденсату від споживачів через забруднення.

У водогрійних теплогенеруючих установках вода губиться частково через витрати на власні потреби, через витоки води у системі теплопостачання, які пояснюються нещільністю з'єднань. Якщо ця система відкрита, то до втрат додаються витрати води із теплових мереж на гаряче водопостачання.

Відшкодування витрат пари або води на покриття втрат та інші потреби ТГУ здійснюють через спеціальні пристрої, комплекс яких називають водопідготовкою.

У циклі котлоагрегата вода на різноманітних стадіях процесу має різноманітні назви: вхідна вода; додаткова підживильна вода; живильна вода; котлова вода.

У живильну воду надходять різноманітні домішки, що призводить до утворення відкладень на поверхнях нагрівання котлоагрегатів і до порушення їхньої нормальної роботи, погіршення якості пари, води і до інтенсивного протікання корозійних процесів. Тому для безперервної та економічної роботи котлоагрегата велике значення має правильна організація водяного режиму, що забезпечує високий ступінь чистоти пари і води, запобігає утворенню відкладень на поверхнях нагрівання і захищає від корозії. Домогтися цього можна підвищенням якості живильної води у цеху водопідготовки.

Під час вибору схеми водопідготовки розрізняють докотлову і внутрішньокотлову обробку води.

Застосовується така схема докотлової водопідготовки залежно від якості вхідної води для:

- 1) освітлення води;
- 2) зменшення твердості (пом'якшення води) – метод іонного обміну;

3) видалення із води розчинених корозійних-агресивних газів (дегазація-деаерація).

Методи освітлення і зменшення твердості нами вже розглядалися у попередніх розділах. Тому докладніше розглянемо методи видалення з води розчинених корозійних-агресивних газів.

#### 4.1.2 Видалення з води розчинних газів

Видалення з води розчинених у ній або утворених в процесі її обробки газів називають дегазацією. Зазвичай із води доводиться видаляти вуглекислоту, сірководень, кисень і рідше метан. Перші три корозійно активні гази обумовлюють або каталізують процеси корозії металу, а діоксид вуглецю (IV) викликає корозію бетону. Метан, що виділяється з води в процесі її обробки, утворює із повітрям у приміщенні водоочисного комплексу вибухонебезпечну суміш, а сірководень надає воді неприємного запаху. Крім того, у разі воденево-катіонітового пом'якшення та іонітового знесолення води, а також під час знезалізнення та деманганациї підземних бікарбонатних вод доводиться вирішувати завдання видалення вільної вуглекислоти. Під час підготовки живильної води, а також води для теплоцентралей необхідно видаляти із неї кисень з метою запобігання корозії металу. Звідси стає очевидною необхідність якомога повного видалення з води розчинених у ній газів.

Існуючі методи дегазації води розподіляють на фізичні та хімічні. Суть фізичних методів дегазації полягає у використанні такого технологічного прийому, як аерація: воду, яка містить газ, що видаляється, призводять до зіткнення з повітрям, і якщо парціальний тиск цього газу у повітрі близький до нуля, то створюються умови, за яких розчинність газу у воді стає мізерно малою.

За допомогою *першого прийому*, тобто аерації води, зазвичай видаляють вільну вуглекислоту та сірководень, оскільки парціальний тиск цих газів у атмосферному повітрі близький до нуля. До *другого прийому* зазвичай вдаються у разі знекиснення води. Для цього застосовують або нагрівання води (у термічних деаераторах), або зниження тиску до величини, за якої вода кипить без додаткового підігріву у вакуумних дегазаторах.

Для видалення із води розчинених газів застосовують кілька типів дегазаторів: *плівкові* із різними насадками, що працюють в умовах протипотоку води, яку дегазують, та повітря, що подається вентилятором, *барботажні*, *пінні*, *вакуумно-ежекційні*, *вакуумні*.

У технології водопідготовки для видалення газів (крім кисню) переважно застосовують плівкові дегазатори, а для знекиснення води – вакуумні дегазатори або термічні деаератори. Барботажні дегазатори використовують у виняткових випадках через їх порівняно високу експлуатаційну вартість.

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

Найбільш доцільно застосовувати ці дегазатори на великих установках і у разі великого вмісту вільного діоксиду вуглецю (IV) у воді, що надходить у дегазатор. На рисунку 4.1 наведено схему плівкового дегазатора із насадкою з кілець Рашига, яку розташовують на проміжній дірчастій перегородці, що перебуває на відстані 600 мм від дна. У піддон вентилятором подається повітря. Вода надходить у верхню частину дегазатора і рівномірно розподіляється по перетину плитою, що має 48 патрубків для зливу води у насадку та 8 патрубків із ковпаками для виходу повітря. Вода із піддонного простору проходить через гідравлічний затвор, висота якого  $h = 1,2 H$  (де  $H$  – максимальний напір, що розвивається вентилятором, Па).

Після плівкового дегазатора з кільцями Рашига та подачею повітря вентилятором вміст діоксиду вуглецю (IV) у воді становить не більше 3–5 мг/л. Під час видалення сірководню цим методом варто підкисляти воду (до  $pH = 5$ ) із наступним підлужуванням її до необхідного значення pH. Це дає значну економію витрати повітря.

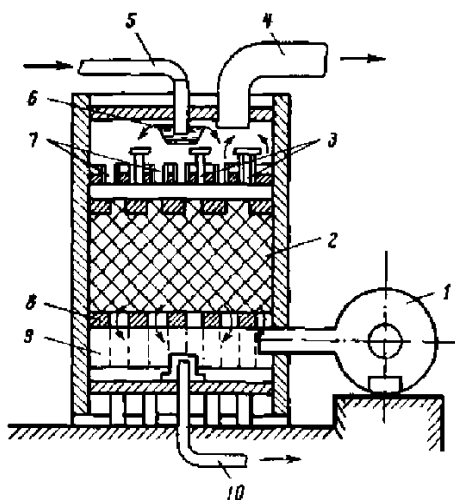


Рисунок 4.1 – Схема плівкового дегазатора із насадкою з кілець Рашига

Для видалення частини вільної вуглекислоти з води у процесі її деманганації або знезалізнення (з метою підняття значення рН води до оптимального) також найбільш доцільно використовувати дегазатори, завантажені пластмасовими або керамічними кільцями Рашига, які працюють у разі подання до них повітря вентилятором, або вакуумно-ежекційні апарати.

Застосування вакуумних дегазаторів (рис. 4.2, а) спеціально для видалення з води вільної вуглекислоти доцільно тільки у випадках катіонного пом'якшення або іонітового знесолення підземних вод, коли у знесоленій або пом'якшеній воді лімітується вміст кисню.

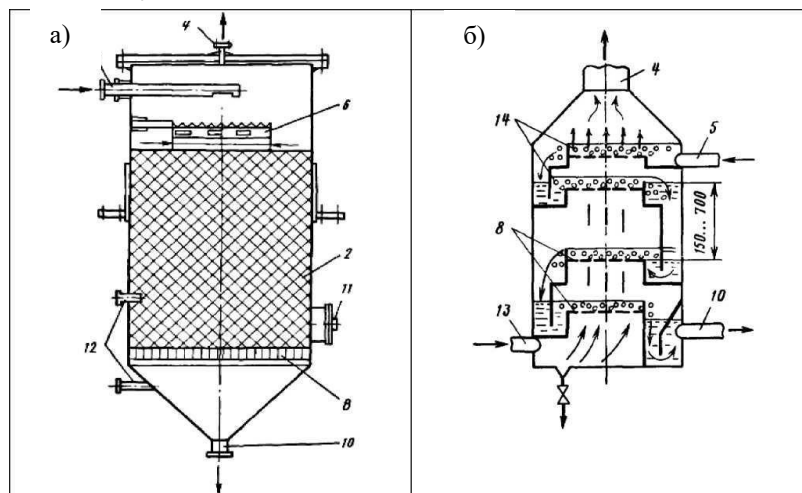


Рисунок 4.2 – Вакуумний (а) і пінний (б) дегазатор:

- 1 – вентилятор; 2 – насадка з керамічних кілець Рашига; 3 – газовідвідний патрубок; 5, 10 – введення вихідної та 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 – введення повітря; 14 – пінний шар

Вакуумні дегазатори варто застосовувати за необхідності запобігання кисневої корозії труб та апаратури (під час підготовки води для живлення котлів і знекиснення води у системах гарячого водопостачання) або коли наявність розчинених газів у воді, зокрема кисню, є шкідливою для технологічного процесу підприємства.

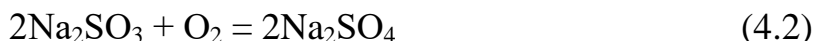
Основою *хімічних методів* видалення з води розчинених газів є їхнє хімічне зв'язування, що досягається введенням реагентів або фільтруванням через спеціальні завантаження. Для видалення з води кисню застосовують її фільтрування через речовини, що легко окислюються, наприклад, через сталеві стружки, і обробку сульфітом натрію або оксидом сірки (IV). У разі використання сталевих стружок їх знежирюють і завантажують у спеціальний фільтр. Вміст марганцю у них не повинен перевищувати 0,3 %.

У процесі фільтрування залізо, окислюючись, зв'язує кисень



Оксид заліза (III) і гідроксид заліза (III), що утворилися в результаті корозії стружок, видаляють зворотним промиванням. Тривалість контакту води зі стружками залежить від температури і зменшується від 25-ти до 3-х хвилин у разі збільшення температури від 20 °С до 80 °С.

Зазвичай застосовують обробку води сульфідом натрію:



або оксидом сірки (IV):



Сірчиста кислота, що утворюється, окислюється киснем, який міститься у воді, до сірчаної кислоти



Як каталізатор застосовують солі міді (II) або кобальту (II) у вигляді 0,01-відсоткового розчину. Для видалення 1 мг кисню витрачається 4 мг оксиду сірки (IV) або 7,9 мг сульфідну натрію. Крім того, для видалення кисню воду обробляють також гідразином:  $\text{N}_2\text{H}_4$ . Гідразин є сильним киснепоглинальним реагентом.

Крім хімічних способів окислення сірководню використовують і біохімічний метод. Відомо, що велику участь в окисленні сульфідних вод беруть сіркобактерії, які зустрічаються у сірчаних джерелах, стоячих водах і взагалі широко розповсюджені у природі. Для інтенсивної діяльності сіркобактерій необхідно забезпечити нейтралізацію  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , що утвориться. Ця умова виконується, якщо вода містить достатню кількість карбонатів.

#### 4.1.3 Опріснення води методом дистиляції. Загальні поняття й визначення

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

Існуючі дистиляційні опріснювальні установки можна класифікувати за технологією одержання прісної води, за конструктивним оформленням, за видом застосованої допоміжної апаратури. Крім цього, є істотне розходження у джерелах енергії, що витрачається на роботу установки.

Наприклад, зараз уже розроблено дистиляційні установки, розраховані на використання викопного палива, сонячної, електричної, атомної енергії тощо. Існують і так звані утилізаційні установки, що використовують низькопотенціально непридатне тепло ТЕЦ, двигунів внутрішнього згоряння, тепло газів, що відходять, і багато інших видів установок.

Принцип дистиляції заснований на тому, що під час нагрівання солоної води до температури більш високої, ніж температура кипіння (за певного солевмісту і тиску), вода починає кипіти. Пара, що утворюється під час тиску, меншому за 50 кг/см, практично не здатна розчинити солі, тому у разі її конденсації виходить прісна вода. Для випару 1 кг води її необхідно нагріти до температури кипіння та потім надати додаткове тепло фазового переходу води у пару, так звану сховану теплоту пароутворення, яка за температури 100 °С дорівнює 539,55 ккал/кг. Щоб отриману пару перетворити на воду, потрібно із пари вилучити тепло фазового переходу (539,55 ккал/кг). Значна частина цього тепла може бути повернута назад до установки, тобто рекуперована. Чим більше тепла фазового переходу рекуперовано, тим вищою вважається теплова економічність дистиляційної опріснювальної установки.

За характером використання тепла і ступеня його рекуперації дистиляційні опріснювальні установки поділяють на одноступінчасті, багатоступінчасті та термокомпресійні.

Принцип роботи одноступінчастої дистиляційної опріснювальної установки показано на рисунку 4.3.

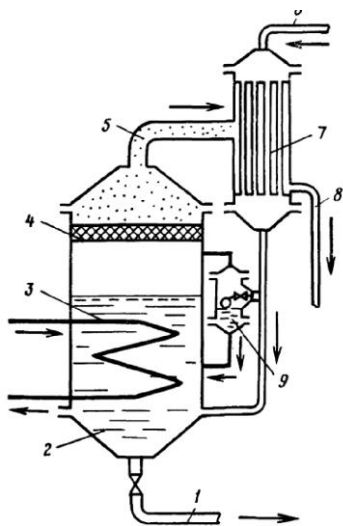


Рисунок 4.3 – Схема одноступінчастої

дистиляційної опріснювальної установки:

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

Найбільш 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. 4.4) становлять послідовно працюючі одноступеневі дистиляційні опріснювальні установки.

За такою схемою вторинна пара попереднього ступеня використовується як нагрівальна пара для випару води у наступному ступені. Солонa вода надходить у кінцевий конденсатор, де, прохолоджуючи пару останнього ступеня, конденсує її, нагріваючись за рахунок тепла конденсації. Частина солоної води скидається у скид, а частина надходить на перший ступінь випарника, де парою, що подається із вихідного парогенератора, вона нагрівається до температури кипіння. Пара водночас конденсується, і конденсат відводиться у парогенератор. Пара, що утворилася на першому ступені випарника, надходить через сепаратор у другий корпус випарника, де вона слугує як нагрівальна пара.

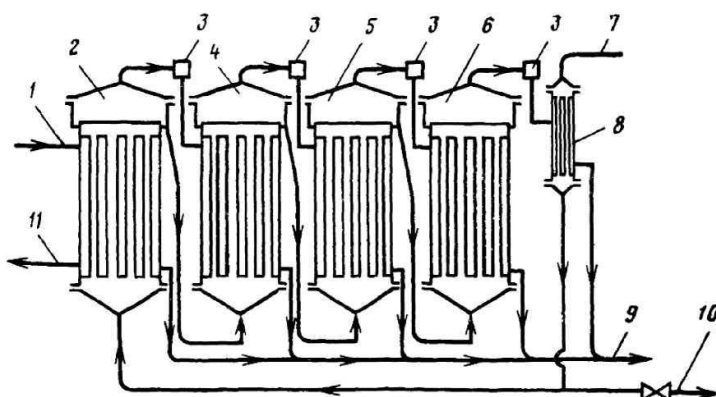


Рисунок 4.4 – Багатоступінчаста дистиляційна установка:

- 1 – теплоносій; 2, 4, 5, 6 – випарник I, II, III і IV ступенів; 3 – сепаратор,
- 9 – вихідна й опріснена вода; 8 – конденсатор; 10 – скидання розсолу;
- 11 – відведення конденсату у парогенератор

Солонa вода, яка не випарилася у першому корпусі випарника, надходить у другий корпус, де нагрівається за рахунок тепла конденсації пари і знову частково випаровується за менших, ніж у першому корпусі випарника, тиску та температурі. Якщо в першому корпусі температура кипіння становить  $100^{\circ}\text{C}$ , то у наступних трьох щаблях відповідно  $95^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}\text{C}$ ,  $85^{\circ}\text{C}$ . Це досягається шляхом зменшення тиску у наступних ступенях випарників. Зі збільшенням кількості ступенів багатоступінчасті опріснювальні установки стають більш економічними. Однак зі збільшенням кількості ступенів випаровування зменшується температурний перепад за кожним із них, збільшується загальна поверхня нагріву апаратів і відповідно різко зростають капітальні витрати на опріснювальну установку.

Під час роботи дистиляційних опріснювальних установок відбувається відкладення солей, які утворюють шар накипу на нагрівальних елементах 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 щодо попередження утворення накипу або його видалення, а отже, заздалегідь планується періодична зупинка опріснювальної установки для очищення її від накипу. Очищення робочих поверхонь від накипу здійснюється технічним, механічним і хімічним шляхом. Зменшення інтенсивності утворення накипу досягають додаванням до оброблюваної води дрібнозернистих домішок: 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 води, що випаровується, до 50 °С і нижче.

#### 4.1.4 Накипоутворення. Види накипу, його властивості

Як відомо, наявність розчинених солей у воді надає воді властивості, що називається 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 Са, магнію Mg тощо. Один зі способів усунення тимчасової твердості – нагрівання води до температури кипіння, водночас солі тимчасової твердості переходять у нерозчинну форму і випадають в осад. Цей осад називають накипом або твердими відкладеннями.

Під час роботи теплообмінного устаткування (казанів, теплообмінників, випарників, охолоджувачів тощо) на поверхнях нагрівання утворюються відкладення накипу ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSiO}_3$ , окисли заліза тощо). Внаслідок цього погіршується теплопередача – теплопровідність накипу в десятки разів нижча, ніж у металу; погіршується економічність і продуктивність устаткування – із шаром накипу у 1 мм перевитрата палива становить 2–2,5 %, а із шаром у 5 мм – до 10–15 %. Через перегрів металу і корозії під шаром накипу скорочується термін служби металу труб, відбуваються аварії металоконструкцій теплообмінних агрегатів (свищі, здуття, 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 15–25 °С. Наприклад, у разі розрахункового тиску в жаротрубному казані 0,6 МПа температура насичення дорівнює 159 °С, а максимальна температура стінки металу з боку газу не перевищує 183 °С. За таких умов строк служби вуглецевої сталі – кілька десятків років.

Однак через причини, зазначені вище, у разі погіршеної водопідготовки та одноконтурної схеми включення казанів, якщо у воді містяться солі твердості, під час кипіння води на поверхні утворюються щільні кальцієві відкладення, які істотно збільшують термічний опір стінки.

Щоб виключити можливість аварій і продовжити термін служби устаткування між профілактиками, необхідно якимось чином унеможливити утворення на теплообмінних поверхнях шару відкладень. Існують *фізичні й хімічні* способи пом'якшення води. Для хімічного пом'якшення використовуваної води потрібні значні витрати на спорудження й обслуговування хімводопідготовки. Пом'якшення води за допомогою іонообмінних матеріалів або введення комплексонів у відкритих системах теплопостачання, а також під час нагрівання води для гарячого водопостачання зазвичай не економічно та екологічно шкідливо. Крім того, у більшості випадків хімічні реактиви самі сприяють руйнуванню металоконструкцій.

*Ультразвуковий метод* запобігання накипоутворення заснований на дослідженнях, що проводилися в Україні з кінця 50-х років. У разі впливу на воду ультразвукових коливань утворюється безліч постійних центрів кристалізації, що зміщуються. Це ускладнює зростання 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, призводять до руйнування відкладень, що були, і до очищення устаткування. Шлам видаляється зі струмом води або продувкою. Варто врахувати, що цей метод – фізичний і діє на всі види солей та органічних відкладень незалежно від їхнього хімічного складу. Бажано після теплообмінного агрегату, який захищений ультразвуковими установками, встановити фільтруючий пристрій, що затримує зважений коагульований накип. Такий метод є найбільш ефективним і універсальним із безреагентних фізичних методів, економічний, екологічно чистий, безпечний для устаткування й персоналу. Може поєднуватися з уведенням комплексонів і хімводопідготовкою води.

Крім того, ультразвукові коливання чинять руйнівну дію на накип, що утворився раніше. Ультразвукові коливання, впливаючи на поверхню нагрівання, створюють знакозмінні механічні зусилля, під впливом яких

міцність зв'язку всередині карбонатних відкладень, а також між карбонатним відкладенням і металом порушується, і водночас утворюються тріщини.

Вода під дією капілярних сил проникає через тріщини-капіляри до поверхні нагрівання, де вона миттєво випаровується, викликаючи спучування та відшарування карбонатних відкладень. Дрібні частки, що відшарувалися, і лусочки карбонатних відкладень накопичуються у нижній частині теплообмінного устаткування та видаляються періодичною продувкою.

Дія ультразвуку не обмежується тільки запобіганням утворення карбонатних відкладень і збереженням за рахунок цього ефективності теплотехнічного устаткування. Ультразвукові коливання збільшують теплопередачу поверхні, що гріє, за рахунок мікропотоків, утворених коливаннями стінок труб і води у них, а також підвищують швидкість потоку води через зменшення гідродинамічного опору труб із коливними стінками.

Під дією ультразвуку поліпшується відвід пухирців пари від поверхні нагрівання і дегазація води внаслідок кращого перемішування рідини на межі двох середовищ «метал – рідина», що також сприяє збільшенню теплопередачі. Явище зменшення гідродинамічного опору особливо ефективно проявляється у вузьких мікронних щілинах природних дефектів внутрішніх поверхонь труб, де за звичайних умов (без ультразвуку) у теплообмінному устаткуванні зберігається кисень із повітря, а із впливом 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, призводить до деформації найбільш податливих ділянок поверхні поблизу мікротріщин. Завдяки цим деформаціям відбувається наклеп країв тріщин, у результаті чого вони виявляються замкненими і нечутливими до проникнення у них кисню під час зливання води з устаткування. Внутрішня поверхня труб стає гладкою, і повна площа її різко зменшується, що призводить до зменшення ймовірності корозії. Одержаний у такий спосіб ефект корозійного захисту певною мірою замінює пасивацію внутрішньої поверхні труб.

#### **4.2 Характер та причини утворення карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання**

Природна або очищена стічна вода, що має певну карбонатну твердість (вода поверхневих джерел більше 2–3 мг-екв/л і підземних джерел більше 1–1,5 мг-екв/л) під час використання у системі оборотного водопостачання як

охолоджуючого агенту обладнання або технологічних продуктів (без зіткнення із ними) у теплообмінних апаратах, може виділяти на теплообмінній поверхні та у спорудах карбонатні відкладення ( $\text{CaCO}_3$  тощо). Щоб запобігти утворенню карбонатних відкладень, застосовують обробку води (оборотної або додаткової) безпосередньо в системі оборотного водопостачання.

У складі карбонатних відкладень переважає карбонат кальцію  $\text{CaCO}_3$ , він також може бути в'язучим для інших домішок.

*Характер та склад відкладень.* Карбонатні відкладення можуть бути щільними (рис. 4.5) або пухкими, а іноді крупнозернистими уламковими чи у вигляді піску.

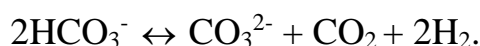
Щільні відкладення мають яскраво виражену кристалічну структуру із зернами відносно правильної форми та практично не містять органічних домішок: у разі висихання вони не розпадаються. Такі структури відкладень характерні для холодильників вогневого нагріву металургійних печей, сорочок циліндрів компресорів та охолоджуваних водою теплообмінних апаратів із температурою продукту понад  $80\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Відкладення, що мають пухку структуру, містять велику кількість домішок мінерального або органічного походження (залізо, кремнезем тощо). Під час висихання вони схильні до розпаду. Такі структури відкладень характерні для холодильників невогневого нагріву, які охолоджуються водою теплообмінних апаратів із температурою продукту, меншою за  $80\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ . У всіх випадках процеси відкладення поєднуються із процесами біологічних обростань або корозії металу.

Таким чином, для кожного типу теплообмінного апарату, для води різних складів та режимів її використання характерні відповідні за структурою карбонатні відкладення.

#### *Причини та стадії утворення відкладень в охолоджувальних системах*

Відкладення кристалічного карбонату кальцію на теплопередавальній поверхні та у трубопроводах утворюються внаслідок порушення вуглекислотної рівноваги у нестабільній оборотній воді під час розпаду бікарбонатного іону із втратою вільної вуглекислоти розраховується за такою формулою:



Причиною порушення вуглекислотної рівноваги є нагрівання води у теплообмінних апаратах із подальшим охолодженням на градирнях або інших спорудах. Чим більше міститься у воді бікарбонатних іонів (карбонатна твердість) і чим вищий ступінь нагрівання води, тим інтенсивніше відбувається

процес розпаду  $\text{HCO}_3^-$  та утворення карбонатного іону  $\text{CO}_3^{2-}$ , тому що для цього потрібна велика концентрація у воді вільної рівноважної вуглекислоти (рис. 4.5), необхідної для підтримки у розчині певної кількості бікарбонату кальцію.

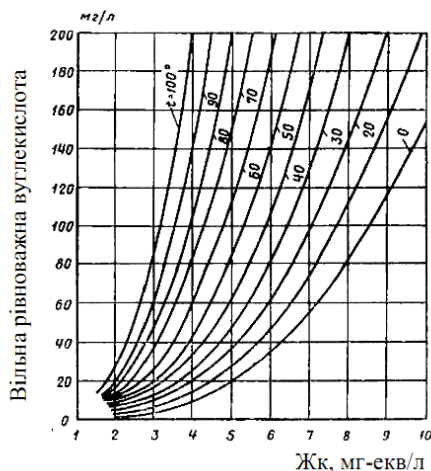
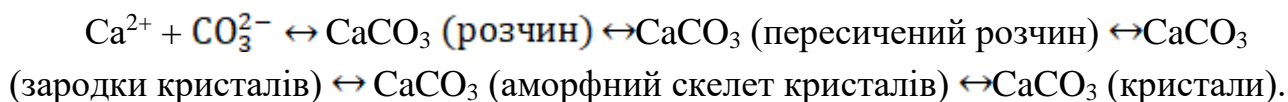


Рисунок 4.5 – Необхідний вміст вільної рівноважної вуглекислоти  $\text{CO}_2$  у воді для запобігання розпаду бікарбонату кальцію  $\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$  залежно від температури нагрівання води  $t$ , °C із заданою карбонатною твердістю  $\text{Жк}$

У разі порушення вуглекислотної рівноваги та появи карбонатного іона  $\text{CO}_3^{2-}$  останній вступає у реакцію із завжди наявним у холодній воді (у тій чи іншій концентрації) іоном кальцію  $\text{Ca}^{2+}$ , у результаті чого спочатку утворюються зародки кристалів карбонату кальцію  $\text{CaCO}_3$ , а потім самі кристали. Таким чином, процес зародження, утворення та відкладення  $\text{CaCO}_3$  відбувається через низку послідовних стадій:



Іони  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{CO}_3^{2-}$ , з'єднуючись у молекули, поступово утворюють пересичений розчин  $\text{CaCO}_3$ . У цьому розчині утворюються далі центри кристалізації – зародки (рис. 4.6, а), які потім укрупнюються (рис. 4.6, б) і набувають вигляду слабкої каламуті. Потім утворюється скелет кристалів (рис. 4.6, в) і, нарешті, самі кристали  $\text{CaCO}_3$  (рис. 4.6, г). Збільшуючись, кристали перетворюються на зростки.

Процес кристалізації прискорюється за наявності у середовищі певних зародків – початкових частинок, навколо яких відбувається подальше утворення кристалів. Такі зародки можуть утворитися за рахунок самого середовища, що кристалізується.

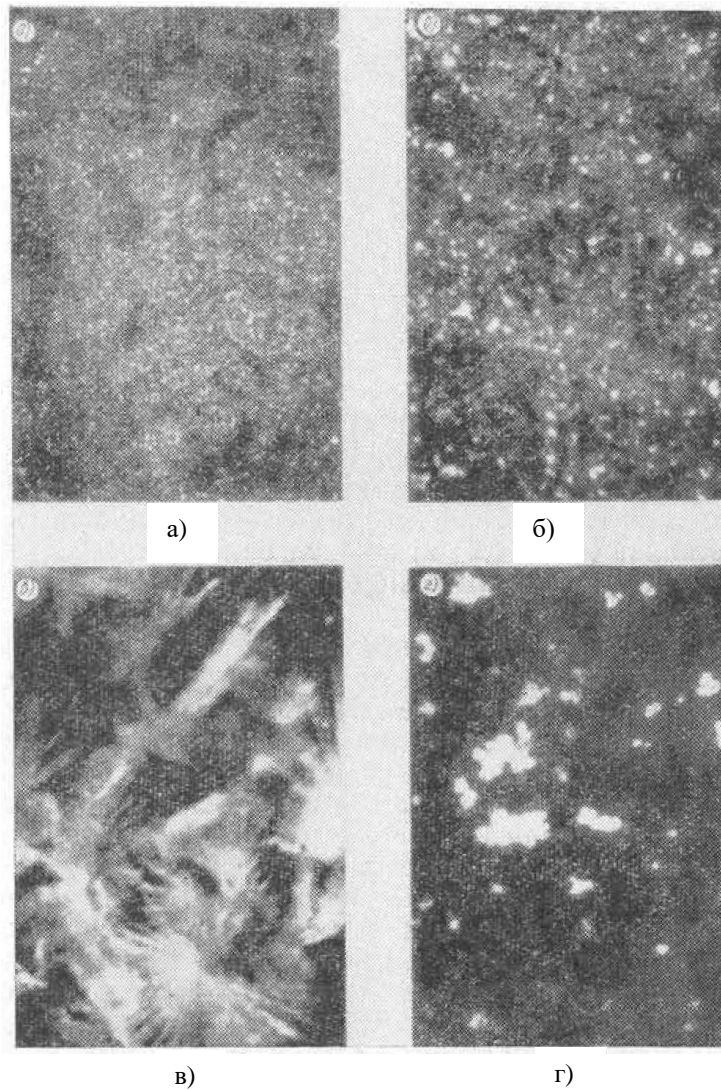


Рисунок 4.6 – Зародки кристалів карбонату кальцію (збільшено у 200 разів): а – утворення зародків кристалів  $\text{CaCO}_3$  у нагрітій воді; б – зростання зародків кристалів  $\text{CaCO}_3$  у нагрітій воді; в – перехід зародків кристалів у перенасиченому нагрітому розчині та аморфний стан; г – об'єднання *аморфних* зародків кристалів у перенасиченому нагрітому розчині у збільшені системи – міцели, що легко випадають із розчину та прилипають до поверхні, яка омивається водою

*Утворення відкладень у системах оборотного водопостачання під час контакту води із продуктом*

Карбонатні відкладення можуть утворюватися також під час безпосереднього контакту води із продуктом, коли вода виконує комплексну роль охолоджувача і середовища, що поглинає механічні домішки і розчинні сполуки. У цьому випадку хімічний склад оборотної води та її технологічні властивості формуються під впливом середовища – хімічного складу продукту,

з яким вона стикається, температури і тиску, – і не залежать від якості води, що додається.

Як приклад розглянемо систему оборотного водопостачання очищення газу доменних печей, де на тракті відведення води від газоочисних апаратів, у радіальних відстійниках, на зрошувачі градирень та у трубопроводах утворюються відкладення  $\text{CaCO}_3$ , що ускладнює роботу цих споруд.

Карбонатні відкладення містять також частинки руди, що не розплавилися у доменних печах, і незгорілого коксу. В утворенні відкладень беруть участь вуглекислота доменного газу, що переходить у воду в газоочисних апаратах, а також іони – гідрокарбонатні  $\text{HCO}_3^-$ , карбонатні  $\text{CO}_3^{2-}$  та кальцію  $\text{Ca}^{2+}$ , а в деяких випадках і цинку  $\text{Zn}^{2+}$ .

Таким чином, утворення карбонатного відкладення залежить від якостей і властивостей оборотної води у системі, а останні – від механічного та хімічного складу шихти, що завантажується у печі, від температури її плавлення, тиску та інтенсивності надходження повітря у печі, а також вмісту вуглекислоти у газі, що очищується за допомогою води. Вода в газоочисних апаратах «зустрічається» із механічними домішками та вуглекислотою, а також із розчиненими нею сублімаціями з шихти і, як наслідок, безперервно збагачується ними у вигляді бікарбонатів кальцію, магнію, цинку та інших елементів.

Із газоочисної апаратури відпрацьована вода потрапляє в умови, сприятливі для виділення кислоти і розпаду бікарбонатних сполук до карбонатних, які осідають на поверхнях всіх споруд системи оборотного водопостачання. Цей процес особливо посилюється після того, як вода повністю втрачає вільну вуглекислоту на градирні. Таким чином, в описаних процесах інтенсивно змінюються форми вуглекислоти.

Хімічний процес утворення відкладень на поверхнях системи оборотного водопостачання доменного газоочищення, що омиваються водою, аналогічний до описаного вище процесу в теплоносних системах.

Так само утворюються карбонатні відкладення у системах оборотного водопостачання, зокрема деяких інших виробництв. Однак можуть бути і такі процеси, коли вода набуває кислої реакції і викликає корозію металу і бетону.

Карбонатні відкладення у теплообмінних апаратах, трубопроводах та на градирнях утворюються також у разі прямого контакту охолоджуючої води з аміаком, що потрапляє в охолоджуючу воду через можливі нещільності у теплообмінних апаратах або в апаратах безпосереднього змішування (барометричних конденсаторах) на підприємствах азотної промисловості.

Водночас аміак  $\text{NH}_3$  розчиняється в оборотній воді з утворенням іона амонію  $\text{NH}_4^+$  і гідроксильного іона  $\text{OH}^-$



Потім гідроксильний іон  $\text{OH}^-$  і гідрокарбонатний іон  $\text{HCO}_3^-$  утворюють з іоном кальцію  $\text{Ca}^{2+}$  карбонатну сполуку



Одночасно можуть відбуватися інші реакції. Карбонатні відкладення, що утворюються під час витоків аміаку, дуже щільні і мають однорідну кристалічну структуру.

### 4.3 Теоретична оцінка стабільності води та практичні рекомендації щодо необхідності її обробки

До найбільш суттєвих компонентів, що визначають властивості води, належать сполуки вугільної кислоти, що зустрічаються в тому або іншому вигляді практично в усіх природних водах. Від наявності у воді вуглекислоти та концентрації її форм залежить стабільність води, тобто схильність до утворення карбонатних відкладень або корозії металу в системах водопостачання, особливо під час використання води в обороті як теплоносія (охолоджувача).

Співвідношення між різними формами вуглекислоти залежить за певної температури води від активності іонів водню (рН розчину) (рис. 4.7).

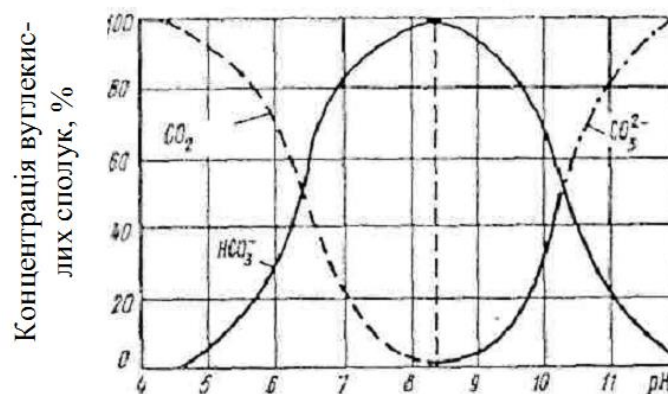


Рисунок 4.7 – Співвідношення різних форм вуглекислоти і рН води за температури 25 °C

У природних водах вуглекислота може бути у таких формах:

- вільної вуглекислоти  $\text{CO}_{2\text{вільн.}}$ , що перебуває у вигляді розчиненого у воді газу;
- недисоційованих молекул  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ;
- бікарбонатних іонів  $\text{HCO}_3^-$ ;
- карбонатних іонів  $\text{CO}_3^{2-}$ .

Заростання трубопроводів і обладнання різними відкладеннями, особливо карбонатом кальцію, а також інтенсивність їх корозії, значною мірою пов'язані із кількісними співвідношеннями наявних у воді різних вуглекислих сполук.

У системах водяного охолодження теплонавантажених елементів утворюються переважно відкладення карбонату кальцію під час втрати вільної вуглекислоти через нагрівання води. Тобто причиною їхнього виникнення є зрушення вуглекислотної рівноваги із підвищенням температури



Водночас відбувається розкладання бікарбонатних іонів  $\text{HCO}_3^-$  з утворенням карбонатних  $\text{CO}_3^{2-}$ , що реагують з іонами  $\text{Ca}^{2+}$  і створюють малорозчинні сполуки  $\text{CaCO}_3$ , що осаджуються на стінках трубопроводів.

Досвід експлуатації охолоджуючих систем свідчить, якщо карбонатна твердість оборотної води не є більшою за 2,5–3 мг-екв/л, відкладення карбонату кальцію не відбувається.

Крім температури на стабільність води впливає її хімічний склад. Якщо температура впливає на рівноважну лужність однозначно (із підвищенням температур рівноважна лужність зменшується), то залежність розчиненої лужності від сольового складу має складний характер:

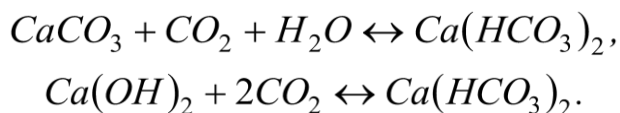
- підвищення у воді концентрації іонів магнію, хлоридів і сульфатів, а також наявність різних органічних домішок збільшує величину рівноважної лужності;
- присутність у воді іонів кальцію зменшує її значення.

*Стабільність* є одним із основних показників якості води.

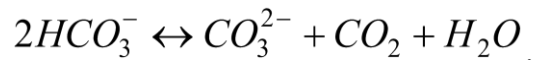
У практиці водопідготовки *стабільною* прийнято називати воду, що за визначеної температури не здатна виділяти нерозчинні сполуки карбонату кальцію та не є агресивною, тобто не руйнує конструкційні матеріали. Як основна умова такої стабільності є співвідношення між розчиненою у воді вільною вуглекислою та іонами кальцію.

*Вуглекислотна рівновага* – це рівновага між розчиненою у воді вуглекислою та іонами кальцію.

Вода, що містить надлишок вільної вугільної кислоти над рівноважною, називається *агресивною*. Під час контакту із бетоном або карбонатними плівками така вода спричиняє розчинення карбонатних складових і вапна за рівняннями



Вода, що містить надлишок (над рівноважним вмістом) гідрокарбонатів, тобто має підвищену лужність, називається *нестабільною*. Карбонатна рівновага у такій воді зміщується у бік розкладання гідрокарбонатів



За наявності іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  у нестабільній воді відбувається відкладення малорозчинних карбонату кальцію  $\text{CaCO}_3$  і основного карбонату магнію  $(\text{MgOH})_2\text{CO}_3$ .

Стабільність води може порушуватись через наявність агресивної вугільної кислоти, низького  $pH$ , перенасиченість води карбонатом кальцію або гідроксидом магнію, а також через підвищену концентрацію сульфатів або хлоридів, підвищення температури.

Стабільність води характеризується *показником стабільності С*. Існують два методи визначення цього показника: основний і допоміжний. Під час визначення із застосуванням основного методу показник стабільності  $C_o$  знаходять за такою формулою:

$$C_o = \frac{L_{\text{вих}}}{L_{\text{нас}}}, \quad (4.5)$$

де  $L_{\text{вих}}$  – лужність вихідної води, моль/л;

$L_{\text{нас}}$  – лужність води після насичення карбонатом кальцію, моль/л.

Під час визначення допоміжним методом показник стабільності  $C_d$  знаходять за такою формулою:

$$C_d = \frac{pH_{\text{вих}}}{pH_{\text{нас}}}, \quad (4.6)$$

де  $pH_{\text{вих}}$  – значення  $pH$  вихідної води;

$pH_{\text{нас}}$  –  $pH$  води, насиченої карбонатом кальцію.

Під час струшування води, що містить агресивну вугільну кислоту з карбонатом кальцію, він розчиняється, перетворюючись на гідрокарбонат кальцію. Внаслідок цього лужність і  $pH$  води підвищуються. Якщо вода перенасичена карбонатом кальцію, то відбувається його відкладення і зменшення лужності та  $pH$  води.

Отже, у разі  $C > 1$  вода нестабільна і схильна до відкладення карбонатів. У разі  $C < 1$  вода агресивна, схильна до розчинення карбонатних відкладень і бетону. Для стабільної води  $C = 1$ .

Стабільність води можна оцінити також за значенням індексу

стабільності  $J$ , або «індексу Ланжелє», розрахованому за таким рівнянням:

$$J = pH_{вих} - pH_{нас}. \quad (4.7)$$

Величину  $pH_{нас}$  розраховують на підставі даних про дисоціацію вугільної кислоти і розчинність карбонату кальцію за певної температури води  $f_1(t)$ , концентрацію іонів кальцію  $f_2(Ca^{2+})$ , лужність  $f_3(L)$  і загальний солевміст води  $f_4(P)$ . Значення функцій від заданих величин визначають за номограмами, наведеними на рисунку 4.8.

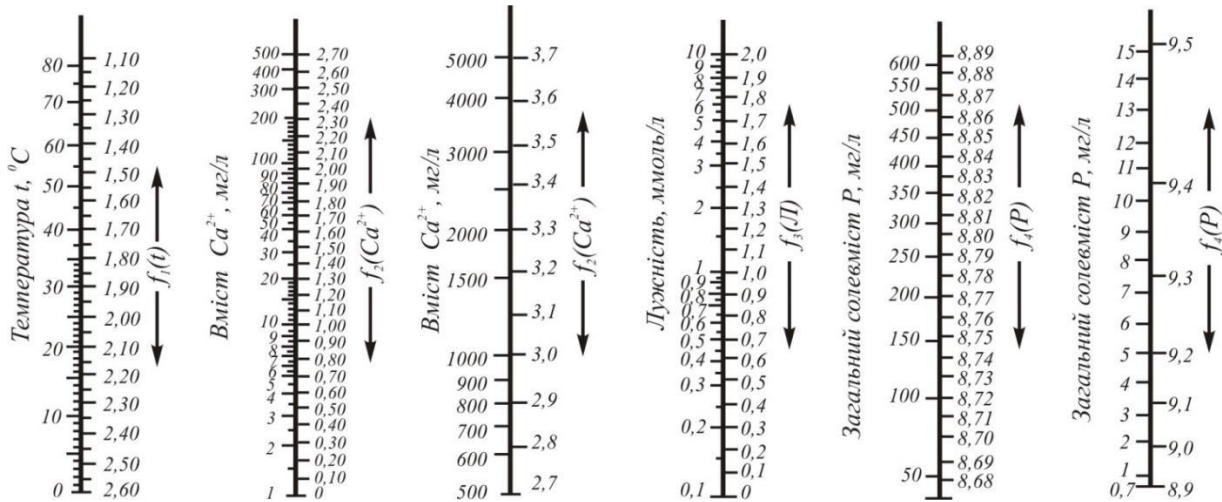


Рисунок 4.8 – Номограма для визначення допоміжних величин індексу насичення води карбонатом кальцію

Значення  $pH_{нас}$ , що відповідає рівноважному стану системи за цих умов, розраховується за такою формулою:

$$pH_{нас} = f_1(t) - f_2(Ca^{2+}) - f_3(L) + f_4(P). \quad (4.8)$$

Воду вважають стабільною, якщо індекс стабільності  $J$  дорівнює нулю.

У разі  $J > 0$  вода схильна до відкладення карбонату кальцію і є нестабільною. У разі  $J < 0$  вода агресивна щодо бетону і металу та спричинює їхню корозію. Оцінку стабільності води здійснюють чотири рази на рік – по одному разу на сезон.

Потрібно також зазначити, що під час вказаного вище процесу утворення відкладень є інші шляхи визначення стабільності води. Деякі автори (Кучеренко, Крушель та інші) вважають, що показником стабільності води є рівноважна лужність.

Довгий час для визначення рівноважної лужності води у системах водяного охолодження використовували емпіричну формулу Крушеля. Однак ця формула застосовується в обмеженому інтервалі температур і вона

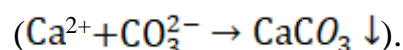
не враховує окремого впливу солей твердості, сульфатів та хлоридів. На підставі дослідів, проведених в інституті «ВНДПЧерметенергоочистка», та узагальнення експериментальних даних було встановлено вплив компонентів сольового складу (кальцію, магнію, сульфатів, хлоридів) на рівноважну лужність води і виведено формулу для визначення величини рівноважної лужності.

Розроблена в інституті «ВНДПЧерметенергоочистка» методика визначення величини рівноважної лужності дає можливість оцінити стабільність води у системах водяного охолодження за різницею між реальною лужністю  $L_p$  і рівноважною лужністю  $L$ .

Водночас, якщо різниця  $(L_p - L) < 0$ , вода характеризується схильністю до корозії, якщо ця різниця дорівнює 0, вода стабільна, а якщо  $(L_p - L) > 0$ , вода схильна до утворення відкладень. Кількісна оцінка величини рівноважної лужності забезпечує правильний вибір методу стабілізаційної обробки води.

Як вже було сказано, у річковій, підземній, оборотній та стічній воді кожній концентрації іонів  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{Ca}^{2+}$  відповідає певна концентрація розчиненої  $\text{CO}_2$ , яка залежить від констант рівноваги першої  $K_1$  та другої  $K_2$  ступенів дисоціації вугільної кислоти, а також від константи добутку активностей ( $\text{CaCO}_3$ ). Ця величина розчиненої  $\text{CO}_2$  називається «рівноважною» вуглекислотою.

У разі нестачі  $\text{CO}_2$  порівняно із рівноважною концентрацією існуватиме тенденція до розпаду частини бікарбонатних іонів ( $2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), що призведе до додаткового утворення карбонатних іонів та виділення з розчину осаду у вигляді карбонату кальцію за рівнянням



Якщо вміст у воді вільної вуглекислоти збігається з необхідною рівноважною концентрацією, то з води не виділяється осад карбонату кальцію, і вона буде стабільною. Надлишок  $\text{CO}_2$  у воді може розчиняти  $\text{CaCO}_3$ , як це видно із рівняння ( $\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ ).

Воду, що містить вільну вуглекислоту у концентрації, що перевищує рівноважну, називають агресивною.

Отже, для теоретичної оцінки стабільності води застосовується метод В. Ф. Ланжельє, яким встановлюється ступінь відхилення досліджуваної води від рівноважного стану за величиною концентрації водневих іонів – дійсної величині  $\text{pH}$  і обчисленої  $\text{pH}_v$  за даними хімічного аналізу (концентрації солей або сухого залишку  $P$ , лужності  $L$  і вмісту кальцію  $\text{Ca}^{2+}$ ) за температури, з якої

вона використовуватиметься: у разі  $pH = pH_v$  – вода стабільна; у разі  $pH > pH_v$  – вода некорозійна; у разі  $pH < pH_v$  – вода корозійна.

Цей метод може бути лише якісним показником «схильності» природної води до того чи іншого процесу, оскільки співвідношенням  $pH$  і  $pH_v$  визначаються не всі властивості води щодо відкладень або корозії металів і бетону, а лише ті, які залежать від наявності у воді вуглекислоти під час використання цієї води у прямоочних системах або системах із повторним використанням (без проміжного охолодження). Для систем оборотного водопостачання цей метод не застосовується. Не придатний він тим більше і під час використання стічних вод, оскільки за сучасними поглядами загальна лужність води визначається більш широким спектром компонентів.

Метод аналізу, заснований на безпосередньому випробуванні води, дає точніші результати, ніж розрахунковий. Однак і він для оборотних та стічних вод недостатньо надійний.

Деякими джерелами рекомендується оцінку ймовірності утворення відкладень у системі оборотного водопостачання без застосування обробки води проводити за величиною допустимої граничної лужності оборотної води  $L_{об.доп.}$ , що обчислюється з огляду тільки на концентрацію розчинених солей в оборотній воді  $P$ , вмісту  $CO_2$  і  $Ca^{2+}$  у додатковій воді та температури води  $t_{охол.}$

Водночас за загальною лужністю природної води  $L_0$  обчислюють лужність оборотної води  $L_{об.}$ , яка повинна встановлюватися у певній системі за умови, що не буде розпаду бікарбонатів. Якщо  $L_{об.} \leq L_{об.доп.}$ , обробка води не потрібна, якщо  $L_{об.} > L_{об.доп.}$ , потрібно застосувати обробку охолоджуючої води для запобігання карбонатним відкладенням.

Цей метод виявився непридатним ні для оборотних, ні для природних вод.

**Практичні поради.** Необхідність обробки води для запобігання утворенню карбонатних відкладень у проєктах систем оборотного водопостачання необхідно встановлювати на основі досвіду експлуатації аналогічних систем на воді цього джерела водопостачання або попередніх досліджень на моделі системи оборотного водопостачання з урахуванням конкретних умов.

За відсутності досвіду експлуатації та даних експериментальних досліджень обробку охолоджуючої води необхідно передбачати під час заповнення систем водою: з підземних джерел за її карбонатної твердості (лужності) понад 1,5 мг-екв/л; з поверхневих джерел – річок та водосховищ середньої смуги або очищеними стічними водами – понад 2,5 мг-екв/л; з річок та водосховищ північних районів, а також гірничо-льодовиковим живленням –

понад 3,5 мг-екв/л. У разі карбонатної твердості додаткової води, яка менша від зазначених значень, можна передбачати тільки освіження оборотної води (продування системи) шляхом безперервного скидання частини її та заміни водою із джерела з використанням продувних вод у циклах, що не висувають особливих вимог до якості води.

#### **4.4 Методи запобігання утворенню карбонатних відкладень**

Як показує досвід експлуатації, під час роботи систем водопостачання у газоочисних апаратах і трубопроводах відбувається інтенсивне утворення щільних сольових відкладень. Це викликає серйозні ускладнення в роботі доменних печей, кисневих конверторів, агломераційних машин та інших металургійних агрегатів. Для вирішення цієї проблеми важливе значення має розробка і впровадження високоефективних засобів стабілізаційної обробки води з метою скорочення або повного виключення продувок з оборотних циклів, ліквідації відкладень солей твердості й запобігання корозії у газоочисних апаратах, водоохолоджуючих елементах і трубопроводах.

Процес утворення карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання газоочисток конверторних цехів відбувається у дві стадії:

1. Під час виплавки сталі значна кількість вапна ( $\text{CaO}$ ) у вигляді пилу потрапляє до трубопроводу, що відводить газ. У процесі вологої очистки газів, що утворюються від конверторів, цей пил вловлюється та взаємодіє з утворенням гідроксиду кальцію.

2. Під час повторного використання води, що містить гідратну лужність, у результаті реакції з вуглекислим газом утворюється карбонат кальцію, що осаджується на внутрішній поверхні апаратів газоочисток у вигляді щільних сольових відкладень.

Тому деякі відомі методи запобігання щільним сольовим відкладенням, що застосовують у практиці водопостачання (підкислення, карбонізація) неприйнятні у системах водопостачання газоочисток конверторних цехів внаслідок низької ефективності і великих витрат реагентів.

Більш ефективним для подібних систем оборотного водопостачання є метод обмеження розчинення вапна, що потрапляє у воду, і зменшення гідратної лужності стічних вод. ДП УкрДНТЦ «Енергосталь» запропоновано два типи реагентів для здійснення цього методу – силікатний реагент (рідке скло) і фосфоровмісний реагент (триполіфосфат натрію).

Отже, для систем оборотного водопостачання газоочистки конверторних цехів вибір методу стабілізаційної обробки залежить від величини гідратної

лужності й температури води.

Якщо величина гідратної лужності більша за 5 мг-екв/л, а температура оборотної води нижча за 35 °С, найбільш ефективним способом запобігання щільним сольовим відкладенням є обробка силікатним реагентом. Під час обробки води силікатним реагентом інтенсивність відкладень карбонату кальцію зменшується на 99 %. Підвищення температури води зменшує ефективність силікатного реагенту.

*Силікатний реагент* – це склоподібний продукт, що утворюється з лужних силікатів. Склад силікатного реагенту виражається формулою  $R_2O \cdot nSiO_2$ , де  $R_2O$  – лужні оксиди.

Рідке скло має високу реакційну здатність, зокрема рідке скло реагує із вуглекислим газом. Під час пропускання вуглекислого газу через рідке скло відбувається його желатинізація у результаті розкладання силікату натрію із утворенням кремнегелю.

Висока реакційна здатність, різноманітність продуктів реакції і сорбційні властивості рідкого скла є передумовою використання реагенту для запобігання відкладенням і обмеження розчинення вапна у системах водопостачання газоочисток із високим винесенням вапняного пилу.

Під час обробки води оптимальними дозами рідкого скла (50 мг/л) гідратна лужність оборотної води зменшується із 20–25 мг-екв/л до 0,5–1 мг-екв/л.

Рідке скло має сорбційну здатність щодо вуглекислого газу, активує вуглекислий газ і підвищує його реакційну здатність. У результаті частинки вапна вкриваються плівкою нерозчинного карбонату кальцію, а вапно, що частково розчинилося, перетворюється на розчинний бікарбонат кальцію.

Попередня обробка води перед газоочищенням рідким склом у період випробувань дозволила обмежити розчинення вапна і перевести газоочистку на оборотне водопостачання.

Для забезпечення працездатності реагентної обробки необхідне виконання таких умов:

- температура води, що потрапляє на газоочищення, не повинна перевищувати 35 °С;
- неприпустиме надходження лужних вод з апаратів для згущування шламової пульпи та зневоднення осаду (переливань згущувача, переливань вакуум-фільтрів, фільтрату освітленої води, що потрапляє на газоочищення).

Для зручності дозування рідке скло, що є розчином силікату натрію із вмістом  $SiO_2$  до 30 %, розводять до концентрації  $SiO_2$  у межах 2–5 %.

У системах водопостачання, коли оборотна вода містить гідратну лужність (аглофабрики, розливальні машини), карбонатні відкладення утворюються на ділянках підживлення технічною водою в результаті взаємодії солей постійної і тимчасової твердості. Подібне явище відбувається також під час змішування стічних вод доменних і конверторних газоочисток. Для боротьби із відкладеннями доцільно застосовувати технологічні заходи, що забезпечують необхідний для «старіння» кристалів карбонату кальцію час. Одним із таких заходів, що забезпечать стабільність води у цьому випадку, є змішування стічних вод перед очисними спорудами.

Необхідність обробки води для запобігання карбонатним відкладенням визначається лужністю свіжої води, що додається (підживлюючої) і коефіцієнтом випаровування оборотної води  $K_K$ , якщо

$$L_{\text{дод}} \cdot K_K \geq 3, \quad (4.9)$$

де  $L_{\text{дод}}$  – лужність свіжої (підживлюючої) води, мг-екв/л;

$K_K$  – коефіцієнт концентрування добре розчинних солей оборотної води.

У разі невеликої лужності підживлюючої води безнакипна робота теплообмінної апаратури може бути забезпечена шляхом продувки оборотного водопостачання. У цих випадках величина продувки у відсотках від витрати оборотної води буде дорівнювати

$$P_3 = \frac{T_{\text{карб.дод}} \cdot P_1}{T_{\text{карб.об}} - T_{\text{карб.дод}}} - P_2, \quad (4.10)$$

де  $T_{\text{дод}}$  – карбонатна твердість додаткової води, мг-екв/л;

$T_{\text{об}}$  – гранична твердість оборотної води, мг-екв/л.

Концентрація солей оборотної води зростає дуже швидко, але потім із підвищенням концентрації зростає також кількість солей, що виводиться за рахунок бризковинесення та продувки. Водночас із додатковою водою до системи постійно надходить однакова кількість солей. Таким чином, процес зростання концентрації солей сповільнюється.

Гранична концентрація солей твердості у встановленому режимі буде зменшуватися зі збільшенням величин продувки. Гранична величина коефіцієнта концентрування досягається, якщо режим остаточно встановився.

$$K_K = \frac{C_{\text{об}}}{C_n} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3}, \quad (4.11)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – безповоротні втрати оборотної води під час охолодження на випаровування і винесення вітром, %;

$P_3$  – величина продувки, %.

Продувка системи ефективна, якщо карбонатна твердість доданої води значно нижча за карбонатну твердість води у системі. Інакше потрібна настільки велика витрата підживлюючої води, що додавання її буде просто неекономічним, і тому вигідніше буде застосовувати хімічну обробку води. Додаткова вода обов'язково повинна очищуватися від зависі та часток біологічного походження, що також можуть відкладатися у теплообмінниках і погіршувати їхній стан.

У разі завищеної лужності підживлюючої води найбільш поширеними методами реагентної обробки води є підкислення, фосфатування, рекарбонізація.

У низці випадків для обробки виробничих стічних вод, наприклад, металургійних заводів, можуть бути застосовані відходи виробництва. Для запобігання випадінню карбонатних відкладень у системі оборотного водопостачання устаткування очистки доменного газу застосовують обробку води вуглекислою, що міститься у димових газах. У результаті такої обробки (рекарбонізації) у газоочисних апаратах, трубопроводах і градирнях інтенсивних карбонатних відкладень не спостерігається.

На сьогодні розроблено велику кількість методів протинакипної обробки води. Це обумовлено різноманітністю умов експлуатації оборотних систем водопостачання. Умовно всі методи можна поділити на *реагентні* (ті, що оснований на додаванні в оборотну або підживлюючу воду реагентів) і *безреагентні (фізичні)*.

До першої групи належать регулювання продувки, підкислення, рекарбонізація, реагентне і катіонітне пом'якшення, знесолення. До другої групи – фосфатування, додавання комплексонів, фізичні методи. Кислотно-фосфатна обробка води є комбінованим методом запобігання випадінню щільних сольових відкладень.

Вибір того чи іншого засобу обробки води з метою запобігання карбонатних відкладень залежить переважно від якості вод, що використовують, і місцевих умов (конструкції теплообмінних апаратів, температури продукту, що охолоджують, ступеня нагріву охолоджуючої води та швидкості її руху в апаратах, типу охолоджувача оборотної води тощо).

Отже, боротьбу із відкладеннями карбонату кальцію у теплообмінних апаратах та трубопроводах систем оборотного водопостачання можна вести такими способами, як:

1) безперервне додавання до системи оборотного водопостачання води із меншою карбонатною жорсткістю під час скидання частини відпрацьованої

(оборотної) води із системи (за допомогою продувки);

2) підкислення;

3) додавання в оборотну воду речовин, що гальмують процес кристалізації карбонату кальцію (фосфатування);

4) спільна обробка води підкисленням та фосфатуванням;

5) відшкодування втрат рівноважної вуглекислоти у системі оборотного водопостачання шляхом залучення вуглекислоти димових газів (рекарбонізація);

б) пом'якшення додаткової води вапном із освітленням, натрій-катіонуванням або водень-катіонуванням із «голодною» регенерацією.

Залежно від величини карбонатної твердості води (не забрудненої поверхнево-активними речовинами), спосіб обробки можна обирати за таблицею 4.1, складеною на підставі численних досліджень для моделей і практик експлуатації.

Для води річок та водосховищ північних районів, а також з льодовиковим типом живлення зазначену в таблиці карбонатну твердість (лужність) потрібно підвищити на 1 мг-екв/л.

Під час нагрівання води у виробництві нижче за 40 °С із температурним перепадом  $\Delta t \leq 5^0$ , рекомендована у таблиці величина карбонатної твердості може бути збільшена на 0,5–1 мг-екв/л.

Під час підкислення додаткової води необхідно зважати на те, щоб у оборотній воді вміст іонів  $\text{Cl}^-$  і  $\text{SO}_4^{2-}$ , був не більшим за 350–600 мг/л, а загальна лужність  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  цієї води була не меншою за 2 мг-екв/л, щоб уникнути розвитку корозійних процесів (на зменшення карбонатної твердості води на 1 мг-екв/л витрачається 49 мг/л 100 %-вої сірчаної кислоти, водночас у воду надходять іони  $\text{SO}_4^{2-}$  у кількості 48 мг/л).

Найбільш надійним буде дослідження термостабільності кожної води, а також методів її обробки з урахуванням конкретних умов.

Таблиця 4.1 – Методи обробки охолоджуючої води (орієнтовно) для запобігання утворенню карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання під час нагрівання води до 40–65 °С та охолодження на градирнях або у бризкальних басейнах

Карбонатна твердість (лужність) природної води, мг-екв/л		Методи обробки води	Умова
річки, водосховища середньої смуги	підземні джерела		
1	2	3	4
< 2,5	< 1,5	Освіження оборотної води (продування системи)	
2,5–4	1,5–3	Підкислення додаткової води. Допустимо фосфатування додаткової нової оборотної води у разі обов'язкового хлорування останньої. Можлива і рекарбонізація оборотної води	За наявності димових газів, що містять CO <sub>2</sub> , та невисокого концентрування (упарювання)
2,5–5	1,5–5	Підкислення додаткової води	за умови обмеження концентрації $SO_4^{2-}-SO_4^{2-}$
		Рекарбонізація оборотної води	за наявності димових газів та невисокого концентрування
4–6	3–5	Підкислення додаткової води та фосфатування оборотної води (спільна обробка)	-
> 4–5	–	пом'якшення додаткової води вапном з освітленням	якщо вода і без того потребує освітлення
	4–5	пом'якшення частини або всієї додаткової води Na- або H-катіонуванням з «голодною» регенерацією	Якщо вода не потребує попереднього освітлення

#### 4.5 Дослідження термостабільності води та ефективності методів запобігання утворенню карбонатних відкладень

Термостабільність води та ефективність її обробки тим чи іншим методом для запобігання утворенню карбонатних відкладень досліджуються в натурних умовах та на моделі. У тому та іншому випадку критерієм можуть бути зміни якості води за коефіцієнтами концентрування окремих іонів або їхньої суми (загального солемісту) і величина швидкості відкладення карбонатів.

Ступінь підвищення концентрації розчинених речовин (нелетких і тих, що не утворюють осаду) називають коефіцієнтом концентрування або коефіцієнтом упарювання. Чисельне значення цього коефіцієнта може бути таким:

а) за упарюванням води

$$K_B = \frac{W_{\text{вип}} + W_{\text{ун}} + W_{\text{скид}}}{W_{\text{ун}} + W_{\text{скид}}} = \frac{W_{\text{дод}}}{W_{\text{дод}} - W_{\text{вип}}}; \quad (4.12)$$

б) за концентруванням солей

$$K_p = \frac{P_{\text{об}}}{P_{\text{дод}}} \quad \text{або} \quad K_{Cl} = \frac{Cl_{\text{об}}^-}{Cl_{\text{дод}}^-}, \quad (4.13)$$

де  $W_{\text{вип}}$  – втрати води із системи на випаровування;

$W_{\text{ун}}$  – втрати води із системи через винесення вітром,;

$W_{\text{скид}}$  – скидання води із системи для освіження (продувка);

$P_{\text{об}}, P_{\text{дод}}$  – концентрація розчинених в оборотній та додатковій воді солей;

$Cl_{\text{об}}^-, Cl_{\text{дод}}^-$  – те саме хлоридного іона.

У практиці для контролю у системах оборотного водопостачання зазвичай використовується коефіцієнт концентрування хлоридного іона  $K_{Cl}$ , величина якого порівнюється із коефіцієнтами концентрування карбонатної твердості, кальцію або інших іонів.

$$K_{Cl} = \frac{Cl_{\text{об}}^-}{Cl_{\text{дод}}^-},$$

$$K_{\text{тв.карб}} = \frac{T_{\text{карб.об}}}{T_{\text{карб.дод}}}, \quad K_{Ca} = \frac{Ca_{\text{об}}^{2+}}{Ca_{\text{дод}}^{2+}},$$

Під час хлорування води замість хлоридного іона  $Cl^-$  концентрування контроль в системах оборотного водопостачання здійснюють за іоном магнію  $Mg^{2+}$ .

У діючих охолоджуючих системах оборотного водопостачання із градієнтами коефіцієнт концентрації може змінюватися в широких межах, але у

багатьох випадках він становить влітку 2 і взимку 1,5. Зі збільшенням кількості води, що скидається (і додається до системи), коефіцієнт концентрування падає, одночасно зменшується і коефіцієнт використання води.

Порівнюючи величини коефіцієнтів концентрування хлоридного іона, карбонатної твердості або інших речовин, отримані щодо води та обчислені за даними аналітичного визначення, можна отримати уявлення про надходження нових речовин і про випадання їх в осад (відкладення), тобто про термостабільність води.

*Швидкість відкладень.* Дані хімічного аналізу води та величина коефіцієнта концентрування ще не дають уявлення про її термостабільність. Доцільно вести контроль за швидкістю відкладень. Зважаючи на труднощі його здійснення безпосередньо на теплопередавальній поверхні для практичних цілей доводиться обмежуватися встановленням відносної швидкості відкладення на індикаторних пластинках (скляних або сталевих «уловлювачів»).

За різницею ваги пластинок (за умови, що одночасно не відбувається корозії металу), що експонуються у досліджуваній воді (із відкладеннями і без них) і висушених протягом 48-ми годин, визначається загальна швидкість відкладень. Після хімічного аналізу цих відкладень та визначення вмісту в них кальцію обчислюється швидкість власне карбонатних відкладень.

Швидкість відкладень може бути:

1) ваговою

$$C_o = \frac{M_2 + M_1}{F \cdot T}, \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}; \quad (4.14)$$

2) лінійною

$$h_o = 0,73 \frac{C_o}{\rho_o}, \text{ мм місяць}. \quad (4.15)$$

де  $M_1$  і  $M_2$  вага пластинки до та після експозиції (з відкладеннями) у грамах;

$F$  – площа поверхні пластинки (з усіх боків) у квадратних метрах;

$T$  – тривалість експозиції пластинки у годинах;

0,73 – коефіцієнт перерахунку;

$\rho_o$  – щільність (об'ємна вага) карбонатного відкладення у  $\text{г/см}^3$ .

За відсутності даних дослідження можна вважати  $\rho_o$  рівним ( $\text{г/см}^3$ ): для пухких карбонатних відкладень із біологічними обростаннями – 1,4–2,55 (середнє 1,5), для щільних карбонатних відкладень – 2,12–2,54 (середнє 2,28), для залізистих карбонатних відкладень – 3.

Результати обчислень зазначаються у журналі, потім знаходиться середнє значення швидкості відкладень  $C_0$  і  $h_0$  для всіх пластинок. Порівняння одержаних результатів зі швидкістю відкладень, наведених у таблиці 4.2 (яка складена із численних дослідів), дозволяє віднести досліджувану воду до тієї чи іншої групи термостабільності та вирішити питання про доцільність освіження оборотної води або її обробки тим чи іншим методом.

Таблиця 4.2 – Шкала термостабільності охолоджуючої води

Група термостабільності води	Швидкість карбонатних відкладень		Бал термостабільності води
	у $г/м^3 \cdot год$	у $мм/місяць$	
Абсолютно термостабільна (можливо корозійна)	0	0	1
Термостабільна	< 0,1	< 0,033	2
	0,1–0,25	0,033–0,08	3
Обмежено термостабільна	0,25–0,5	0,08–0,16	4
	0,5–1	0,16–0,33	5
Не термостабільна	1	> 0,33	6

Під час дослідження швидкості відкладень у натурних умовах індикаторні платівки, зібрані у касету, встановлюються у потік води за теплообмінним апаратом (наприкінці або у трубопроводі). Під час дослідження моделі пластинки встановлюються у замкненій спеціальній касеті.

Ступінь нагрівання води (її температура) та температурний перепад, як було видно із теоретичного розгляду вуглекислотної рівноваги, значно впливають на процес розпаду гідрокарбонатного іона та утворення карбонату кальцію. Це видно із рисунку 4.9, побудованого за даними дослідів, проведених на напіввиробничому устаткуванні з нагріванням оборотної води до 50–93 °С із подальшим охолодженням на градирні до 30–35 °С.

Чим вища температура нагрівання води, за інших однакових умов досліду, тим швидше (раніше та інтенсивніше) відбувається зміна карбонатної твердості із розпадом гідрокарбонатного іона, особливо під час нагрівання води понад 70 °С. Втрата нагрітої в оборотному циклі води в результаті її випаровування, що визначає коефіцієнт концентрування (або ступінь упарювання), природно, тим більша, чим вища температура нагрівання води у системі.

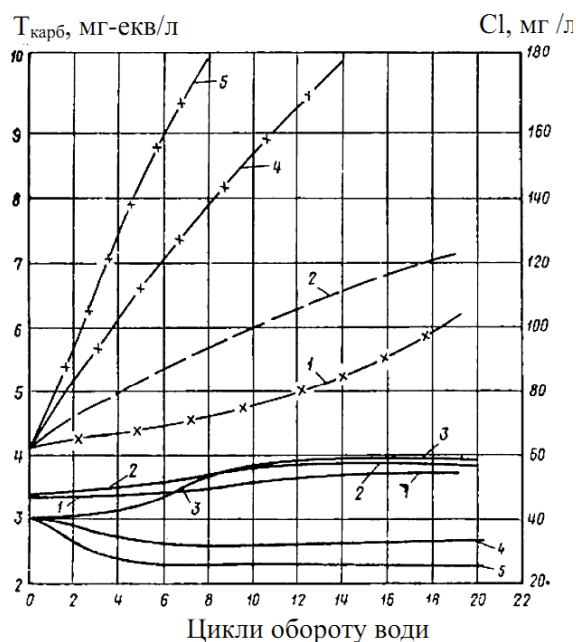


Рисунок 4.9 – Залежність карбонатної твердості  $J_K$  від ступеня нагрівання оборотної (річкової) води з подальшим охолодженням до 30–35 °С і концентрації  $C_1$ :

- 1 – у разі нагрівання до 50 °С; 2 – у разі нагрівання до 65 °С; 3 – у разі нагрівання до 70 °С; 4 – у разі нагрівання до 88 °С;  
5 – у разі нагрівання до 93 °С

У лабораторних дослідах та практиці оборотного водопостачання спостерігається, що у разі низького теплонпруження швидкість утворення карбонатних відкладень менша, ніж у разі високого теплонпруження за інших рівних умов. Таке явище можна пояснити тим, що нагрівання частини води в апараті з високим теплонпруженням супроводжується місцевим кипінням біля теплопровідної стінки з одночасною конденсацією пари. Під час пароутворення відбувається швидке і повне розкладання бікарбонату кальцію і, очевидно, швидка кристалізація карбонату кальцію, що випадає. За умов низького теплообміну процес розкладання бікарбонату кальцію хоч і відбувається такою ж мірою, але процес кристалізації  $CaCO_3$  закінчується вже за межами апарату.

Наявність в охолоджуючій воді завислих мінеральних речовин прискорює процес утворення та відкладення кристалів карбонату кальцію. Завислі речовини слугують центрами кристалізації  $CaCO_3$ .

Органічні речовини, наявні в оборотній воді (у нерозчиненому та розчиненому стані), за тих самих умов гальмують як процес розпаду бікарбонатного іона, так і утворення відкладень  $CaCO_3$ . Можна вважати, що органічні речовини, перебуваючи в колоїдному стані і начебто огортаючи

зародки кристалів  $\text{CaCO}_3$ , певною мірою перешкоджають їх зростанню і відкладенню на стінках холодильників; аналогічну роль відіграють і поверхнево-активні речовини.

Така властивість органічних колоїдних домішок, наявних у більшій чи меншій кількості у більшості поверхневих вод, є основною причиною зазначеної вище властивості цих вод не виділяти карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання, якщо карбонатна твердість води поверхневих джерел не перевищує 2,5–3 мг-екв/л, інколи ж і більше.

Зі збільшенням загального вмісту солей у воді величина рН підвищується, тобто збереження карбонатної рівноваги у воді стає можливим у разі меншого вмісту у воді вільної вуглекислоти. Однак, як уже зазначалося вище, необхідно особливо враховувати наявність у воді іонів  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , а у деяких випадках і  $\text{Al}^{3+}$  (коли останній потрапляє у воду зі стоками промислових підприємств), оскільки за наявності цих іонів процес випадання карбонату кальцію може ускладнитися через випадання відкладень карбонату магнію, гідрату окису магнію, заліза та алюмінію з відповідним підвищенням обсягу відкладень.

Наявність в оборотній воді іонів  $\text{Cl}^-$  і  $\text{SO}_4^{2-}$ , пов'язаних з іонами  $\text{Ca}^{2+}$ , може прискорювати виділення та відкладення  $\text{CaCO}_3$ ; наявність у воді тих самих іонів  $\text{Cl}^-$  і  $\text{SO}_4^{2-}$ , пов'язаних з іонами  $\text{Mg}^{2+}$  і  $\text{Na}^+$ , може уповільнювати цей процес. Однак роль окремих показників якості води, особливо під час використання стічних вод у системах оборотного водопостачання, залишається нез'ясованою та підлягає подальшому вивченню.

#### 4.6 Розведення та освіження оборотної води

Кількість оборотної води, яку необхідно скинути для підтримки максимально допустимої (максимальної) величини карбонатної твердості оборотної води, визначається за формулою

$$W_{\text{скид}} = \frac{T_{\text{карб.дод}} \cdot W_{\text{вип}}}{T_{\text{карб.мах}} - T_{\text{карб.дод}}} - (W_{\text{ун}} + W_{\text{вир}}), \text{ м}^3/\text{год}, \quad (4.16)$$

а кількість води, яку водночас необхідно додавати до системи, визначається за формулою

$$W_{\text{дод}} = \frac{T_{\text{карб.дод}} \cdot W_{\text{вип}}}{T_{\text{карб.мах}} - T_{\text{карб.дод}}}, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.17)$$

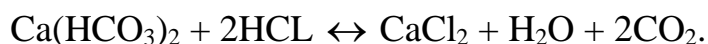
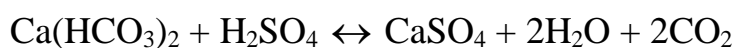
де  $T_{\text{карб.дод}}$  – карбонатна твердість води, що додається до системи, у мг-екв/л;

$W_{\text{вип}}$ ,  $W_{\text{ун}}$  та  $W_{\text{вир}}$  – втрати оборотної води на випаровування, винесення та виробництво, у мг/год.

Розведення та освіження оборотної води шляхом скидання частини із системи та заміни її свіжою водою можна застосовувати за умови використання цієї скидної води іншими споживачами, які не висувають суворих вимог до неї за величиною карбонатної твердості та солевмісту. Можна скоротити скидання оборотної води, якщо обробити її, наприклад, кислотою для зменшення карбонатної твердості.

#### **4.7 Підкислення води як метод запобігання карбонатних відкладень**

*Підкислення води* є одним із традиційних розповсюджених методів обробки води. У виробництві з цією метою зазвичай використовують сірчану і соляну кислоту. Підкислення полягає у зменшенні лужності води шляхом перетворення бікарбонатів на добре розчинні солі некарбонатної твердості згідно із реакціями



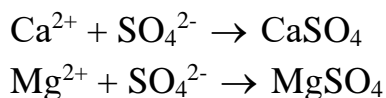
Як видно із реакції, під час підкислення води одночасно зі зменшенням бікарбонатів кальцію відбувається видалення вільної вуглекислоти, що, зі свого боку, забезпечує стабільність залишкових бікарбонатів.

Перевагами кислотної обробки води є можливість її застосування для великих діапазонів карбонатної твердості води. Підкислення використовують за будь-яких величин лужності, загальної твердості природних вод і за будь-яких коефіцієнтів концентрування вод у системах.

Підкислення води вважається універсальним методом запобігання утворенню карбонатних відкладень в охолоджувальних системах оборотного водопостачання. Із додаванням до води сильної кислоти зменшується її лужність, водночас необхідно якусь частину карбонатної твердості перевести в еквівалентну кількість некарбонатної, щоб запобігти можливості утворення та випадання (відкладення) карбонату кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ). За рахунок реакції кислоти із бікарбонатами виділяється вільна вуглекислота, яка може частково відшкодувати втрату «рівноважної» вуглекислоти під час нагрівання і розбризкування води.

Зазвичай проводиться підкислення води, що додається до системи оборотного водопостачання. Карбонатна твердість води поверхневих джерел зменшується до 2–2,5 мг-екв/л, води підземних джерел – до 1–1,5 мг-екв/л. Для підкислення застосовується сірчана кислота як дешевша, проте може використовуватися й соляна. Застосовують міцну чи розведену (відпрацьовану) кислоту.

Зі зниженням вмісту у воді бікарбонатних іонів  $\text{HCO}_3^-$  зменшується необхідна кількість рівноважної вуглекислоти, оскільки солі, що зумовлюють карбонатну твердість, переводяться в еквівалентну кількість солей (сульфатів), які зумовлюють некарбонатну твердість та мають високий ступінь розчинності і не випадають в осад



Потрібно мати на увазі, що під час обробки сірчаною кислотою у воді підвищується концентрація сульфатного іона  $\text{SO}_4^{2-}$  на 48 мг/л на кожен мг-екв/л карбонатної твердості, що зменшується кислотою. Це обмежує діапазон застосування підкислення, щоб не допустити занадто великої концентрації сульфатного іону в оборотній воді, коли виникає небезпека розвитку корозійних процесів.

Дозу технічної кислоти можна визначити за такою формулою:

$$D_k = e \cdot \Delta T_{\text{карб}} \frac{100}{C_k} = e \cdot \left( T_{\text{карб.дод.вих}} - \frac{W_{\text{дод}} - W_{\text{вих}}}{W_{\text{дод}}} T_{\text{карб.об}} \right) \frac{100}{C_k} \quad (4.18)$$

де  $e$  – еквівалентна вага кислоти мг/мг-екв (для сірчаної кислоти 49, для соляної – 36,5);

$T_{\text{карб.дод.вих}}$  – карбонатна твердість додаткової вихідної (не обробленої кислотою) води у мг-екв/л;

$C_k$  – вміст  $\text{H}_2\text{SO}_4$  або  $\text{HCl}$  у технічній кислоті у відсотках.

У літературі карбонатну твердість оборотної води у формулі (4.18), за якої не повинно відбуватися відкладень (у разі підкислення додаткової води), рекомендують визначати за такою формулою:

$$T_{\text{карб.об}} = 0,1N \sqrt{4,84N^2(W_{\text{дод}} - W_{\text{вих}})^2 + (W_{\text{об}} - W_{\text{дод}})(\text{CO}_2)_{\text{охол}} + 44 \cdot W_{\text{дод}} \cdot T_{\text{карб.дод.вих}}} - 0,22N^2(W_{\text{дод}} - W_{\text{вих}}), \text{ мг/л} \quad (4.19)$$

$$\text{де } N = \frac{\Psi}{\sqrt{K_g(\text{Ca}^{2+})_{\text{дод}}}}$$

тут  $\Psi$  – величина, яка залежить від загального вмісту солей в оборотній воді  $S_{\text{об}}$  і температури її після охолодження  $t_{\text{охол}}$ , яку можна наближено обирати за таблицею 4.3, обчисливши попередньо  $S_{\text{об}} = S_{\text{дод}} \cdot K_B$ ;

$S_{\text{дод}}$  – загальний вміст солей у додатковій воді за даними лабораторного аналізу у мг/л;

$K_g$  – коефіцієнт концентрування солей в оборотній воді (див. формулу (4.12), для розрахунку за якою величини  $W_{\text{вип}}$  і  $W_{\text{ун}}$  обчислюються, а величина  $W_{\text{скид}}$  задається) у  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$W_{об}$  – витрата оборотної води у системі у м<sup>3</sup>/год;

$(Ca)_{дод}$  – концентрація кальцію у додатковій воді за даними лабораторного аналізу у мг/л;

$(CO)_{2охол}$  – концентрація вуглекислоти в оборотній воді після охолоджувача за даними лабораторного аналізу або орієнтовно за таблицею 4.4 залежно від карбонатної твердості додаткової води та коефіцієнта упарювання води  $K_v$  у мг/л;

$(CO)_{2дод}$  – концентрація вуглекислоти у додатковій воді за даними лабораторного аналізу у мг/л.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнта  $\Psi$

Температура охолодженої води $t_{охол}$ , °C	Солевміст оборотної води $S_{об}$ , мг/л						
	200	400	600	800	1 000	1 500	2 000
15	8,04	8,68	9,18	9,56	9,94	10,7	11,3
20	7,54	8,12	8,6	0,98	9,92	10,0	10,6
25	7,12	7,65	8,07	8,42	8,76	9,41	9,97
30	6,66	7,18	7,58	7,92	8,22	8,83	9,36
35	6,21	6,69	7,08	7,39	7,68	8,24	8,76
40	5,8	6,24	6,61	6,89	7,16	7,7	8,16

Таблиця 4.4 – Концентрація вуглекислоти у воді, охолодженій на градирнях у разі підкислення, мг/л

Карбонатна твердість додаткової води, мг-екв/л	Коефіцієнт концентрування солей у оборотній воді $K_v$				
	1,2	1,5	2	2,5	3
1	–	0,6	0,6	0,5	0,5
2	2,2	2,1	2,1	2	2
3	3,6	2,8	2,5	2,3	2,2
4	5,3	4,6	3,8	3,5	3,4
5	9	6,4	5,1	4,5	4,3
6	16,3	9	7,6	6	5,4

Однак формула (4.19) не дає правильних результатів, тому величину карбонатної твердості оборотної води  $Ж_{к.об}$ , за якої не відбуватиметься відкладень, більш надійно обирати за аналогом або дослідними даними, отриманими на моделі.

У формулі (4.18)

$$\frac{(W_{\text{дод}} - W_{\text{вих}})}{W_{\text{дод}}} T_{\text{карб.об}} = T_{\text{карб.дод.вих.}}$$

подається залишкова карбонатна твердість додаткової води після обробки її кислотою, а різниця  $T_{\text{карб.дод.вих.}} - T_{\text{карб.дод.зал}} = \Delta T_{\text{карб.}}$  представляє величину карбонатної твердості додаткової води, що усувається підкисленням. Тому якщо немає аналога або дослідних даних, у формулі (4.18) значення величини карбонатної твердості, що зменшується кислотою, можна обчислити за формулою

$$\Delta T_{\text{карб.}} = T_{\text{карб.дод.вих.}} - T_{\text{карб.дод.зал}}, \text{ мг-екв/л,} \quad (4.20)$$

вважаючи орієнтовно:  $T_{\text{карб.дод.зал}}$  у разі використання підземних вод – 1,5 мг-екв/л; у випадку використання вод поверхневих джерел (річок та водосховищ середньоєвропейської смуги), а також очищених стічних вод – 2–2,5 мг-екв/л; при використанні поверхневих вод північних районів, а також річок із гірничо-льодовиковим живленням – до 3 мг-екв/л.

Кислоту можна додавати до додаткової або оборотної води перед поданням до споживачів (а не у градирню). Починати підкислення необхідно із розрахункової дози для того, щоб спочатку зупинити процес виділення відкладень і не мати на меті розчинення раніше утвореного  $\text{CaCO}_3$ . Інакше можна спричинити інтенсивне відшарування колишніх відкладень та розвиток корозії металу у місцях, що їх не мають. У разі підкислення додаткової води освіження оборотної води у системі (продувку) можна проводити зі скиданням не більше 0,5–1 % від витрати оборотної води ( $W_{\text{скид}} = 0,005 : 0,01 W_{\text{об}}$ ), якщо додаткова вода до обробки не мала високого вмісту сульфатного іона, і за обраного коефіцієнта її упарювання концентрація хлоридів та сульфатів ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ) не спричинятиме значної швидкості корозії металу та випадання сульфату кальцію.

У процесі підкислення необхідно контролювати у додатковій та оборотній (охолодженій і тій, що подається споживачам) воді концентрації іонів  $\text{Cl}^-$  або  $\text{Mg}^{2+}$  (якщо вода хлорується),  $\text{SO}_4^{2-}$  і  $\text{Ca}^{2+}$ , величину карбонатної твердості та вільну вуглекислоту  $\text{CO}_2$ .

Карбонатних відкладень не буде у випадку дотримання рівності

$$\frac{T_{\text{карб.об}}}{T_{\text{карб.дод}}} = \frac{\text{Cl}^-_{\text{об}}}{\text{Cl}^-_{\text{дод}}}, \text{ їхня наявність буде спостерігатися у разі } \frac{T_{\text{карб.об}}}{T_{\text{карб.дод}}} < \frac{\text{Cl}^-_{\text{об}}}{\text{Cl}^-_{\text{дод}}}.$$

В останньому випадку контролювати потрібно також швидкість відкладень на пластинках ваговим методом.

Сульфат кальцію (гіпс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) не осаджується у системі оборотного водопостачання, якщо добуток активних концентрацій іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{SO}_4^{2-}$  в оборотній воді не буде перевищувати добуток розчинності сульфату кальцію, що визначається за такою формулою:

$$f^2 \cdot C_{\text{Ca}} \cdot C'_{\text{SO}_4} \cdot K_6^2 \leq PP_{\text{CaSO}_4}, \quad (4.21)$$

де  $f$  – коефіцієнт активності двовалентних іонів, який визначається за величиною іонної сили розчину для оборотної води (табл. 4.5);

$\mu$  – іонна сила розчину для оборотної води;

$$\mu = \frac{K_y}{2} [(C_{\text{Cl}^-} + C_{\text{HCO}_3^-} + C_{\text{Na}^+}) + 4(C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}} + C'_{\text{SO}_4})]; \quad (4.22)$$

де  $C_{\text{Cl}^-}$ ,  $C_{\text{HCO}_3^-}$ ,  $C_{\text{Na}^+}$ ,  $C_{\text{Ca}^{2+}}$ ,  $C_{\text{Mg}^{2+}}$  – концентрація іонів хлоридних, бікарбонатних, натрію, кальцію і магнію у додатковій воді, за даними лабораторного аналізу у г-іон/л;

$C'_{\text{SO}_4}$  – концентрація сульфатного іону у підкисленій сірчаною кислотою додатковій воді, що розраховується

$$C'_{\text{SO}_4} = C_{\text{SO}_4} + \frac{D_k \cdot C_k}{98000 \cdot 100}, \text{ г-іон/л}; \quad (4.23)$$

$C_{\text{SO}_4}$  – концентрація сульфатного іону в додатковій воді до її підкислення у г-іон/л;

$D_k$  – доза кислоти, що визначається за формулою (4.18);

$C_k$  – вміст  $\text{H}_2\text{SO}_4$  у технічній кислоті, яка використовується для підкислення води у відсотках.

Таблиця 4.5 – Значення коефіцієнтів активності двовалентних іонів

$\mu$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
$f$	0,67	0,58	0,53	0,5	0,47	0,45	0,43
$f$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	–
$\mu$	0,41	0,39	0,38	0,36	0,35	0,34	–

Добуток розчинності сульфату кальцію  $PP_{\text{CaSO}_4}$  (константа) за температури води 25–60 °С може вважатися рівним  $6,2 \cdot 10^{-5}$ .

Дуже орієнтовно витрату оборотної води, що скидається можна вважати такою, що дорівнює половині скиду  $W_{\text{скид}}$ , одержуваного за формулою (4.16); водночас величину карбонатної твердості оборотної води можна вважати рівною подвоєній величини карбонатної твердості підкисленої води, що додається до системи, коефіцієнт концентрації (упарювання) дорівнюватиме двом.

Витрата кислоти для обробки води у кількості  $W_{\text{дод}}$ , м<sup>3</sup>/год може бути визначена за формулою

$$G_k = \frac{D \cdot W_{\text{дод}}}{1000} \quad (4.24)$$

Для виміру та дозування кислоти влаштовуються два мірні баки ємністю кожен

$$V_M = \frac{G_k \cdot T}{1000 \cdot \rho} \quad (4.25)$$

де  $T$  – кількість годин роботи бака із заготовленим розчином;

$\rho$  – щільність (питома вага).

Кислоту в оброблювану воду краще подавати не розведена водою. Витрата кислоти з бака має становити

$$q = \frac{G_k}{60 \cdot \rho} \quad (4.26)$$

Якщо витрати кислоти малі, дозувати її в оброблюваній воді доцільно у вигляді розчину 5–10 % концентрації.

Концентрована сірчана кислота, що надходить до підприємства, у залізничних або автомобільних цистернах опиняється на складі, який зазвичай розташовується близько від установки для обробки води. Кислота із привізних цистерн переливається у складські, а з них подається у баки-мірники, розташовані у дозаторній. Переливання та подача кислоти у мірники можуть проводитися стисненим повітрям (перетисненням) за допомогою повітродувки або кислототривкою помпою крізь трубопроводи.

Бак-дозатор кислоти та ежектор типові (табл. 4.6). Розміри бака обираються за обсягом витрати кислоти за вибраний час.

Таблиця 4.6 – Розміри та вага типових баків-мірників концентрованої сірчаної кислоти

Параметри	Об'єм кислоти в баку у літрах			
	90	150	250	500
Діаметр бака $D$ у міліметрах	450	500	670	810
Висота у міліметрах: $H_{\text{повн}}$	845	1 060	1 135	1 345
$h_{\text{коніч}}$	110	125	174	205
Діаметри патрубків у міліметрах:				
– внизу конуса $d_{\text{угл}}$	25	25	25	40
– переливу $d_{\text{перел}}$	25	25	50	50
Загальна вага конструкції у кілограмах	98	132	192	313

#### 4.8 Фосфатування води

Одним із засобів боротьби із відкладенням карбонату кальцію у воді, що застосовують для охолодження теплообмінної апаратури, зокрема конденсаторів турбін, є фосфатування води.

Метод фосфатування застосовують для обробки вод у системах оборотного водопостачання з порівняно невисокою лужністю (до 5,5 мг-екв/л). Під час фосфатування охолоджуючої води додають у невеликих кількостях різні фосфати, що затримують кристалізацію карбонату кальцію і стабілізують перенасичені розчини  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Важливою особливістю методу фосфатування є те, що фосфати не мають агресивних властивостей і до точності їх дозування не висувають високих вимог.

За наявності невеликих концентрацій поліфосфатів на поверхні мікрокристалів карбонату кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ) утворюється сполука, що попереджає випадіння із розчину малорозчинного карбонату кальцію.

Перевагою фосфатування є простота та компактність установок. Фосфатна обробка охолоджуючої води у системах оборотного водопостачання розповсюдилась завдяки надійності та високій стабілізуючій ефективності цього методу.

Найбільш успішно фосфатування застосовується, якщо лужність додаткової води не перевищує 3,5–4 мг-екв/л. Інакше потрібно застосовувати комбінований спосіб обробки – фосфатування разом із підкисленням.

Під час обробки води фосфатами для попередження утворення щільних сольових відкладень передбачають продувку  $P_3$ , відсоток якої визначають за формулою

$$P_3 = \frac{P_1}{K_{\text{ВИП}}^{\text{ДОП}} - 1} - P_2 \quad (4.27)$$

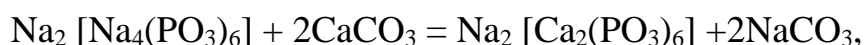
де  $K_{\text{ВИП}}^{\text{ДОП}}$  – допустимий коефіцієнт випаровування води

$$K_{\text{ВИП}}^{\text{ДОП}} = (2 - 0,15 \cdot L_{\text{Д}})(1,4 - 0,01 \cdot t_1)(1,1 - 0,01 J_{\text{Д}}) \quad (4.28)$$

$L_{\text{Д}}$ ,  $J_{\text{Д}}$  – відповідно лужність та твердість води, що додається, мг-екв/л;

$t_1$  – температура оборотної води перед охолоджувачем, °С.

Фосфатування води вважається найбільш простим способом запобігання утворенню карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання. Під час додавання у воду, наприклад, розчину гексаметафосфату натрію на поверхні зародків кристалів карбонату кальцію утворюються такі адсорбційно-хімічні сполуки:



які перешкоджають подальшому зростанню кристалів карбонату кальцію, агрегації їх та випаданню з води. Перебуваючи в масі води у вигляді завислої речовини, вони видаляються із системи під час її освіження.

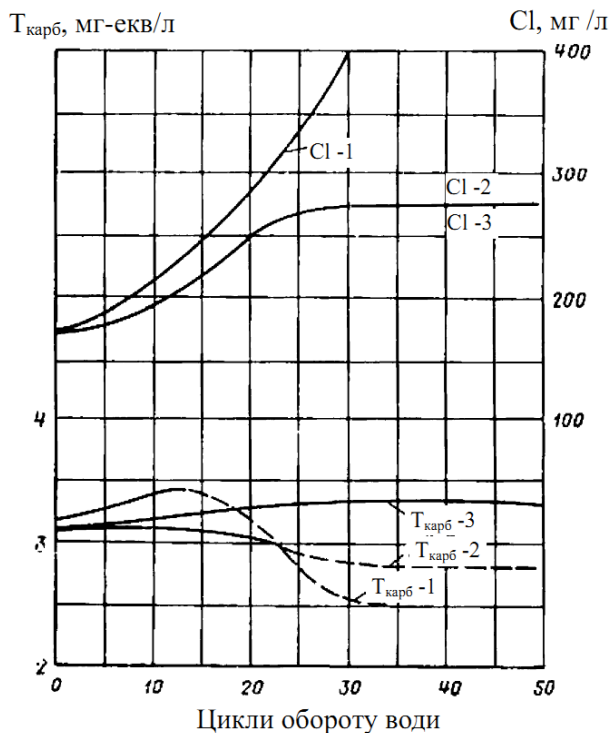


Рисунок 4.10 – Вплив фосфатування води під час випробування її на карбонатну твердість і швидкість виділення відкладень у моделі з нагріванням до 34 °С та охолодженням до 26 °С:

- 1 – без додавання води до системи відкладення 0,12 г/м<sup>2</sup>·год;
- 2 – із додаванням 4 % та скиданням із системи 2,4 % від витрати води (без обробки), відкладення 0,1 г/м<sup>2</sup>·год; 3 – із додаванням 4 % та скиданням із системи 2,4 % з обробкою додаткової води фосфатами, відкладення 0,043 г/м<sup>2</sup>·год

В оборотній воді достатньо підтримувати вміст фосфатів 1,5–2 мг/л у перерахунку на P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

На практиці застосовуються для обробки води гексаметафосфат натрію (Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>), триполіфосфат натрію Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub>, тринатрійфосфат Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O та суперфосфат Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Вміст P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> у перших двох становить 50–52 %, в останніх двох – 16–18 %.

Під час випробування без додавання води до системи (режим упарювання) відкладення становили 0,12 г/м<sup>2</sup>·год; із додаванням води до системи у розмірі 4 % та скиданні з неї 2,4 % від витрати оборотної води без її обробки відкладення становили також 0,12 г/м<sup>2</sup>·год; у разі того ж додавання та скидання з обробкою додаткової води фосфатами відкладення зменшилися до 0,043 г/м<sup>2</sup>·год.

Встановлено, що під час фосфатування є якась межа перенасичення розчину, вище за яку, незважаючи на наявність фосфату, починається інтенсивне зростання, коагуляція, а потім і випадання кристалів переважно неправильної форми.

Водночас як свідчать спостереження, відкладення в апаратах, трубопроводах і на спорудах під час фосфатування води мають зовсім інший характер: вони можуть бути більш пухкими або м'якими, що легко видаляються з поверхні струменями води під час промивання або за допомогою волосяного йоржа; і можуть бути у вигляді окремих кристалів, що нагадують великий пісок.

Потрібно мати на увазі, що під час фосфатування охолоджувальної води з метою запобігання утворенню карбонатних відкладень завжди треба передбачати періодичне хлорування оборотної води та обробку градирень розчином мідного купоросу для боротьби з розвитком біологічних обростань. Помічено, що під час фосфатування води розвиток біологічних обростань посилюється, забруднення оборотної води підвищується.

Розчин фосфатів готують у баках і дозують в оброблювану воду за допомогою відповідних пристроїв, аналогічних тим, що використовують для дозування розчинів коагулянтів.

Дозу технічного продукту (тринатрійфосфату або суперфосфату) для обробки додаткової води у системі можна розрахувати за формулою

$$D_{\phi} = (2 + 0,2 \frac{E}{W_{\text{доб}}}) \frac{100}{C_{\phi}} \quad (4.29)$$

де  $E$  – об'єм води у системі (в резервуарах градирні, трубопроводах, лотках і газоочисних апаратах), м<sup>3</sup>;

$W_{\text{доб}}$  – кількість води, що додається до системи оборотного водопостачання, м<sup>3</sup>/год;

$C_{\phi}$  – вміст P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> у технічному реагенті (у гексаметафосфаті та триполіфосфаті 50–52 %, і тринатрійфосфаті 17–18 % та у суперфосфаті 16–18 %).

Із формули (4.29) видно, що доза фосфатів для обробки однієї й тієї ж кількості додаткової води буде тим більшою, чим більший обсяг води у системі. Тому формула (4.29) для систем оборотного водопостачання із бризкальним басейном дає завищену дозу фосфатів (ємність резервуарів басейну значно більша за ємність резервуарів градирень), а для систем водопостачання зі ставками-охолоджувачами взагалі не застосовується, як не застосовується і саме фосфатування.

Необхідно також мати на увазі, що зі збільшенням каламутності води та концентрації у ній нафтопродуктів витрата фосфатів зростає. Це пояснюється тим, що фосфати коагулюють завислі речовини, адсорбуються ними і випадають в осад.

Під час обробки води гексаметафосфатом та триполіфосфатом натрію контролюється наявність та концентрація в оборотній воді метафосфатів, а під час обробки води тринатрійфосфатом та суперфосфатом – ортофосфатів.

#### **4.9 Спільна обробка води підкисленням та фосфатуванням**

Спільна обробка води підкисленням та фосфатуванням дорожча, ніж обробка одним із зазначених вище методів. Однак цей метод доцільно застосовувати, якщо карбонатна твердість води досить висока і одне фосфатування води не забезпечує необхідного ефекту запобігання утворенню карбонатних відкладень, а глибоке підкислення води може викликати корозію металу. Комбінована (спільна) обробка може виявитися необхідною і за карбонатної твердості води, що змінюється протягом року, у джерелі.

Під час комбінованої обробки води кислотою та фосфатним реагентом дозу кислоти можна визначати за формулами (4.18) та (4.20) вважаючи орієнтовно карбонатну твердість води, що додається до системи оборотного водопостачання, після обробки її кислотою більше на 1 мг-екв/л, ніж зазначено вище. Водночас дозу фосфатів можна визначати за формулою (4.29) та освіження (продувку) розраховувати за формулою (4.16) вважаючи, що скидання води із системи не більше 1–1,5 % від витрати оборотної води.

Комбінована обробка води містить підкислення та фосфатування додаткової води, а також освіження підкисленою водою оборотної води. Завданням дослідження на моделі є віднайдення найкращого коефіцієнта використання води із найменшим скидом її із системи і за мінімальних витрат на реагенти.

*Фосфатно-кислотну обробку* застосовують у разі підвищеної лужності додаткової води (більше 5 мг-екв/л) з метою зменшення продувки оборотних систем і корозії охолоджуючої апаратури. Зменшення продувки досягається перетворенням частин карбонатних солей на розчинні сполуки шляхом підкислення. Зменшення агресивної активності досягається зменшенням доз кислот і захисними антикорозійними властивостями фосфатів. Цей метод застосовують на коксохімічних підприємствах.

Під час комбінованої фосфатно-кислотної обробки води дозу кислоти, мг/л, у розрахунку на витрату води, що додається, визначають за формулою

$$D_k = e_K (L_D - L_D^{ГРАН}) \frac{100}{C_K}, \quad (4.30)$$

де  $L_D^{ГРАН}$  – гранична величина лужності води, що додається, мг-екв/л, за якої запобігання утворенню карбонатних відкладень із заданими умовами ( $t_1$ ,  $K_{ВИП}$ ,  $T_{дод}$ ) досягається фосфатуванням

$$L_D^{ГРАН} = 16 - \frac{K_{ВИП}}{0,125(1,4 - 0,01t_1)(1,1 - 0,01Ж_D)}. \quad (4.31)$$

Дозу фосфатного реагенту (триполіфосфату або гексаметафосфату) вважають 3–5 мг/л за товарним продуктом у розрахунку на підживлюючу воду й уточнюють у процесі експлуатації.

#### 4.10 Рекарбонізація оборотної води

Для боротьби з перенасиченістю карбонатом кальцію застосовують також обробку вод димовими газами, що містять вуглекислоту – *метод рекарбонізації*. Рекарбонізацію димовими газами застосовують із лужністю води, що додають до 3,5 мг-екв/л і коефіцієнтами концентрування, що не перевищують 1,5.

Цей метод досить ефективний, але має недоліки: необхідність строгого дозування димових газів, щоб уникнути корозії у системі, небезпечність для обслуговуючого персоналу у зв'язку з наявністю в газах окису вуглецю та великих капітальних витрат на спорудження установки.

Практично цей метод застосовується лише за наявності дешевого джерела вуглекислоти, яким можуть бути відходи вуглекислого газу (наприклад, на підприємствах азотної промисловості), димові газы, що утворюються у котельнях під час спалювання твердого (або рідкого) палива, а також газы доменних печей.

Суть цього методу полягає у насиченні води вуглекислим газом з метою підтримки вуглекислотної рівноваги і запобігання випадінню карбонатних відкладень шляхом попередження розпаду бікарбонатів. Під час контакту димових газів з водою у ній розчиняються вуглекислота  $CO_2$ , що міститься у димових газах, і певною мірою сірчистий ангідрид  $SO_2$ . Збільшення вмісту у воді  $CO_2$  компенсує втрати оборотною водою вуглекислоти в охолоджувачах і тим самим запобігає розпаду бікарбонатів



Водночас відбувається розчинення утворених зародків кристалів карбонату кальцію вуглекислою, що додається до оборотної води за допомогою газодувки або ежектора. Розчинення  $\text{SO}_2$  діє аналогічно до підкислення. Однак вміст у димових газах  $\text{SO}_2$  невеликий, до того ж він більшою мірою поглинається водою, якою димові гази попередньо очищаються від механічних домішок (золи тощо), а тому дія  $\text{SO}_2$  під час рекарбонізації оборотної води не враховується.

Рекарбонізація оборотної води може застосовуватися у системах як без контакту охолоджуючої води із продуктом (напівзакрита система), так і з контактом цієї води, наприклад, із газом, що очищується (доменним або іншим). У цьому та іншому випадку вода, що нагрілася у процесі виробництва, охолоджується на градирні (або у бризкальному басейні) шляхом контакту з атмосферним повітрям.

Основним недоліком рекарбонізації води в охолоджуючих системах оборотного водопостачання є складність точного дозування вуглекислоти, що додається до води. Під час додавання у воду надмірної кількості вуглекислоти може відбуватися інтенсивна корозія трубопроводів та теплообмінних апаратів у місцях стикання цієї води з металом. Спостерігається і таке явище, коли помпи та трубопроводи до теплообмінних апаратів підлягають корозії (зі зменшенням інтенсивності у міру віддалення від місця додавання у воду димових газів), а в кінці теплообмінних апаратів та у трубопроводах і лотках за ними утворюються відкладення. Відкладення під час рекарбонізації води можуть утворюватися на зрошувачі градирень, що охолоджують оборотну воду, якщо ця вода перед ними не підлягає додатковій рекарбонізації (другий ступінь обробки води).

Дозу вуглекислоти для рекарбонізації оборотної води у напівзакритій системі можна орієнтовно визначати за такою формулою:

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{W_{\text{дод}} \cdot J_{\text{к.дод}}}{K_{\text{т}}(W_{\text{дод}} - W_{\text{вип}})} - \frac{W_{\text{об}} - W_{\text{дод}}}{W_{\text{об}}} \text{CO}_{2\text{охол}} - \frac{W_{\text{дод}}}{W_{\text{об}}} \text{CO}_{2\text{дод}}, \quad (4.32)$$

де  $W_{\text{дод}}$  – кількість води, що додається у систему,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$W_{\text{вип}}$  – втрати оборотної води на випаровування під час її охолодження,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$W_{\text{об}}$  – витрата оборотної охолоджувальної води у системі,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$T_{\text{карб.дод}}$  – карбонатна твердість води, що додається до системи,  $\text{мг-екв/л}$  (обирається за даними хімічного аналізу води);

$\text{CO}_{2\text{охол}}$  – вміст вільної вуглекислоти в оборотній охолодженій воді,  $\text{мг/л}$  (зазвичай ця величина буває до 3–4  $\text{мг/л}$ , нею не можна знехтувати);

$CO_{2\text{дод}}$  – вміст вільної вуглекислоти у воді, що додається до системи, у мг/л (обирається за даними хімічного аналізу води);

$K_T$  – коефіцієнт, що залежить від температури нагріву оборотної води у системі, має такі значення:

Температура нагрівання оборотної води, °С	30	35	40	45	50	60
Значення коефіцієнта $K_T$	0,26	0,21	0,07	0,13	0,11	0,1

Дозу вуглекислоти можна отримати випробуванням води на описаній вище моделі системи оборотного водопостачання. Однак зауважимо, що такий дослід рекарбонізації оборотної води є найбільш складним.

В умовах експлуатації дозу вуглекислоти для рекарбонізації води, що визначається орієнтовно за формулою (4.32), необхідно коригувати за даними контролю за швидкістю відкладень на індикаторних пластинках або швидкістю корозії цих пластин.

Кількість димових газів, яку необхідно подавати у воду, що обробляється ними, можна визначити за формулою

$$V_{\text{д.г.}} = 5,1 \cdot \frac{D_{CO_2} \cdot W_{об}}{C_{CO_2} \cdot \beta} \text{ м}^3/\text{год}, \quad (4.33)$$

де  $D_{CO_2}$  – доза вуглекислоти, що визначається за формулою (4.32), мг/л;

$C_{CO_2}$  – вміст  $CO_2$  у димових газах у відсотках за обсягом, що визначається за даними аналізів димових газів (величина непостійна). Приблизно можна вважати димові гази від спалювання твердого палива (вугілля) у котлах – 5–8 %; від спалювання нафти та мазуту – 8–12 %; від спалювання доменного газу – 15–22 %;

$\beta$  – ступінь використання вуглекислоти, що міститься в димових газах у відсотках (обирається орієнтовно) під час додавання вуглекислоти у воду за допомогою водоструминних ежекторів від 50 % до 80 %; за допомогою газодувок та барботажних труб 30 %.

Вуглекислоту димових газів у воду, що охолоджує, можна додавати газодувкою із барботажним пристроєм (рис. 4.11) або ежектором. Барботажні труби занурюються у потік води на глибину не більше ніж 2 м. З ежектора гази у суміші з водою подаються трубою у водозабірну камеру насосів оборотної води.

Під час додавання у воду вуглекислоти димових газів газодувкою барботер влаштовують у вигляді перфорованої труби або кількох таких труб, прокладених паралельно із дном камери, якою протікає оброблена вода зі

швидкістю до 0,2–0,3 м/с. Діаметр отворів у цих трубах обирають рівним 3–4 мм (у процесі експлуатації він збільшується через корозію металу до 5–6 мм). Інтенсивність подачі газів – від 5 л/с до 10 л/с на 1 м<sup>2</sup> площі камери. Швидкість руху газів у трубах, що підводять і розводять, обирають рівною 10–15 л/с. Тиск, що утворюється газодувкою, 2–3 м вод. ст., або 20–30 н/м<sup>2</sup>. Витрата електроенергії на стиск газу за такого тиску становить 0,02–0,025 кВт-год на 1 м<sup>3</sup>.

Найбільшого застосування набула схема додавання вуглекислоти за допомогою димового ежектора. Водночас вуглекислотою димових газів насичується лише частина оборотної води.

*Рекарбонізація оборотної води під час контакту із продуктом (відкрита система).* Як уже зазначалося вище, у відкритій системі оборотного водопостачання якість та властивості води, від яких залежить утворення карбонатного відкладення, залежать від складу продукту, з яким вона стикається, температури та тиску, і не залежать від якості додаткової води.

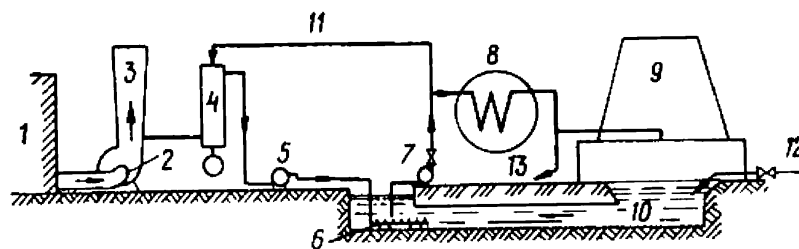


Рисунок 4.11 – Схема рекарбонізації оборотної води:

- 1 – котельня; 2 – димосмок; 3 – димова труба; 4 – золовловлювач; 5 – газодувка;  
 6 – барботажний пристрій із дірчастих труб; 7 – насос для подачі оборотної  
 води; 8 – теплообмінний апарат; 9 – охолоджувач води (градирня);  
 10 – резервуар і канал охолодженої води; 11 – трубопровід води до  
 золовловлювача; 12 – надходження додаткової води; 13 – відведення для  
 скидання частини оборотної води

Доза вуглекислоти для рекарбонізації оборотної води з метою запобігання утворенню карбонатних відкладень у таких випадках призначається залежно від конкретних умов. Зазвичай її підбирають дослідним шляхом у виробничих умовах.

Як приклад на рисунку 4.12 подана балансова схема різних форм вуглекислоти в оборотній воді доменного газоочищення у разі двоступеневої рекарбонізації для запобігання утворенню карбонатних відкладень.

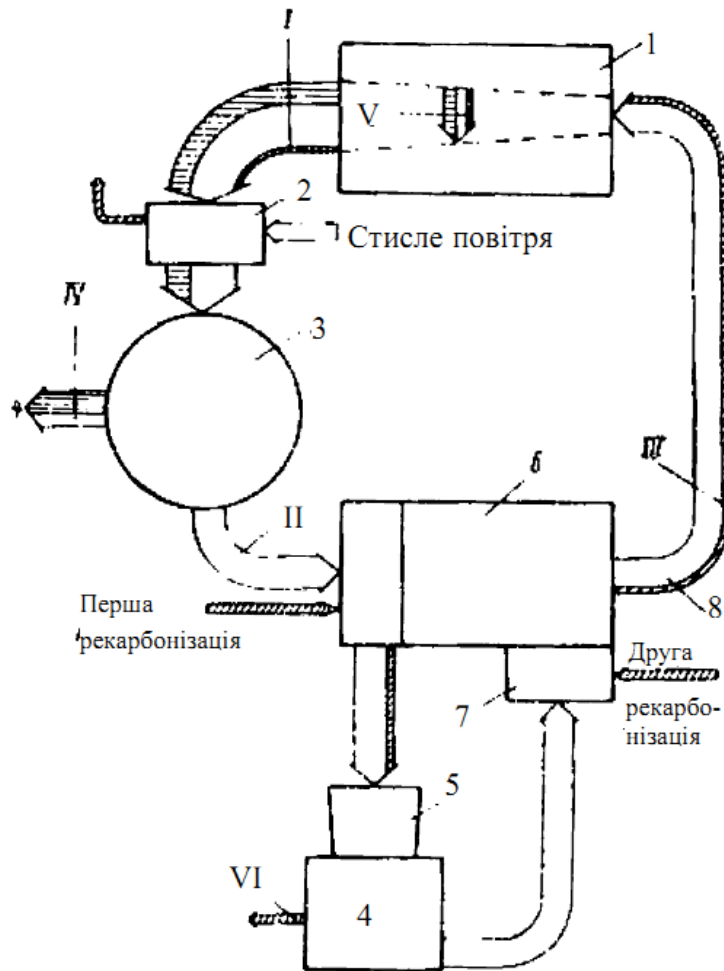


Рисунок 4.12 – Балансова схема різних форм вуглекислоти в оборотній воді доменного газоочищення під час її двоступеневої рекарбонізації

1 – доменна газоочистка; 2 – аератор; 3 – відстійник; 4 – градирня;

5, 7 – камера нагрітої води та охолодженої води; 6 – насосна станція;

8 – трубопровід подачі охолодженої води насосною станцією на газоочищення

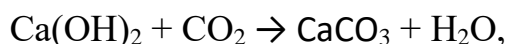
Зміну концентрації різних форм вуглекислоти у потоці оборотної води наведено у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Концентрація різних форм вуглекислоти в оборотній воді перерізів потоку під час її обробки (рекарбонізації), мг/л

Форма CO <sub>2</sub> у воді за перерізами потоку, мг/л	Переріз потоку води (див. рис. 4.18)					
	I	II	III	IV	V	VI
Карбонатна CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	304	7	11	297	293	–
Гідрокарбонатна HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	585	371	367	215	218	4
Вільна CO <sub>2</sub>	65	–	60	–	5	80
Загальна	954	378	438	512	516	84

Для нових запроектованих та реконструйованих систем оборотного водопостачання доменних газоочисток запропоновано чотириступеневу обробку води.

На першому ступені відпрацьована у виробництві (1) вода надходить до аератора (2) для декарбонізації і підготовки до освітлення у відстійнику (3). В аераторі вільна вуглекислота, що міститься у воді, вступає у реакцію із наявним гідроксидом кальцію, перетворюючи її на карбонат кальцію



який випадає в осад у відстійнику (3). Питома витрата повітря становить приблизно 0,18 м<sup>3</sup>/г віддаленої вуглекислоти.

На другому ступені проводиться освітлення води від нерозчинних речовин і кристалів карбонату кальцію, що утворилися під час аерації води і випадають в осад у радіальному відстійнику, а потім віддаляються у відвал (4).

На третьому ступені проводиться перша рекарбонізація оборотної води для повного усунення відкладень у трубопроводі на ділянці до градирні (5), у водорозподільній системі та зрошувачах. Тут у камеру гарячої води подається вуглекислота 70–80 мг/л.

На четвертому ступені перед подачею охолодженої води помповою станцією (6) по трубопроводу (8) на газоочищення (1) проводиться друга рекарбонізація для запобігання відкладень у напірному трубопроводі (8). У воду в камері охолодженої води (7) додається вуглекислота 60–70 мг/л.

Таким чином, незахищеними від відкладень у системі залишаються лише короткі ділянки з лотків від газоочистки (1) до відстійника (3), від відстійника до насосної станції (6) і від градирні (5) до камери (7).

Доза вуглекислоти для рекарбонізації оборотної води доменного газоочищення може визначатися для кожного ступеня за такою формулою:

$$D_{\text{CO}_2, \text{рівн}} = C \cdot L_{\text{заг}}^n, \text{ мг/л} \quad (4.34)$$

де  $C$  і  $n$  – коефіцієнти, що визначаються дослідним шляхом для кожного складу шихти, що завантажується у доменну піч;

$L_{заг}^n$  – загальна лужність оборотної (нефільтрованої) води, мг-екв/л.

**Визначення вільної вуглекислоти у воді.** Під час обробки оборотної води димовими газами (рекарбонізація) здійснюється лабораторний контроль за вмістом вільної вуглекислоти у воді – у додатковій, в оборотній, що подається, та в охолодженій. Водночас наявність вільної вуглекислоти  $CO_{2\text{своб}}$  виключає наявність у цій воді карбонатних іонів  $CO_3^{2-}$ . Метод ґрунтується на титруванні вільної вугільної кислоти 0,02–0,05 нормальним розчином  $Na_2CO_3$  або  $NaOH$  за наявності фенолфталеїну до появи протягом 5 хв слабо-рожевого або жовтувато-рожевого забарвлення.

#### 4.11 Пом'якшення води, що додається до системи

За високої карбонатної твердості прісної води поверхневих джерел, коли є потреба в освітленні додаткової води, для цієї мети передбачаються відповідні споруди (відстійники або освітлювачі, фільтри), доцільно застосовувати вапнування для пом'якшення додаткової води з метою видалення з неї  $Ca^{2+}$  та частково  $Mg^{2+}$ . В окремих випадках, коли висуваються високі вимоги до охолоджувальної води під час нагрівання її більше ніж на  $15\text{ }^\circ\text{C}$  або за наявності місцевого кипіння її у поверхні теплообміну, потрібно застосовувати пом'якшення додаткової підземної води на іонообмінних фільтрах (натрій або водень-катіонування з «голодною» регенерацією).

Доцільність застосування того чи іншого методу пом'якшення води у кожному даному випадку визначається техніко-економічними розрахунками.

*Пом'якшення додаткової води вапном.* Сутність методу полягає у зменшенні кальцієвої карбонатної твердості води (тобто частини карбонатної твердості, пов'язаної із наявністю у воді іона кальцію) шляхом обробки вапном.

Залишкова твердість пом'якшеної води у випадку вапнування може бути отримана на 0,4–0,8 мг-екв/л більше некарбонатної твердості, а лужність 0,8–1,2 мг-екв/л.

Проектування установки з пом'якшення води вапном можна здійснювати, користуючись даними, викладеними у ДБН В.2.5 -74: 2013 [10].

Під час використання у системі оборотного водопостачання води, пом'якшеної вапном, біологічні обростання розвиваються трохи менш інтенсивно, але не виключаються внаслідок наявності еолового забруднення води (через повітря на градирнях), тепла, фотосинтезу та поживних речовин для мікроорганізмів.

За такою схемою із пом'якшенням додаткової води вапном успішно працює система оборотного водопостачання ЦЕС Краматорського металургійного заводу.

*Пом'якшення додаткової води катіонуванням.* Цей метод удвічі дорожчий, ніж пом'якшення води вапном. Застосовується лише в окремих випадках.

Пом'якшення води катіонуванням проводять фільтруванням попередньо освітленої води через шар зернистого матеріалу – катіоніту, частинки якого містять на своїй поверхні катіони натрію  $\text{Na}^+$  або водню  $\text{H}^+$ , здатні до обміну на катіони кальцію  $\text{Ca}^{2+}$  та магнію  $\text{Mg}^{2+}$  солей твердості, розчинених у воді. Відповідно до цього розрізняють натрій- і водень-катіонування.

Вода після натрій-катіонітових фільтрів зазвичай має підвищену лужність ( $\text{pH} > 7$ ), а після водень-катіонітових – підвищену кислотність ( $\text{pH} < 7$ ). Для отримання пом'якшеної води з оптимальною лужністю можна застосовувати водень-натрій-катіонування: фільтрування через водень- і натрій-катіоніти.

Твердість води за допомогою катіонування може бути зменшена до 0,03–0,05 мг-екв/л.

Під час фільтрування води через натрій-катіоніт катіони кальцію  $\text{Ca}^{2+}$  та магнію  $\text{Mg}^{2+}$  повністю заміщуються катіонами натрію  $\text{Na}^+$ . У результаті цього у профільтрованій пом'якшеній воді залишаються лише натрієві солі, що володіють великою розчинністю і не утворюють карбонатних відкладень у теплообмінних апаратах. Кількість аніонів, що містяться у пом'якшеній воді ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  тощо), під час натрій-катіонування залишається практично незмінною.

Під час фільтрування води через водень-катіоніт відбувається заміна катіонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  на катіон водню  $\text{H}^+$ .

Для запобігання утворенню карбонатних відкладень у системі оборотного водопостачання переважно додаткову воду піддавали водень-катіонному пом'якшенню з відновленням обмінної здатності катіоніту за режимом так званої «голодної» регенерації: у фільтр подається тільки така кількість кислоти, яка точно відповідає стехіометричному розрахунку (без надлишків).

Внаслідок зазначеної «голодної» регенерації водень-катіоніту у фільтраті не утворюються сильні мінеральні кислоти, а лише з'являється вуглекислота, що зменшує лужність (карбонатну твердість) фільтрату. Водночас зменшення твердості фільтрату відбувається до величини в середньому 0,5–3 мг-екв/л залежно від твердості вихідної води, і кислих стоків від регенерації катіоніту не утворюється.

Вплив пом'якшення води катіонуванням на її термостабільність є аналогічним до наведеного вище пом'якшення води вапном, для випадку водень-катіонування – аналогічним до підкислення додаткової води. Водночас відпадає необхідність в опрісненні води (зменшенні загального вмісту розчинених солей), і тим більше у її знесолюванні для звичайних охолоджувальних систем оборотного водопостачання.

#### 4.12 Інші методи обробки води

Методи обробки води магнітним полем, високочастотним електричним полем та ультразвуком нині перебувають у стадії лабораторних досліджень чи виробничої перевірки.

*Обробка води магнітним полем.* Основою цього способу (рис. 4.13) є ефект дії електромагнітного поля на електронні оболонки іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{CO}_3^{2-}$  у воді, що протікає між гільзою та стінкою труби. Механізм цього впливу ще не встановлено.

Вважають, що під впливом магнітного поля деформуються електронні оболонки іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{CO}_3^{2-}$ . Внаслідок цього сили взаємодії між цими іонами слабшають і карбонат кальцію у вигляді шламу виводиться з водою із трубок теплообмінного апарату або легко знімається з поверхні, що омивається, механічно. Вважають, що потрібна обробка лише додаткової води. За такої обробки охолоджувальної води магнітним полем, крім зміни структури накипу значно зменшується також його кількість.

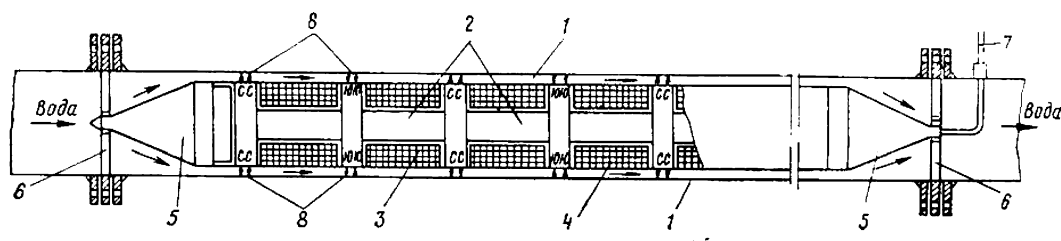


Рисунок 4.13 – Схема апарату для обробки оборотної охолоджувальної води магнітним полем:

- 1 – труба сталева; 2 – сердечник електромагніту; 3 – обмотка електромагніту;
- 4 – кожух із діамагнітного матеріалу; 5 – конічна заглибка кожуха;
- 6 – центруючий фланець; 7 – підведення електричного струму до електромагніту; 8 – магнітні силові лінії

Відомості про ефективність цього способу суперечливі. Підлягає ретельному вивченню питання величини необхідної напруженості магнітного поля залежно від іонного складу води, і навіть оптимального часу обробки води магнітним полем.

*Обробка води високочастотним електричним полем.* Установка для обробки охолоджувальної води високочастотним електричним полем є конденсатором з двома шарами ізоляції. Одним шаром слугує скло або пластмаса, а іншим – вода, що обробляється. Коли вода проходить через високочастотне електричне поле, останнє створює певний момент, що впливає на молекули води та розчинені у ній іони. Водночас змінюються фізичні та хімічні властивості води як розчинника; крім того, спостерігаються також значні зміни у процесах кристалізації розчинених у воді солей. Вода, оброблена високочастотним електричним полем, утворює нетвердий пухкий або шламopodobний накіп, який легко видаляється за допомогою механічного впливу йоржа або струменя води. Було випробувано кілька таких апаратів, проте результати дослідів суперечливі.

*Обробка води ультразвуком.* Вода підлягає впливу ультразвукових коливань, які можна отримати на основі магнітострикційного або п'єзоелектричного ефекту. Водночас ультразвукові коливання можуть передаватися безпосередньо до води або трубки теплообмінного апарату. В обох випадках вони запобігають відкладенню солей накипу на поверхню нагрівання, що омивається водою, причому раніше накіп, що відклався, відшаровується. Однак відомості у літературі з цього питання дуже нечисленні та поверхові.

*Електровібраційна обробка води.* За цим способом вода підлягає комбінованому впливу коливань: ультразвукових, електричних та електромагнітних. У результаті запобігається відкладення у теплообмінних апаратах солей твердості у вигляді твердого накипу. Відомості про практичні результати цього способу поки що не дозволяють говорити про його застосування у виробничих умовах.

*Оцінка ефективності обробки води.* Основними критеріями можуть бути:

- 1) зміна теплообмінної здатності технологічних апаратів;
- 2) інтенсивність процесу відкладення в апаратах за їх обсягом за певний час або швидкість відкладень на індикаторних пластинках, г/м<sup>2</sup> год;
- 3) хімічний склад відкладень.

Зі зменшенням інтенсивності відкладення карбонатів теплообмінна здатність апаратів не погіршується тривалий час.

Якісне дослідження води зі зменшенням інтенсивності процесу відкладень показує, що карбонатна твердість оборотної води вища, ніж додаткової; величини коефіцієнтів концентрування за хлоридним іоном і карбонатною твердістю приблизно рівні, але коефіцієнт концентрування за хлоридним іоном

може бути і трохи більшим. Якщо коефіцієнт концентрування за карбонатною твердістю виявиться більшим за коефіцієнт концентрування за хлоридним іоном, це вкаже на похибку в хімічному аналізі.

### **Контрольні запитання**

1. З якою метою здійснюється очищення води від розчинених газів?
2. Наведіть схему плівкового дегазатора із насадкою з кілець Рашига.
3. Які реагенти використовуються для хімічного зв'язування розчинених у воді кисню і діоксиду вуглецю?
4. На чому ґрунтується дистиляційний метод?
5. Принцип дії одноступеневої дистиляційної опріснювальної установки.
6. Як впливає кількість щаблів на економічність установки?
7. Які вживають заходи щодо попередження утворення накипу або його видалення?
8. Визначення стабільності води.
9. Заходи у разі позитивного і негативного індексу стабільності.
10. Назвіть основні методи запобігання щільним сольовим відкладенням в оборотних системах водопостачання.
11. Які методи застосовують у системах водопостачання газоочисток конверторних цехів?

## **5 ЗАХИСТ МЕТАЛУ ВІД КОРОЗІЇ**

### **5.1 Характер та причини корозії теплообмінних апаратів, трубопроводів та споруд**

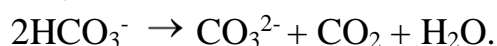
Корозією називають мимовільне руйнування металів внаслідок фізико-хімічної взаємодії їх із навколишнім середовищем. У практиці водопостачання під матеріалами розуміють прості метали, а також обладнання та вироби, які виготовлені із цих металів. Середовищем, у якому відбувається корозія металів, є вода. Отже, процеси корозії пов'язані із характерними особливостями води та металу. Однак корозію потрібно відрізнити від ерозії – поверхневого механічного руйнування металів.

Під час створення повністю замкнених систем оборотного водопостачання важливе значення поряд із запобіганням щільних сольових відкладень має запобігання корозійної спрацьованості устаткування трубопроводів. Зокрема це стосується газоочисток великовантажних доменних печей, що працюють із підвищеним тиском газу.

Відомо, що у розчинах, які містять вугільну кислоту, вуглеводисті сталі підлягають значним корозійним руйнуванням.

Величина швидкості корозії у різних системах, що містять розчинений вуглекислий газ, різна, крім того, недостатньо вивчений механізм протікання цього процесу. Все це не дозволяє прогнозувати корозійну стійкість устаткування в умовах роботи цілком замкнених систем оборотного водопостачання.

У водних розчинах вуглекислотних сполучень існує динамічна рівновага між різними формами вуглекислоти



З цього рівняння видно, що для підтримки певної концентрації бікарбонатних іонів потрібно, щоб у розчині містилась відповідна кількість вільної вуглекислоти. Та вільна вуглекислота, що необхідна для підтримки у розчині бікарбонатів, називається рівноважною. Надлишкова вуглекислота агресивна щодо будівельних матеріалів і металу.

Для захисту систем оборотного водопостачання від корозії використовують неорганічні інгібітори. Як неорганічні інгібітори застосовують переважно хромати, біхромати, фосфати (зазвичай гексаметафосфат і триполіфосфат натрію), силікати, а також нітрати. Дія цих інгібіторів заснована на утворенні захисних плівок на поверхні металу і гальмуванні анодного або катодного електрохімічних процесів.

Становлять інтерес роботи закордонних фахівців, у яких запропоновані способи захисту від корозії за допомогою інгібіторів на основі силікатів.

Для захисту від корозії системи виробничого водопостачання стабілізаційну обробку води передбачають за негативного індексу насичення (індексу стабільності).

Для попередження корозії й захисту трубопроводів і обладнання в системах промислового водопостачання застосовують як методи стабілізації води, так і інші прийоми:

- нанесення різних захисних покриттів із використанням матеріалів, що традиційно для цього застосовують (захисні лаки, емалі, фарбування поверхні тощо), застосування катодного захисту;
- введення інгібіторів;
- введення фосфатів, що утворюють захисні плівки на катодних і анодних ділянках поверхні металу і гальмують корозійний процес;
- введення вапна для створення й підтримки захисної плівки  $\text{CaCO}_3$ ;

– застосування магнітної, ультразвукової обробки й інших методів обробки води.

Для підвищення ступеню рівномірності розподілу захисної плівки карбонату кальцію одночасно із додаванням лужних реагентів передбачається дозування гексаметофосфату або триполіфосфату натрію у кількості 0,5–1,5 мг/л (за  $P_2O_5$ ).

Стабілізації води за негативного індексу насичення можна досягти видаленням із неї надлишкової вуглекислоти дегазацією із застосуванням різних типів дегазаторів.

Схему фосфатування оборотної води показано на рисунку 5.1.

Відомо, що корозійний процес протікає межі двох фаз: метал – докільля, тобто є гетерогенним (неоднорідним) процесом взаємодії рідкого або газоподібного середовища (або їх окисних компонентів) із металом.

Корозія металу може бути хімічною та електрохімічною. У разі хімічної корозії окислення металу та відновлення окисного компонента корозійного середовища відбувається в одному акті. Проте ця корозія стосується лише обладнання реагентного господарства водопроводів та систем оборотного водопостачання установок із обробкою металу кислотами. У практиці водопостачання поширена електрохімічна корозія, що відбувається за наявності електропровідного середовища, у разі якої іонізація атомів металу та відновлення окисного компонента корозійного середовища відбуваються не в одному акті, та їхні швидкості залежать від електродного потенціалу металу.

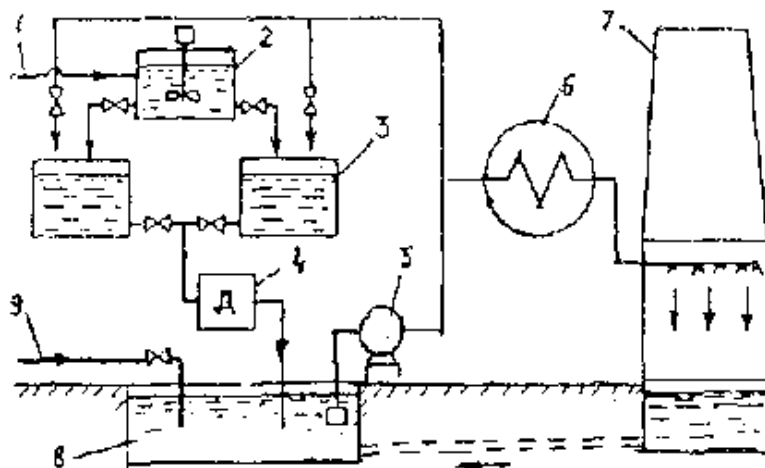


Рисунок 5.1 – Схема фосфатування оборотної води:

- 1 – подача пари на підігрів води або гарячої води;
- 2 – розчинний бак;
- 3 – витратний бак;
- 4 – дозатор;
- 5 – циркуляційна насосна станція;
- 6 – агрегат, що охолоджується;
- 7 – охолоджувач оборотної води;
- 8 – резервуар охолодженої води;
- 9 – подача свіжої води

У практиці водопостачання спостерігається і електрокорозія, або корозія під дією блукаючих струмів. За умовами протікання корозія у системах водопостачання становить переважно електрохімічний окислювально-відновний процес, можливість перебігу якого визначається зміною вільної енергії системи.

Анодний процес пов'язаний із переходом іонів металу в розчин. Під час катодного процесу відбувається асиміляція електронів деполяризатором, що міститься у розчині (розчинений кисень – киснева деполяризація, іони водню – воднева деполяризація). На тій самій ділянці металевої поверхні можуть відбуватися одночасно анодний і катодний процеси.

Частим випадком у системах оборотного водопостачання є біологічна корозія за участю продуктів, що виділяються мікроорганізмами біологічних обростань.

В окремих випадках відбувається корозія під час тертя (корозійна ерозія) – руйнування металу, що викликається одночасним впливом корозійного середовища та тертям (наприклад, руйнування шийки валків прокатних станів, що охолоджуються морською водою). За характером корозійного руйнування розрізняють такі види корозії:

1. Суцільна або загальна корозія, що охоплює всю поверхню металу, яка під впливом цього корозійного середовища (води). Суцільна корозія може бути рівномірною та нерівномірною. Рівномірна корозія протікає приблизно з однаковою швидкістю по всій поверхні металу, нерівномірна – з неоднаковою швидкістю на різних ділянках поверхні металу (що частіше спостерігається у разі використання для водопостачання морської води).

2. Місцева корозія охоплює лише деякі ділянки у вигляді окремих плям і виразок або окремих точок діаметром 0,1–2 мм (що частіше спостерігається на хромонікелевій неіржавній сталі). Місцева корозія може бути також наскрізною та підповерхневою.

Швидкість корозії пропорційна силі струму, що проходить між двома металами (точніше двома ділянками того самого металу), яка за законом Ома дорівнює

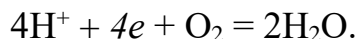
$$I = \frac{E}{R_A + R_B}, \quad (5.1)$$

де  $E$  – різниця потенціалів катода  $E_k$  і анода  $E_a$ ;

$R_A$  – внутрішній опір, тобто опір рідкої фази (води);

$R_B$  – зовнішній опір, тобто опір металу.

Під час корозії металів у воді виділення водню зазвичай не відбувається: у менш активних ділянках металу іони водню приєднують електрони і одночасно з'єднуються із киснем, розчиненим у воді



Кисень сильно збільшує корозію металів у воді. Особливо його наявність є небезпечною у воді систем оборотного водопостачання. Зміна різниці потенціалів  $E_k - E_a$  називається поляризацією корозійного елемента: зміщення потенціалу анода у позитивний бік під час проходження анодного струму – анодною поляризацією, а зміщення потенціалу катода у негативний бік під час проходження катодного струму – катодною поляризацією.

Речовини, що перешкоджають процесу поляризації, називають деполаризаторами. Сутність явища поляризації зводиться до того, що електрони переміщуються швидше, ніж протікають електродні реакції. Фізично це можна уявити так, що під час свого переміщення у розчин атоми металу захоплюють позитивно заряджені іони, а на металі залишаються негативно заряджені іони. Тому між металом та розчином виникає електростатична сила, що перешкоджає корозії. З часом розчин дедалі більше насичується позитивно зарядженими іонами, електростатична сила зростає, корозія уповільнюється і, нарешті, припиняється. Настає так звана поляризація. Зазвичай поляризація гальмує роботу локального елемента та зменшує швидкість електрохімічної корозії.

*Чинники, що впливають на швидкість електрохімічної корозії сталі.* Існує низка факторів, що прискорюють або сповільнюють корозію металевих труб та апаратів. Вплив величини рН загальновідомий: вважається, що зі збільшенням рН середовища за інших рівних умов корозія зменшується, і навпаки – зі зменшення рН вона збільшується. Значення рН мінімальної корозії буде характерною величиною кожного металу:

Метал	Al	Pb	Sn	Zn	Fe
рН	6,5	8	8,5	11,5	14

У зоні нейтральних значень рН (від 4 до 9) корозія сталі майже не залежить від її величини, оскільки розчинність і швидкість дифузії кисню істотно не змінюються зі зміною величини рН. Зменшення швидкості корозії сталі за подальшого збільшення рН (від 10 до 14) пояснюється переважно зменшенням розчинності продуктів корозії в лугах (утворення гідратів). Практично зазначається, що корозія відбувається за  $\text{pH} = 7-7,2$  із пухкими відкладеннями. У разі  $\text{pH} > 7,5$  продукти корозії стають міцними, що

захищають метал від руйнування.

Вплив температури на швидкість корозії сталі не однаковий. У замкненій системі оборотного водопостачання зі збільшенням температури води корозія зростає. Це пояснюється гальмуванням вільного виділення кисню із води. Криві, що характеризують залежність корозії від температури, близькі до прямої лінії (рис. 5.2, крива 1).

У відкритій системі оборотного водопостачання за температури води вище 70–80 °С (крива 2) відбувається зменшення корозії внаслідок сильного зменшення розчинності кисню із підвищенням температури.

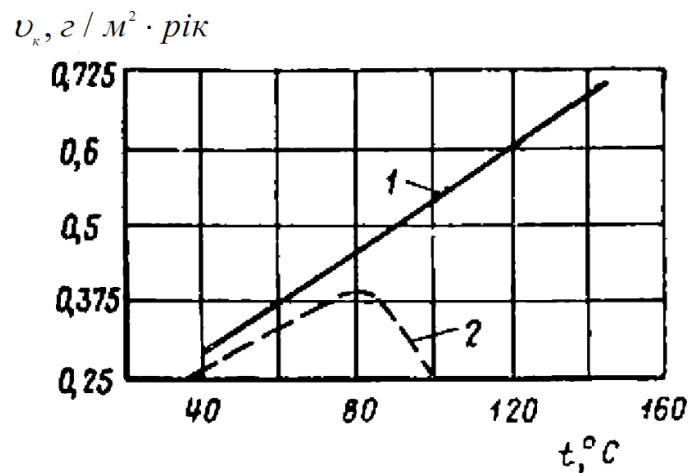


Рисунок 5.2 – Залежність швидкості корозії сталі у воді

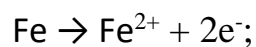
$v_k$ , мм/рік від температури  $t$ , °С:

1 – замкнута система; 2 – відкрита система

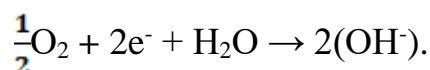
Розчинність кисню у воді змінюється залежно від її температури для одного і того ж парціального тиску: у разі 0 °С вміст  $O_2$  у воді дорівнює 20 см<sup>3</sup>/л (14,16 мг/л); у разі 20 °С – близько 6 см<sup>3</sup>/л (8,84 мг/л); у разі 40 °С – близько 4,2 см<sup>3</sup>/л (6,59 мг/л); у разі 60 °С – близько 3,15 см<sup>3</sup>/л; у разі 80 °С – близько 2,2 см<sup>3</sup>/л; у разі 100 °С – 0.

Кисень щодо корозії відіграє двояку роль: може бути і підсилювачем, і сповільнювачем. Корозія збільшується майже пропорційно до зміни вмісту кисню у воді. Водночас реакції відбуваються, наприклад, згідно із такими рівняннями:

– анодний процес



– катодний процес



Кисень необхідний для утворення захисних плівок. Він може руйнувати водневу плівку на катоді і утворювати у питній воді іони  $\text{OH}^-$ . Ці іони є позитивним електродом, який тягне до себе позитивні заряди з металу. Вказана вище реакція називається процесом із кисневою деполяризацією.

Однак у природних водах (лужних і нейтральних) кисень впливає на щільність захисної плівки, що утворюється: у разі малого вмісту кисню плівка виходить пухкою, погано липне; за великої концентрації кисню плівка виходить щільною, добре липне, завдяки чому корозія може припинитися або сповільнитися. За дослідями багатьох авторів, у разі  $\text{pH} = 6-8$  та зростання кількості кисню у воді до  $14-20 \text{ см}^3/\text{л}$  корозія збільшується, потім за більшої величини – падає і стає незначною. У разі кислих вод ( $\text{pH} < 6$ ) повільна дія кисню зникає.

Вуглекислота не викликає сильної корозії у разі лужних та нейтральних вод. Із концентрацією у воді  $\text{CO}_{2\text{своб}}$  у межах до  $30 \text{ мг/л}$  швидкість корозії вуглецевої сталі залишається майже такою самою, що й у воді, яка не містить вуглекислоти (як у прикладі, наведеному на рисунку 5.3, що дорівнює  $0,13-0,15 \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$ ). Потім вона зростає і перевищує межу допустимості із концентрацією  $\text{CO}_{2\text{своб}}$  понад  $70 \text{ мг/л}$ . Негативний вплив вільної вуглекислоти полягає в тому, що вона утримує у розчині солі кальцію і цим перешкоджає утворенню захисної плівки.

Хлориди є прискорювачами корозії з двох причин: по-перше, внаслідок збільшення кислотності води; по-друге, внаслідок руйнівної дії, що подається хлорид-іоном на захисну плівку.

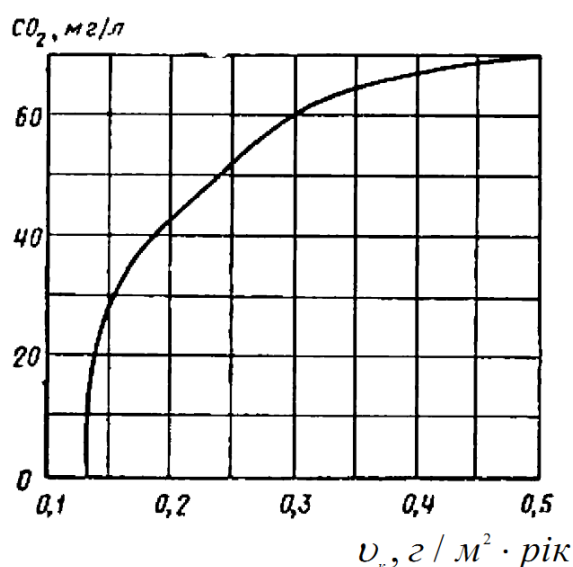


Рисунок 5.3 – Залежність швидкості корозії вуглецевої сталі від концентрації вільної вуглекислоти у воді

Сульфати впливають на корозію металу із карбонатною твердістю більшою за 2 мг-екв/л незначно, але агресивно впливають на бетон. Із вмістом сульфатів до 300 мг/л вода вважається слабо агресивною, до 600 мг/л – середньої агресивності та понад 600 мг/л – сильно агресивною, а понад 1 200–1 500 мг/л – дуже агресивною.

Нітрати вже за невеликих концентрацій викликають окислення металу, що сприяє утворенню на залізі захисної плівки. З погляду корозії вміст нітратів до 20 мг/л не є небезпечним.

Кислоти прискорюють процес корозії, оскільки є деполяризаторами.

Сірководень посилює корозію. Він може викликати корозію навіть за браком кисню, утворюючи елементарну сірку і сульфід заліза, які будуть катодом щодо основного металу. За наявності кисню сірководень утворює сірчисту та сірчану кислоти, які є деполяризаторами.

Збільшення швидкості руху води прискорює корозію поверхні металу, що омивається. За браком руху води корозійний процес відбувається між поверхнею металу та прилеглими шарами води, тому швидко настає поляризація. Під час руху до реакції долучаються нові маси води, збільшується приплив кисню і корозія посилюється.

Біологічні обростання завжди пов'язані з осадженням механічних домішок, тому вони викликають утворення локальних корозійних елементів і стимулюють розвиток точкової корозії. В окремих випадках можуть розвиватися бактерії, що відновлюють сульфат (виробляють  $H_2S$ ), які спричиняють також точкову корозію. А в інших випадках можуть розвиватися залізобактерії (із вмістом у воді заліза не менше 0,2 мг/л), які переводять закисне залізо  $Fe(OH)_2$  у окисне  $Fe(OH)_3$ .

**Корозія у системах теплопостачання.** Металеві труби досі становлять переважну частку загальної кількості трубопроводів, більшість з яких виготовляється із вуглецевих сталей, що зазнають посиленої корозії. На рисунку 5.4 подано класифікацію видів корозії.



Рисунок 5.4 – Загальна класифікація видів корозії

Методи боротьби із корозією вибираються залежно від її переважного виду, що спостерігається у спроектованих або чинних теплових мережах.

Зовнішню корозію намагаються подолати пасивними та активними методами. До пасивних методів, крім захисних покриттів, належить використання електроізоляційних вставок на трубопроводах і елементах теплової мережі. До активних методів захисту від зовнішньої корозії належить зменшення корозійної агресивності ґрунту та зменшення зволоження теплоізоляції, а також дренаж, катодний та протекторний захист.

Внутрішню корозію також долають пасивними та активними методами. Пасивні методи – це нанесення захисних покриттів (оцинкування, емалювання). До активних методів належать деаерація, дегазация та реагентна обробка води, а також силікатування.

Говорячи про проблеми внутрішньої корозії у системах СЦГВ, ми не маємо права не відзначити, що серед усіх республік колишнього СРСР саме в Україні проводилася найзначніша робота із захисту чорних сталевих труб. Ця робота проводилася у різних напрямках: магнітна обробка, силікатування, вакуум-деаерація.

Найбільш ефективним та життєздатним виявився метод вакуум-деаерування гарячої води у Запоріжжі.

На жаль, досвід промислової експлуатації магнітної обробки води у системах СЦГВ не дав позитивного результату.

Потрібно наголосити на головному: корінною відмінністю дефектності систем гарячого водопостачання від дефектності систем опалення є характер корозії чорного металу. У системах опалення, де зазвичай циркулює хімічно

очищена деаерована вода, виникає переважно зовнішня корозія, викликана різними причинами: блукаючі струми, витікання з інших систем, хімічний склад ґрунту тощо. У системі СЦГВ понад дев'яносто відсотків дефектів – результат внутрішньої корозії. Посилена внутрішня корозія викликана хімічним складом недеаерованої водопровідної води, що нагрівається, та «заповітруванням».

Внутрішня корозія трубопроводів гарячої води та особливо циркуляційних трубопроводів – це основна причина «відмов» у всій системі тепlopостачання України. За даними тепlopостачальних організацій, прориви у мережах централізованого гарячого водопостачання на порядок перевищують кількість проривів у подавальних та зворотних мережах опалення. Ці труби чорні сталеві, без покриття.

Термін служби трубопроводів СЦГВ із чорних сталевих труб 3–5 років – це не виняток, а звичайне явище навіть у разі добре організованої експлуатації.

Звісно, якщо нормативне використання труби становить 25 років, а вона прослужувала лише 4 роки, то більшість ресурсів тепlopостачальної організації витрачається на ліквідацію проривів для підтримки стабільної роботи СЦГВ. Але водночас ресурсів треба вшестеро більше, ніж за нормами. У результаті цей фактор, а також зростання тарифів і брак належної уваги до інших складових системи тепlopостачання призводить до нестабільності роботи та скарг споживачів.

Аналіз показує, що проблема посиленої внутрішньої корозії із зовнішніх та внутрішньобудинкових систем гарячого водопостачання із чорних сталевих труб притаманна всім СЦГВ (незалежно від їхньої протяжності), та не залежить від місця приготування гарячої води. Від того, що вода нагрівається в одній бойлерній на ЦТП або в безлічі бойлерних (ІТП), проблема масового виходу з ладу труб не зникне.

Водночас накопичений піввіковий світовий і частково вітчизняний досвід централізованого гарячого водопостачання наочно свідчить про можливість багаторічної стабільної подачі гарячої води у дуже протяжних зовнішніх і внутрішньобудинкових мережах, без якоїсь її спеціальної обробки за умови застосування у системах оцинкованих, мідних, латунних неметалевих трубопроводів.

## **5.2 Теоретична та практична оцінка агресивності води**

Агресивність тієї чи іншої води характеризується корозією матеріалу обладнання та споруд. Можливість корозії матеріалу (металу, бетону тощо) у

воді, що використовується для виробничого водопостачання, встановлюється на основі досвіду експлуатації. За відсутністю досвіду можливість агресивності води у системах водопостачання за схемою із прямоточним, послідовним або оборотним зі ставком-охолоджувачем використанням її для охолодження продукту без зіткнення із ним можна визначати, користуючись розрахунком на основі порівняння дійсної величини рН із обчисленою величиною рН рівноважного насичення води карбонатом.

Визначення агресивності та ймовірності корозії води у системах оборотного водопостачання із градирнею або бризкальним басейном зазначеним вище методом не рекомендується внаслідок специфічних особливостей оборотної води. Можна вважати, що вода буде слабо агресивною у разі загального вмісту розчинених у ній солей до 500 мг/л, зокрема  $\text{Cl}^-$  та  $\text{SO}_4^{2-}$  (сумарно) до 150 мг/л із карбонатною твердістю не менше за 2,5–3 мг-екв./л і рН не нижче за 6. Агресивність води зростатиме зі збільшенням загального вмісту розчинених у ній солей більше за 500 мг/л, зокрема концентрації  $\text{Cl}^-$  та  $\text{SO}_4^{2-}$  (сумарно) більше за 150 мг/л, зі зменшенням її карбонатної твердості менше ніж 2,5 мг-екв./л і рН нижче ніж 6. Агресивність води підвищуватиметься зі збільшенням концентрації розчиненого в ній кисню понад 6 мг/л.

У процесі корозії металу дуже важливу роль відіграють захисні плівки, що утворюються на його поверхні із продуктів корозії. Такі плівки у трубопроводах природної та оборотної води складаються переважно з гідрату закису та окису заліза. Спочатку утворюється гідрат закису заліза  $\text{FeO}$ , який потім перетворюється на окис  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . У разі осадження окис заліза (іржа) вихоплює із води частину кальцієвих, а також магнієвих та кремнекислих сполук, внаслідок чого обсяг продуктів корозії у багато разів (у 10–30 разів) перевищує об'єм металу, з якого вона утворилася.

Потім ця плівка ущільнюється і, добре прилягаючи, захищає метал від інтенсивного процесу корозії. Якщо плівка буде пухкою, то під нею триватиме процес корозії, і вона може стати бугристою. Іноді плівка розривається або ламається, і корозія зосереджується в оголеному місці, що призводить до глибоких виразок. У деяких випадках в окисній плівці утворюються газонепроникні мікробульбашки, які перешкоджають дифузії іонів металу і гальмують процес окислення металу. Можливо також суцільне відшарування великих залишків плівки і її розтріскування.

Зі сказаного про захисні плівки, що утворюються, випливає, що процес корозії металу не буде однаково інтенсивним весь час. У початковий період

пропускання води теплообмінними апаратами і трубами руйнуватиметься наявна на поверхні металу окисна плівка, що складається із  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (рис. 5.5, етап I); потім відбувається процес формування плівки із гідратованих оксидів заліза (етап II); потім – період ущільнення плівки, що утворилася, на поверхні металу (етап III); нарешті, через якийсь час настає стаціонарний режим корозії (етап IV). Про швидкість корозії необхідно судити під час стаціонарного режиму, що настає зазвичай через кілька сотень годин (близько 700–800 год) від початку подачі води трактом її руху.

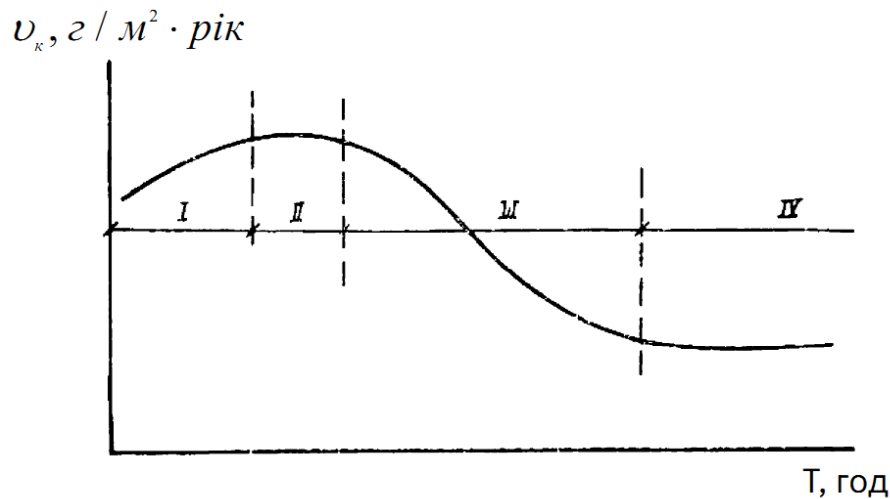


Рисунок 5.5 – Стадії процесу корозії металу та утворення захисної плівки: I – руйнування наявної на поверхні металу окисної плівки; II – формування плівки з гідратованих оксидів заліза; III – ущільнення плівки, що утворилася на поверхні металу; IV – стаціонарний режим корозії

Ступінь корозійної стійкості матеріалу характеризують швидкістю корозії його за дії агресивного середовища (води). Корозійна стійкість металів у разі рівномірної корозії та стаціонарного процесу визначається швидкістю корозії у  $\text{г/м}^2\text{-год}$  або  $\text{мм/рік}$ . Корозійна стійкість неметалічних матеріалів оцінюється якісно щодо зміни міцності, проникності та інших властивостей матеріалів.

Оцінку ступеня агресивного впливу середовища (води) на незахищені метали та неметалеві матеріали потрібно проводити за даними випробувань їхніх зразків та показниками, наведеними у таблицях 5.1 та 5.2. Випробування зразків матеріалу проводяться у лабораторних або натурних умовах, з експозицією у воді не менше 800 годин.

Таблиця 5.1 – Десятибальна шкала корозійної стійкості металів у воді

Група стійкості металу у воді	Швидкість корозії С, г/м <sup>2</sup> · год	Проникність корозії, мм/рік	Бал корозійної стійкості
I. Цілком стійкі	< 0,000 9	<0,001	1
II. Дуже стійкі	0,000 9–0,004 5	0,001–0,005	2
	0,004 5–0,009	0,005–0,01	3
III. Стійкі	0,009–0,045	0,01–0,05	4
	0,045–0,09	0,05–0,1	5
IV. Відносно стійкі	0,09–0,45	0,1–0,5	6
	0,45–0,9	0,5–1	7
V. Малостійкі	0,9–4,5	1–5	8
	4,5–9,1	5–10	9
VI. Нестійкі	> 9,1	> 10	10

Таблиця 5.2 – Оцінка ступеня агресивного впливу води на неметалеві матеріали за зовнішніми ознаками (СН 262-67)

Ступінь агресивного впливу води	Характер корозійного руйнування незахищеного матеріалу після річної експлуатації
Слабка	Слабке луцення матеріалу (бетону тощо), зміна кольору або виду (деревини, пластиків)
Середня	Пошкодження кутів та граней, волосяні тріщини у бетоні. Розтріскування та розщеплення деревини
Сильна	Яскраво виражене руйнування матеріалу (сильне розтріскування, випадання окремих шматків) зі зменшенням міцності

### 5.3 Методи захисту металу від корозії

Під час проектування систем оборотного водопостачання із вимушеним застосуванням агресивної (стосовно металу та бетону) води потрібно насамперед вибирати стійкі матеріали для обладнання, трубопроводів та споруд, передбачати їх захист покриттями або відповідну обробку води.

Забезпечення корозійної стійкості виробничих апаратів та іншого обладнання має передбачатись у технологічних проектах виробництва з урахуванням ступеня агресивності води. Корозійну стійкість споруд, конструкцій та трубопроводів потрібно забезпечувати засобами, викладеними у таких нормативних документах, як ДСТУ Б В.2.6-145:2010 у частині другого розділу «Бетонні та залізобетонні конструкції» за винятком пунктів 2.44,

2.47–2.61, ДСТУ Б В.2.6-193:2013 Захист будівельних конструкцій від корозії (у частині металевих конструкцій), а також інших спеціальних вказівках.

Захист металу від корозії можна здійснювати багатьма способами. Вибір того чи іншого з них у кожному окремому випадку має ґрунтуватися насамперед на знанні причин виникнення корозії, її форми тощо. Водночас необхідно узгодити такі вимоги: 1) ефективність захисту; 2) збереження металом всіх очікуваних від нього механічних властивостей; 3) захист має бути якомога дешевшим.

Основними методами захисту металів від електрохімічної корозії у системах оборотного водопостачання є такі:

1. Обробка корозійного середовища, що становить переважно нейтралізацію кислих стічних вод (наприклад, у системах обігу промивних вод під час травлення металу в кислоті). До цього методу належить також знекиснення води, але воно у системах оборотного водопостачання не застосовується.

2. Обробка води уповільнювачами корозії з утворенням захисних окисних та інших неметалевих плівок неорганічними та органічними:

а) до неорганічних сповільнювачів корозії належать нітрат натрію  $\text{NaNO}_3$ , хромат калію  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  та біохромат калію  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , силікат натрію  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , фосфати (гексаметафосфат натрію, триполіфосфат натрію та динатрій);

б) до органічних уповільнювачів корозії належать глюкозати хрому, сульфоглюкозати натрію тощо;

3. Захисні покриття металу лаками, фарбами, смолами та емалями;

4. Електрохімічний протекторний захист металу. Застосування того чи іншого методу має ґрунтуватися на дослідженнях як швидкості корозії металу без застосування захисту, так і ефективності захисту.

#### **5.4 Дослідження швидкості корозії та ефективності захисту металу**

Процес корозії сталі у кожній воді досліджується у натурних умовах або на лабораторній установці. Для дослідів щодо дослідження корозійних властивостей води та ефективності захисту металу тим чи іншим методом використовуються прямокутні пластинчасті маркіровані зразки із вуглецевої сталі (рис. 5.6), розміром 30 мм × 15 мм × 2 мм або 60 мм × 20 мм × 3 мм, а також інші, які називаються часто «індикаторними пластинками». Поверхня кожного зразка з усіх боків ретельно механічно обробляється, зачищається наждачним папером № 0. Перед початком досліду зразки знежирюються етиловим спиртом, протираються фільтрувальним папером та зважуються на

аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г.

Дослідження корозії в динамічних лабораторних умовах може проводитися у баках, заповнених водою (рис. 5.7). У ці баки з водою, необробленою або обробленою тими або іншими реагентами (інгібіторами), поміщаються марковані і підготовлені сталеві зразки, що прикріплюються до диска, який обертається зі швидкістю, що відповідає швидкості води в теплообмінних апаратах або трубопроводах. За необхідності у бак можна помістити електронагрівач води з терморегулятором для автоматичної підтримки у ньому заданої температури води.

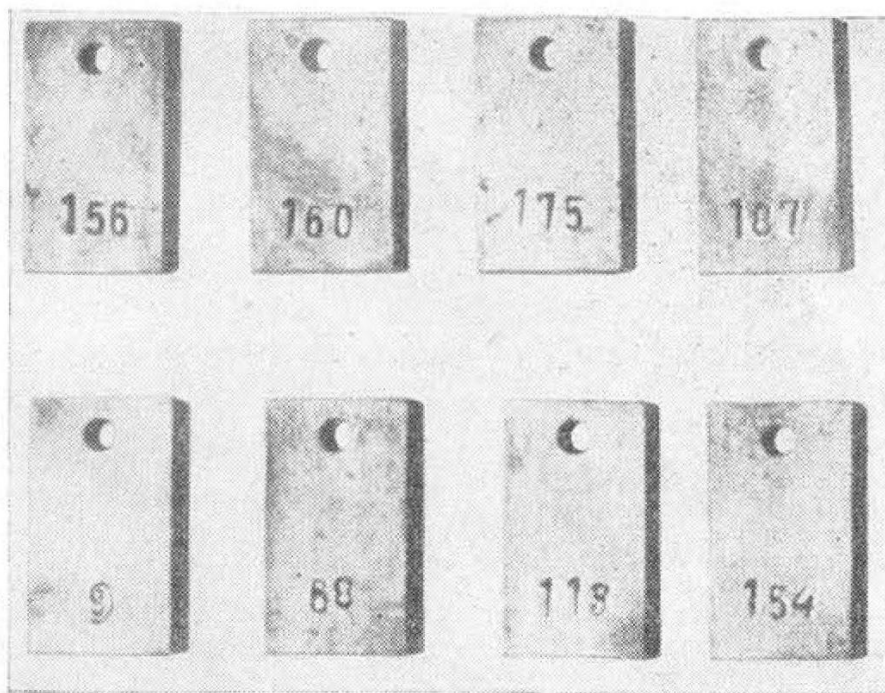


Рисунок 5.6 – Пластинчасті зразки з вуглецевої сталі для дослідження корозійності води та ефективності захисту металу

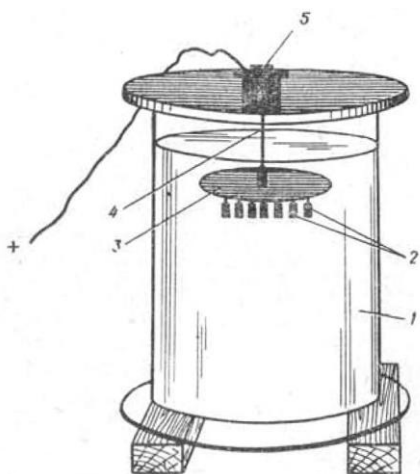


Рисунок 5.7 – Лабораторна установка для дослідження корозійності води та ефективності методів захисту металу в динамічних умовах:

1 – бак із водою ємністю 20 л; 2 – марковані пластинки; 3 – диск, що обертається зі зразками; 4 – вал, що з'єднує диск із електродвигуном (5)

Для дослідження корозії в натурних умовах підготовлені марковані індикаторні сталеві пластинки (1) (рис. 5.8) набираються на дрот (2), який ізольований поліхлорвініловою стрічкою, з відділенням їх один від одного керамічними кільцями (3). Укріплені на одному загальному дроті всі зразки занурюються в потік води в резервуар у теплообмінному апараті. Пластинки не повинні вібрувати у потоці води.

Кількість пластинок, що випробовуються, у лабораторних або натурних умовах повинна бути такою, щоб у кожен експозицію знімалося не менше трьох зразків. Знімаються пластинки по черзі через встановлені проміжки часу експозиції їх у воді, наприклад, через 168, 336, 504, 672 і 1008 год.

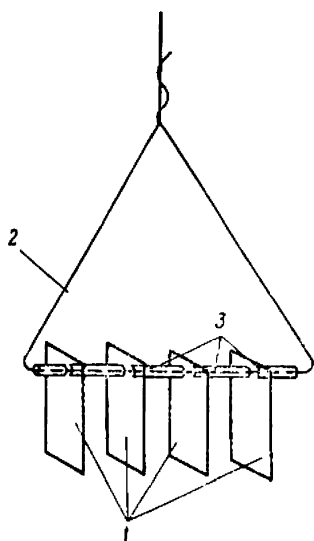


Рисунок 5.8 – Кріплення зразків маркованих пластинок зі сталі, що досліджується на корозійну стійкість у водному середовищі:

- 1 – марковані пластинки зі сталі; 2 – дрот ( $d = 2-4$  мм), ізольований поліхлорвініловою стрічкою;
- 3 – керамічні кільця для ізоляції сталевих пластинок

Вилучені з досліджуваної води зразки промиваються водою, очищаються від продуктів корозії чорнильною гумкою, потім м'якою пемзою і знову промиваються, а після протираються фільтрувальним папером та спиртом; іноді може знадобитися обробка їх у 5-відсотковому розчині інгібованої кислоти. Після 20-хвилинного просушування в ексікаторі зразки зважуються на аналітичних терезах.

За зовнішнім виглядом зразків визначається характер корозійних поразок: корозія може бути рівномірною або нерівномірною, виразковою або точковою. Отримана різниця у вазі кожної пластинки, як і всієї групи пластинок кожної експозиції, до встановлення у воду і після закінчення терміну випробування вказує на наявність корозії.

Для кількісної оцінки корозії металу використовується швидкість корозії  $v_k$ , яка дорівнює відношенню різниці між вагою металу у вихідному стані  $M_1$  і після випробування (кородованого)  $M_2$  у грамах до одиниці досліджуваної поверхні  $F$  м<sup>2</sup> за одиницю часу

$$v_k = (M_1 - M_2) / FT, \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}, \quad (5.1)$$

де  $T$  – час перебування зразка у досліджуваній воді в годинах.

Водночас отримані результати швидкості корозії за втратою ваги  $v_k$  у  $\text{г/м}^2\cdot\text{год}$  перераховуються на лінійну швидкість або проникність корозії  $\Pi$  за формулою:

$$\Pi = 8,76 \frac{v_k}{\rho}, \text{ мм} \cdot \text{рік}, \quad (5.2)$$

де 8,76 – коефіцієнт перерахунку;

$v_k$  – швидкість корозії,  $\text{г/м}^2\cdot\text{год}$ ;

$\rho$  – щільність металу, яка становить для вуглецевої сталі  $7,85 \text{ г/см}^3$ .

Результати вимірювань та обчислень записуються до таблиці. У цій же таблиці вказується група і бал корозійної стійкості металу, що випробовувався у досліджуваній воді. А за результатами дається оцінка корозійних властивостей води, встановлюється необхідність обробки води або інший метод захисту металу від корозії, визначається ефективність обраного методу захисту або дозування реагенту, що додається.

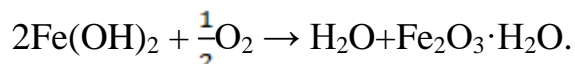
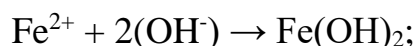
Варто пам'ятати, що із зазначеної оцінки обирається стаціонарний режим корозії (рис. 5.5 етап IV),, для повноти картини бажано за отриманими даними досліджень побудувати криву швидкості корозії.

### 5.5 Утворення захисної карбонатної плівки на металі

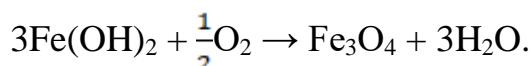
Найбільш відомою і дешевою захисною плівкою є так звана карбонатна плівка, що самостійно утворилася, яка складається переважно з оксидів заліза (50–70 %) і карбонату кальцію (10–20 %), решта – переважно кремнієва кислота. Така тонка плівка, що добре прилягає до поверхні металу, добре його захищає від корозії. Однак товщина цієї плівки не повинна бути більшою за 0,5 мм, щоб уникнути зменшення теплопередачі стінки апарату від охолоджуваного продукту у воді. Карбонатну плівку регульованої товщини потрібно створювати шляхом вибору відповідного розміру освіження оборотної води (продування системи) або обробки додаткової води вапном (вапняним молоком) або вапном і содою. Виділення карбонатної плівки на чисту теплообмінну поверхню та стінки трубопроводів з утворенням щільної захисної плівки може відбуватися за карбонатної твердості оборотної води не менше ніж 1,5–2 мг-екв/л, за наявності у воді  $\text{Ca}^{2+}$  та вмісту  $\text{Cl}^-$  не більше 50 мг/л за браком або у разі дуже малого скидання води із системи оборотного водопостачання. За більшої карбонатної твердості води вміст  $\text{Cl}^-$  у ній може бути допущено до 100 мг/л і більше.

Самоутворення захисної плівки пояснюється тим, що в результаті корозії водопровідних металевих трубопроводів у нейтральному або слаболужному

середовищі спочатку утворюється гідроксид двовалентного заліза, який із перевищенням межі розчинності випадає в осад і за наявності достатньої кількості кисню окислюється далі до гідроокису тривалентного заліза



Однак якщо вміст кисню у воді недостатній, то утворюється магнетит.



У цих умовах магнетит утворює пухкі шари, які не в змозі запобігти корозії сталі.

Завдяки пристінковій лужності поряд з протіканням цих реакцій у граничному шарі відбувається зсув рівноваги «вапно – вуглекислота» у бік виділення карбонату кальцію, який входить у захисну карбонатну плівку.

За низької карбонатної твердості води захисну плівку  $\text{CaCO}_3$  на теплообмінній поверхні та стінках можна створити обробкою води. Вапном зв'язується надлишок вільної вуглекислоти ( $\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$ ), з'являється додаткова кількість іонів  $\text{CO}_3^{2-}$  ( $2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), що утворює з іоном  $\text{Ca}^{2+}$  осад  $\text{CaCO}_3$ , який і відкладається у вигляді плівки на поверхні металу, що омивається водою. До утворення карбонатної плівки поверхня, що захищається нею, повинна бути добре очищена від продуктів корозії та інших осадів.

Необхідну дозу лугу визначають розрахунком та коригують за індикаторними пластинками. Коли шар карбонату кальцію досягне 0,5 мм, дозування лугу можна зменшити до величини, достатньої для збереження цього захисного шару. Товщину захисної плівки, що контролюється, бажано регулювати так, щоб, з одного боку, попередити інтенсивне відкладення  $\text{CaCO}_3$ , а з іншого – забезпечити захист від корозійного впливу води. У зв'язку з широкими межами зміни температур, з якими доводиться мати справу в кожній окремій системі охолодження оборотного водопостачання, дуже важко, а в багатьох випадках і зовсім неможливо підтримувати якість охолоджувальної води такою, щоб отримувати рівномірний шар карбонату кальцію у всій системі.

Водночас у місцях посиленої тепловіддачі і з високою температурою нагрівання стінки може відбуватися відкладення карбонату кальцію, і в той же час на холодніших ділянках може відбуватися активна корозія через нестачу

захисного карбонатного шару. Іноді такий захисний шар карбонатної плівки в теплообмінних апаратах (0,5 мм) утворюється саморегулюванням його у такій системі оборотного водопостачання.

Карбонатна плівка, що утворюється, іноді може і не забезпечувати надійний захист металу від корозії, проте її наявність зводить до мінімуму потрібну кількість інших інгібіторів.

### **5.6 Обробка води сповільнювачами корозії**

Уповільнювачі корозії, звані також інгібіторами, за своєю природою бувають іонними чи молекулярними сполуками. Вони адсорбуються на поверхні металу, що кородує, електрохімічно або хімічно; можлива також адсорбція їх внаслідок одночасної дії різних сил. Адсорбуючись на поверхні кородуючого металу, сповільнювачі гальмують протікання анодного або катодного процесу електрохімічної корозії, або, утворюючи плівку, яка екранує, ізолюють метал від електроліту, або ж мають змішаний характер уповільнюючої дії.

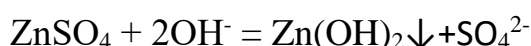
До анодних уповільнювачів електрохімічної корозії металів належать кисень, нітрити, хромати тощо, які, пасивуючи метал, ускладнюють перебіг анодного процесу, тобто уповільнюють корозію. Механізм плівкової уповільнюючої дії, наприклад хромат-іона, на корозію заліза можна уявити так: хромат-іон реагує з іоном заліза, що виник у шпарі захисної окисної плівки, і утворює нерозчинне з'єднання, яке, осідаючи, закриває шпару і перешкоджає корозії заліза. Механізм адсорбційної дії того ж хромат-іона, який містить іон хрому і тетраедрично розташовані навколо нього чотири іони кисню, можна уявити так: розташування зарядів таке, що центр іона дуже позитивний і притягує електрони на поверхні заліза, що до певної міри надає нерухомість електронам, а іони кисню так само впливають на іон-атоми металу, що затримує корозію заліза. На думку деяких дослідників, адсорбційна взаємодія хроматів із залізом супроводжується утворенням поверхневої сполуки.

За недостатньої концентрації анодних уповільнювачів для настання повної пасивації металу (особливо за наявності іонів, що депасивують, наприклад іонів  $\text{Cl}^-$ ) вони є небезпечними, оскільки можуть викликати прискорення загальної або місцевої корозії, діючи як катодні деполяризатори.

До катодних сповільнювачів електрохімічної корозії належать речовини, що перевищують перенапругу катодного процесу під час їхньої адсорбції на катодних ділянках поверхні металу, що кородує: солі або оксиди миш'яку і вісмуту, желатину та інші органічні речовини. За недостатньої концентрації

у воді вони не викликають посилення корозії.

До екрануючих сповільнювачів електрохімічної корозії металів належать речовини, що адсорбуються на металі і утворюють хемосорбційний шар або частіше захисну плівку нерозчинних продуктів, взаємодіючи з первинними анодними продуктами корозії – іонами металу, що розчиняється (NaOH і Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> утворюють гідроокиси чорних металів, фосфати і бензоати заліза, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – силікати заліза та алюмінію) або з первинними катодними продуктами – гідроксильними іонами у разі кисневої деполяризації



До змішаних уповільнювачів електрохімічної корозії металів належать речовини, що гальмують перебіг обох електродних процесів.

Ефект дії уповільнювачів корозії металів прийнято характеризувати величиною захисної дії

$$ZE = \frac{v_{k1} - v_{k2}}{v_{k2}} \cdot 100\%, \quad (14.4)$$

де  $v_{k1}$  і  $v_{k2}$  – швидкість корозії металу без уповільнювача та з уповільнювачем у г/м<sup>2</sup>·год.

Зауважимо, що у системах прямого та послідовного використання води для охолодження продукту та обладнання обробку води інгібіторами для боротьби з корозією металу не застосовують, оскільки це потребувало б великої кількості хімікатів і викликало б забруднення водойм. Для охолоджувальних систем оборотного водопостачання з градирнями та з бризкальними басейнами досить добрих (надійних та недорогих) інгібіторів ще не розроблено. Універсальна дієвість японського препарату «Кока-Рокем», розрекламованого фірмами «Ніссе Компані» та «Тохо токай Компані», перевіркою не підтверджується, вартість його непомірно висока.

*Обробка води силікатом натрію.* Розчинення силікату натрію у воді супроводжується гідролізом з утворенням їдкого натру та двоокису кремнію за такою реакцією:



Двоокис кремнію адсорбується на поверхні металу разом з окислами заліза, утворюючи захисну плівку, що перешкоджає подальшій корозії. Однак обробка води силікатом натрію за карбонатної твердості понад 5,5 мг-екв/л не рекомендується; вода повинна мати рН > 6. Ефективна доза силікату натрію

здебільшого залежить від вмісту у воді хлориду.

Силікатну плівку регульованої товщини потрібно створювати на попередньо окисленій теплообмінній поверхні та стінках трубопроводів обробкою води розчином силікат-брили або рідкого скла у разі рН більше за 6, але менше за 8,5 та карбонатної твердості не більше за 5,5 мг-екв/л. Відношення  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  – кремнеземистий модуль має дорівнювати 2,4–3,2.

Дозу силікату натрію рекомендується призначати залежно від вмісту хлоридів та сульфатів у воді, що обробляється. Орієнтовно можна обрати такі дози:

$\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ у мг/л	50	100	200	300	400	500	600	650
Доза $\text{SiO}_2$ у мг/л	10	12	18	25	30	35	38	40

Для прискореного утворення захисної плівки протягом 1,5–2 місяців дозу силікату натрію необхідно збільшити вдвічі. Введення у воду  $\text{SiO}_2$  більше 100 мг/л не рекомендується через небезпеку утворення відкладень, що важко видаляються. Розчин рідкого скла (технічний продукт містить 30 %  $\text{SiO}_2$ ) можна готувати концентрацією 2–5 % за вмістом  $\text{SiO}_2$  за температури води до 40 °С. Розчин із силікат-брили можна отримати фільтруванням гарячої води (понад 40 °С) через роздроблену брилу на зерна крупністю 5–7 см, що завантажуються у напірний фільтр-дозатор. Вага 1 м<sup>3</sup> завантаження вказаних зерен становить близько 1 000 кг. Швидкість фільтрування води під час розчинення силікат-брили можна обрати 300–500 м/год.

*Обробка води хроматами.* Можна використати хромат калію  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  та біхромат калію  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . У процесі обробки води відбувається спільне осадження гідроксиду заліза та хрому у шпарах окисної плівки на поверхні металу. Ці гідроксиди блокують шпари металу і зупиняють процес корозії. У зарубіжній практиці цей метод боротьби з корозією металу у системах оборотного водопостачання успішно застосовується протягом багатьох років. Концентрації хроматів в окремих системах водопостачання коливалися від 200 мг/л до 500 мг/л залежно від вмісту у воді хлориду (як і під час обробки води силікатом натрію); рекомендується підтримувати рН води 7,5–9,5. Рекомендується для прискореного утворення захисної плівки протягом 1–3 місяців підтримувати концентрацію хроматів у воді 500–1 000 мг/л, а потім поступово знижувати у 2–2,5 рази.

Хромати – найефективніші інгібітори корозії, що зводять до мінімуму втрати металу. Крім того, вони виконують роль стерилізаторів у боротьбі з біологічними обростаннями, і таким чином відпадає необхідність у

додаткових заходах для боротьби з ними.

Водночас хромати мають і істотний недолік: захисна плівка, що утворюється, здатна пропускати через свої шпари іон хлору, який викликає руйнування металу під цією плівкою; за недостатньої кількості хромату стимулюється розвиток виразкової корозії. Застосування цього інгібітора у кожному конкретному випадку має перевірятися за допомогою лабораторних і виробничих дослідів.

*Обробка води фосфатами.* Під час додавання у воду гексаметафосфату натрію утворюються малорозчинні сполуки метафосфату кальцію  $\text{Ca}[\text{Ca}_2(\text{PO}_3)_6]$  і метафосфату магнію  $\text{Mg}[\text{Mg}_2(\text{PO}_3)_6]$ , які і відкладаються на поверхні металу, що омивається водою, утворюючи плівку, ізолюючи метал від води. До утворення метафосфатної плівки поверхня металу, що захищається нею, повинна бути добре очищена від продуктів корозії.

Для швидкого створення захисної метафосфатної плівки під час пуску системи оборотного водопостачання після побудови або ремонту (очищення) заповнюють її водою із концентрацією гексаметафосфату натрію (у перерахунку на  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) близько 100 мг/л протягом 2–3 діб підтримують циркуляцію цієї води. Надалі збереження захисної плівки забезпечується підтримкою гексаметафосфату натрію в оборотній воді практично у кількості 2–5 мг/л  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

На відміну від хроматів фосфати сприяють розвитку біологічних обростань, особливо водоростей. Уповільнення корозії поліфосфатами не таке ефективне, як уповільнення корозії хроматами, тому останнім часом почали застосовувати ті й інші лише у комбінації. Недоліком поліфосфатних інгібіторів є їхня схильність перетворюватися на ортофосфати, які в результаті взаємодії з кальцієм швидко виводяться з розчину, що призводить до зменшення концентрації  $\text{PO}_4$  та викликає утворення шламу або накипу, які стимулюють розвиток сильної корозії. Однак поліфосфати не мають недоліків, характерних для хроматів, – вони не токсичні, під час додавання їх у воду у недостатній кількості не здатні стимулювати точкову та виразкову корозію.

У США запропоновано метод обробки охолоджувальної води, що запобігає утворенню накипу та корозії. У воду додають поліфосфати у концентрації 5–80 мг/л, ортофосфати у концентрації 1–40 мг/л, органічний комплексоутворюючий реагент у концентрації 10–25 мг/л. Концентрація реагентів, що додаються, залежить від лужності води: зі збільшенням лужності концентрація комплексоутворюючого реагенту збільшується, ортофосфатів – зменшується, поліфосфатів – залишається незмінною. Як

комплексоутворюючі реагенти можуть бути використані поліамінокарболові кислоти, їх солі, поліаміноспирти, наприклад етилендіамінтетраоцтова кислота та її солі. Можна також використовувати гідроксилкарбонові кислоти, молекули яких містять 4–7 атомів вуглецю, наприклад лимонну, глюконову тощо.

*Обробка води органічними інгібіторами.* Органічні інгібітори корозії в системах оборотного водопостачання широко не застосовуються внаслідок їхньої високої вартості та низької ефективності. На найбільшу увагу з органічних інгібіторів корозії заслуговують глюкозати хрому, які вважаються особливо ефективними у системах з гарячою водою (80–95 °С) та зниженим вмістом кисню. У зарубіжній пресі зустрічаються згадки про сульфоглюкозат натрію, емульсовані масла, похідні гліцерину і відпрацьований сульфідний луг як про інгібітори, але описів лабораторних дослідів та застосувань на практиці немає.

*Обробка води іншими інгібіторами.* Створення плівок на теплообмінній поверхні та стінках трубопроводів з метою захисту сталі від корозії можливе за допомогою інших інгібіторів, наприклад, кремнефтористого цинку, а також сумішей поліфосфатів і хроматів, динатрійфосфату та біхромату тощо. З огляду на відсутність дослідження цих та інших мінеральних та органічних інгібіторів корозії потрібно у кожному випадку проводити попередні дослідження на моделі щодо їх ефективності та умов застосування. У таких випадках у проектах систем оборотного водопостачання заходи, що застосовуються, потрібно вважати як експериментальні та дослідно-промислові.

## **5.7 Захисні покриття металу смолами, лаками, фарбами та емалями**

Органічні та неорганічні покриття поверхні металу з метою захисту його від корозії застосовують все частіше. Для цього намагаються використати великий асортимент смол, лаків, фарб та емалей.

Кожне із застосовуваних покриттів повинно відповідати таким вимогам:

- 1) створювати бар'єр проникності щодо води, кисню та агресивних хлор-іонів;
- 2) гальмувати перебіг корозійного процесу;
- 3) забезпечувати тривалий термін служби.

Перелік можливих матеріалів для покриттів металу є у спеціальній літературі.

*Смоли, лаки та фарби.* Найбільшого поширення в системах оборотного водопостачання набуло покриття поверхні металу теплообмінних апаратів

(з боку охолоджувальної води) бакелітовим лаком. Хоча воно зберігається лише певний проміжок часу, проте не вимагає великих експлуатаційних витрат. Покриття бакелітовим лаком проводиться на попередньо очищену від корозії поверхню у кілька шарів загальною товщиною 150–200 мк. Через кілька місяців експлуатації починається порушення еластичності та відшарування покриття, особливо за високих температур продукту, що охолоджується; водночас відновлення частково зруйнованого покриття є справою складною та практично неможливою. Під час покриття трубок та трубних решіток теплообмінних апаратів бакелітовим лаком (або іншим матеріалом) трубопроводи та арматура системи оборотного водопостачання залишаються незахищеними від корозії.

Таке покриття може бути вдосконалено шляхом:

а) застосування хімічного (більш ретельного) очищення поверхні металу від корозійних відкладень перед нанесенням захисного покриття лаком;

б) фосфатної обробки поверхні металу для покращення адгезії (зчеплення) лакового покриття;

в) додавання у бакеліт домішок – алюмінієвого, магнієвого або цинкового пилу, окису цинку та інших, що надають еластичність лаку і збільшують термін його служби.

Усі операції покриття лаком здійснюються на заводі або у спеціальному цеху, куди надходять теплообмінні апарати для цієї мети. Нанесення смол та фарб на поверхню металу, який захищають від корозії, аналогічне.

## **5.8 Електрохімічний захист**

Такий спосіб захисту металу від корозії (називається також катодним протекторним) заснований на тому, що у воді, яка омиває метал, що може зазнавати корозії, утворюється електрична пара, у якій метал, що захищають, відіграє роль катода, а інший металевий електрод, поміщений у ту ж воду і з'єднаний з ним електрично, – роль анода, що розчиняється. Електрична пара може утворюватися як з допомогою природної різниці потенціалів, так і шляхом накладання постійного струму від стороннього джерела. У першому випадку другий метал повинен мати нижчий, ніж перший, потенціал розчинення (для захисту заліза можна застосовувати цинк та алюміній). У другому випадку для посилення ефекту захисту використовується джерело постійного струму, до негативного полюса якого приєднується метал, який захищають (що стає катодом).

Практика застосування простого протекторного захисту конденсаторних трубок не дала ефективних результатів. Найкращі результати були отримані під

час організації електрохімічного захисту, здійсненої багато років тому, яка успішно працює на заводі «Азовсталь» та інших заводах для боротьби із корозією шийок валків прокатних станів, що охолоджуються морською водою. Шийки валків приєднані тут до негативного полюса джерела постійного струму, а сталеві стрижні, поміщені у воду, що омиває валки, – до позитивного полюса (рис. 5.9).

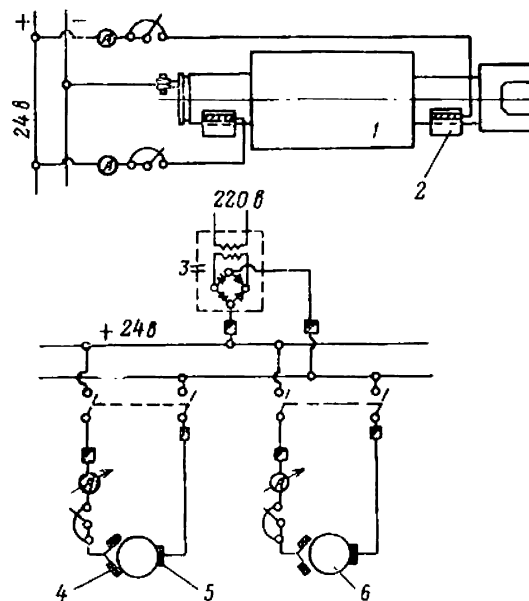


Рисунок 5.9 – Схема електрохімічного (катодного) захисту шийок валків прокатного стану від корозії, що спричиняється водою:

- 1 – валок; 2 – вкладиш підшипника; 3 – селеновий випрямляч ВСА-6н;  
4 – електрод; 5 – щітка; 6 – шийка валка

Водночас підшипники поміщаються ніби у електричну ванну, де шийка валка утворює катод, який захищають, а сталеві стрижні – руйнований анод. Щільність струму має бути досить великою, для того щоб «придушити» роботу корозійних мікрогальванічних елементів на поверхні шийок валків.

Як джерело постійного струму застосована селенова випрямна установка типу СВА-СМ, що дає напругу 24 В і силу струму до 25 А. Негативний полюс джерела струму з'єднаний із шийкою валка за допомогою контакту, виконаного у вигляді щітки (рис. 5.10).

Рисунок 5.10 – Деталі катодного протекторного захисту шийок валків прокатного стану від корозії, що спричиняється водою:

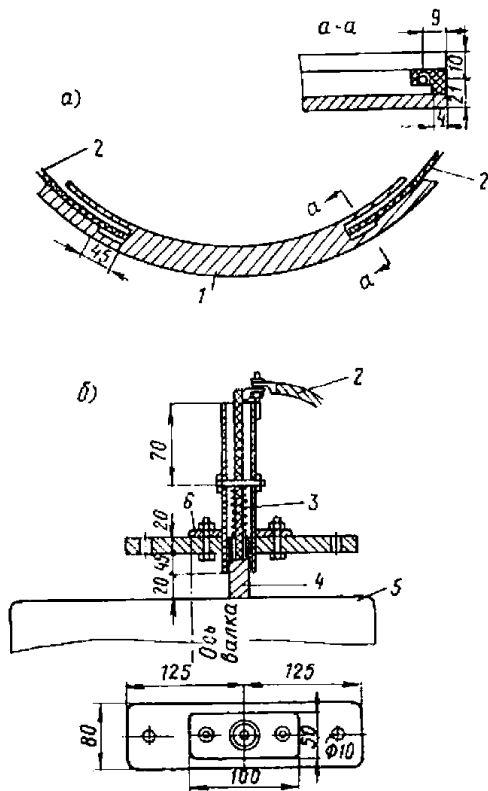
а – вкладиш з електродами;

б – контактоутримувач;

1 – текстолітовий вкладиш підшипника;

2 – дріт  $d = 2$  мм, припаяний до електрода;

3 – пружина; 4 – контактна щітка; 5 – торець шийки валка



Така форма контакту створює можливість підведення струму до шийки незалежно від швидкості та напрямі її руху. Два сталевих електроди у вигляді стрижнів із вуглецевої сталі, довжиною трохи меншою за ширину текстолітового вкладиша, поміщаються у спеціальних пазах текстолітових вкладишів. На кожен текстолітовий вкладиш підшипника поміщаються два електроди. Кожна пара цих електродів з'єднується між собою паралельно. Електроди не повинні торкатися корпусу подушки підшипника та шийки валка.

Вся установка електричного захисту шийок валків від корозії складається із джерела постійного струму, щита управління з регулятором навантаження контрольно-вимірювальними приладами, щіткових контактів для підведення струму до шийок валків та сталевих електродів.

Щільність струму на катоді рекомендується підтримувати до  $0,05$  а/дц<sup>2</sup>. У результаті організації електричного захисту шийок валків їхній стан не погіршується, вони набувають гладкої полірованої поверхні. Під час прокату близько 100 000 т металу, наприклад на стадії блумінгу, спрацьованість текстолітового вкладиша досягає лише 1,5–2 мм замість 20 мм, як це було раніше.

## **5.9 Лабораторний контроль та оцінка ефективності обробки води та захисних покриттів**

Проведення контролю за корозією металу та за його захистом тим чи іншим методом є справою не менш складною, ніж під час запобігання утворенню карбонатних відкладень та біологічних обростань у системах оборотного водопостачання. До того ж, усі вони взаємопов'язані. Контроль за корозією та ефектом захисту ведеться трьох видів: лабораторний, позалабораторний та експлуатаційний. Спільна оцінка всіх трьох видів контролю дозволяє зробити належні висновки та визначити необхідні заходи. Можуть виявитися необхідними дослідження корозії та методів її захисту на зразках у штучно створених умовах.

Позалабораторний контроль за процесами корозії та діями захисту здійснюється із використанням металевих зразків (індикаторних пластинок), які випробовуються, в експлуатаційних умовах шляхом занурення їх на певні терміни у потік оборотної води в теплообмінному апараті, трубопроводі або в резервуарі градирні. Експлуатаційний контроль становить періодичний (краще систематичний) огляд теплообмінника апаратів, трубопроводів, арматури та іншого обладнання. Результати лабораторного та позалабораторного контролю фіксуються у журналах, експлуатаційні огляди мають бути оформлені актами. Узагальнення всіх видів контролю фіксується у технічних звітах.

### **Контрольні запитання**

1. Що називають корозією металу?
2. На які типи поділяється корозія за механізмом її перебігу та за характером руйнування металів?
3. Що називається хімічною корозією? В яких середовищах вона відбувається?
4. Які чинники та як впливають на швидкість корозії?
5. У чому полягає сутність електрохімічної корозії?
6. Методи стабілізації води для попередження корозії й захисту трубопроводів.
7. У чому полягають методи дії на корозійне середовище?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДержСанПіН 2.2.4-171-10 (ДСанПіН 2.2.4-400-10). Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. – Чинний від 12–05–2010. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2010. – 25 с.
2. Орлов В. О. Водопостачання промислових підприємств : навч. посіб. / В. О. Орлов, Л. Л. Литвиненко, А. М. Орлова. – Київ : Знання, 2014. – 278 с.
3. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств : навч. посіб. / Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 280 с.
4. Орлов В. О. Водопостачання та водовідведення : підручник / В. О. Орлов, Я. А. Тугай, А. М. Орлова. – Київ : Знання, 2011. – 359 с.
5. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод : підручник / А. К. Запольський, Н. А. Мішкова-Клименко, І. М. Астрелін [та ін.] – Київ : Лібра, 2000. – 551 с.
6. Тугай А. М. Водопостачання : підручник / А. М. Тугай, В. О. Орлов. – Київ : Знання. – 2009. – 735 с.
7. Запольський А. К. Фізико-хімічна теорія коагуляційного очищення води / А. К. Запольський ; Національний університет харчових технологій. – Київ : НУХТ, 2009. – 39 с.
8. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води : підручник / А. К. Запольський. – Київ : Вища школа, 2005. – 671 с.
9. ДБН В.2.5 -74: 2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Чинний від 01–01–2014. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 172 с.
10. Орлов В. О. Водопідготовка : навч. посіб. / В. О. Орлов, А. М. Зошук. – Рівне : НУВГП, 2004. – 215 с.
11. Айрапетян Т. С. Водопідготовка на підприємствах теплоенергетики з використанням Na-катіонітових фільтрів : монографія [Електрон. ресурс] / Т. С. Айрапетян, І. М. Чуб ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; перекл. з рос. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 151 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/65101/>, вільний (дата звернення: 16.05.2024). – Назва з екрана.

12. Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів (зі змінами та доповненнями) : ДНАОП 0.00-1.08-94 / Комітет по нагляду за охороною праці України. – Київ : Основи, 1999. – 592 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_all/cgiirbis\\_64.exe](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_all/cgiirbis_64.exe), вільний).

13. Гомеля М. Д. Сучасні методи кондиціонування та очистки води у промисловості : монографія / М. Д. Гомеля, В. М. Радовенчик, Т. О. Шаблій. – Київ : Графіка, 2007. – 168 с.

14. Іванченко Л. В. Хімія і технологія води : навч. посіб. / Л. В. Іванченко, В. Я. Кожухар, В. В. Брем. – Одеса : Екологія, 2017. – 208 с.

15. Кишневський В. А. Сучасні методи обробки води в енергетиці : навч. посіб. для студентів спеціальностей «Теплоенергетика», «Атомна енергетика» та експлуатаційного персоналу ТЕС і АЕС / В. А. Кишневський. – Одеса : ОГПУ, 1999. – 196 с.

16. Процеси та апарати хімічної технології : підручник : у 2 ч. / [Л. Л. Товажнянський, А. П. Гатлінська, В. О. Лещенко та ін.] ; за заг. ред. Л. Л. Товажнянського. – Харків : НТУ «ХП». – 2007. – 540 с.

17. Степанов Д. В. Котельні установки промислових підприємств : навч. посіб. / Д. В. Степанов, Є. С. Корженко, Л. А. Боднар ; Вінницький національний технічний університет. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 120 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_all/cgiirbis\\_64.exe](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_all/cgiirbis_64.exe), вільний).

18. Чуб І. М. Масообмінні процеси водопідготовки : навч. посіб. / І. М. Чуб. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 161 с.

19. Ткачов В. О. Масопередача : конспект лекцій для студентів 3–4 курсів денної і заочної форм навчання напрямів 0926 – Водні ресурси, 6.060103 – Гідротехніка (Водні ресурси), спеціальності 6.092600 – Водопостачання та водовідведення / В. О. Ткачов, І. М. Чуб. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 83 с.

*Електронне навчальне видання*

**АЙРАПЕТЯН** Тамара Степанівна,  
**ЛУКАШЕНКО** Сергій Вікторович

**ТЕХНОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ У  
ПРОМИСЛОВОСТІ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології, освітня програма «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології»)*

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*  
Редактор *Б. О. Хільська*  
Комп'ютерне верстання *Т. С. Айрапетян*

План 2025, поз. 61Л

---

Підп. до друку 18.07.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 9,1.

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