

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

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до практичних занять

із навчальної дисципліни

**«ТЕХНОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ**  
**У ПРОМИСЛОВОСТІ»**

*(для студентів усіх форм навчання*

*освітнього рівня «бакалавр»*

*за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія*

*(освітня програма «Гідротехніка (водні ресурси)»)*

**Харків**

**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**

**2020**

Методичні рекомендації до практичних занять із навчальної дисципліни «Технологія ефективного водокористування у промисловості» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (освітня програма «Гідротехніка (водні ресурси)»)/ Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 64 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. Т. С. Айрапетян

Рецензент

**Г. І. Благодарна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очистки вод, протокол №1 від 30.08.2018.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Вибір системи і схеми виробничого водопостачання.....	5
2 Визначення розрахункових витрат водоспоживання.....	6
3 Баланси води та солей в оборотних циклах.....	6
3.1 Втрати води в системі. Стабілізація мінерального складу оборотної води.....	6
3.2 Визначення коефіцієнта концентрування через водний та сольовий баланси.....	8
Приклади розв'язання задач.....	11
Контрольна робота № 1.....	14
4 Охолодження води.....	15
4.1 Вибір типу охолоджувача.....	15
4.2 Розрахунок охолоджувачів.....	18
4.2.1 Розрахунок градирень.....	18
4.2.2 Розрахунок водосховищ-охолоджувачів.....	23
4.2.3 Розрахунок бризкальних басейнів.....	24
5 Обробка води в системах оборотного водопостачання.....	25
Приклади розв'язання задач.....	31
Контрольна робота №2.....	36
6 Зм'якшення води.....	38
6.1 Вибір метода зм'якшення води та складу споруд. Розрахунок споруд для зм'якшення води.....	38
6.2 Розрахунок споруд з пом'якшення води реагентним методом.....	41
6.3 Катіонітове зм'якшення води. Розрахунок Na -катіонітових фільтрів.....	44
6.3.1 Одноступеневе Na-катіонування.....	45
6.3.2 Двохступеневе Na-катіонування.....	47
6.3.3 H-Na-катіонування.....	50
7 Видалення з води вільної вуглекислоти. Розрахунок плівкового дегазатора.....	52
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54
ДОДАТКИ.....	55

## ВСТУП

Кожне підприємство має свої специфічні особливості використання води, свої джерела її забруднення, і відповідно до цього, вимагає розробки та впровадження конкретних технологічних вирішень проблеми очищення води з метою її комплексного використання.

Предметом навчальної дисципліни «Технологія ефективного водокористування у промисловості» є вивчення особливостей систем промислового водопостачання, методів підготовки води для промислових потреб, отримання знань з теорії і практики створення оборотних та замкнених систем водопостачання, які дозволяють скоротити або повністю виключити скид стічних вод та забруднення водних об'єктів.

Внаслідок вивчення дисципліни студент повинен знати: системи та схеми водопостачання промислових підприємств, норми та режими водоспоживання на технічні та технологічні потреби; конструкції споруд для охолодження води, їх типи та розрахунок, технологічні схеми водопостачання найбільш водоемних промислових підприємств, методи підготовки води.

Студент повинен вміти: здійснювати розрахунки охолоджуючих споруд, споруд покращення якості води для технологічних потреб підприємств різних галузей промисловості, проводити техніко-економічне порівняння під час вибору методів підготовки води.

Метою проведення практичних занять є придбання студентами навиків з розрахунку систем виробничого водопостачання, що як за схемами, так і за складом споруд відрізняються від централізованих систем водопостачання населених місць.

У даних методичних вказівках наведено дані для розробки і проектування систем промислового водопостачання, приклади розрахунків споруд з очищення виробничих стічних вод, охолодження й стабілізаційної обробки оборотної води.

## **1 ВИБІР СИСТЕМИ І СХЕМИ ВИРОБНИЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Для розробки схем систем прямого і оборотного водопостачання необхідно детально вивчити завдання і вирішити такі питання:

- якої категорії і для яких цілей використовується вода в конкретному цеху
- як можна об'єднати виробниче водопостачання окремих цехів у централізовану систему;
- чи можливе послідовне використання води з одного цеху в іншому або створення оборотного циклу;
- яку частину води потрібно очищати на каналізаційних спорудах перед їх скидом у водойму.

Принцип схеми системи прямого водопостачання (СПВ) полягає в тому, що вода з джерела подається на підприємство, де вона використовується в різних технологічних процесах. Після цього відпрацьована вода скидається у водойму відповідно до санітарних вимог випуску стічних вод.

«Умовно чисті» води можуть скидатися без очистки, а забруднені стічні води направляються на каналізаційні очисні споруди, з яких очищені стічні води потім скидаються у водойму.

Принцип схеми системи оборотного водопостачання (СОВ) полягає в тому, що вода, яка нагрівається в технологічних процесах, не скидається у водойму, а направляється на охолодження і потім знову подається на виробництво. При цьому частина води в оборотному циклі втрачається і потрібно передбачати поповнення цих втрат за рахунок додавання свіжої води. Забруднені стічні води надходять на очисні споруди і після очистки скидаються у водойму.

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ВИТРАТ ВОДОСПОЖИВАННЯ

Витрати і втрати води в оборотних циклах водопостачання і необхідну витрату свіжої води, яку необхідно додавати, розраховують на основі заданої річної продуктивності цехів, тривалості їх роботи протягом року, а також норм водоспоживання. Розрахунки виконують для всіх основних циклів підприємства чи заводу. Отримані значення витрат є основою для складання балансової схеми водоспоживання.

Розрахункову витрату оборотної води в системі водопостачання кожного виробництва визначають за формулою (чистий цикл)

$$Q_p = \frac{n_g \cdot N \cdot K_{год}}{T} \text{ м}^3/\text{ГОД}, \quad (2.1)$$

де  $n_g$  – норма водоспоживання (кількість води на одиницю продукції),  $\text{м}^3/\text{т}$ ;

$N$  – річна продуктивність заводу (цехи),  $\text{т}/\text{год}$ ;

$K_{год}$  – коефіцієнт годинної нерівномірності;

$T$  – кількість годин роботи виробництва за рік,  $\text{год}$ .

## 3 БАЛАНСИ ВОДИ І СОЛЕЙ В ОБОРОТНИХ ЦИКЛАХ

### 3.1 Втрати води в оборотних системах. Стабілізація мінерального складу оборотної води

У відкритих системах оборотного водопостачання відбуваються втрати води за рахунок випаровування частини її в охолоджувачі ( $P_1$ ) та через краплинне винесення вітром ( $P_2$ ). В результаті випаровування втрачається в середньому 0,15 % охолоджуючої води при зниженні її температури на  $1^\circ$ , виноситься повітрям в градирнях 0,2–0,3 % охолоджуючої води.

Втрати води на випаровування в градирнях, %:

$$P_1 = K_{вип} \cdot \Delta t \cdot 100, \quad (3.1)$$

де  $K_{вип}$  – коефіцієнт, що враховує долю тепловіддачі випаровуванням в загальній тепловіддачі (табл. А.1, дод. А);

$\Delta t$  – перепад температур води, який визначається як різниця температури води, яка надходить до охолоджувача і температури охолодженої води,  $^\circ\text{C}$ .

Втрати води в оборотному циклі:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (3.2)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – безповоротні втрати оборотної води при охолодженні на випаровування і винесення вітром, %;

$P_3$  – величина продувки, %.

Втрати води в охолоджувачі залежать від типу охолоджувача, кліматичних умов, температур води на вході й виході з цеху і категорії водоспоживача.

Втрати води з краплинним винесенням вітром залежать від типу охолоджувача (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Втрати води з краплинним винесенням вітром у процесі охолодження

Тип охолоджуючих пристроїв	$P_2$ , %
Бризкальні басейни з площею зрошування	
<400 м <sup>2</sup>	1,5–3,5
≥400 м <sup>2</sup>	1,0–2,5
Відкриті градирні	1–3
Баштові градирні з площею зрошування, м <sup>2</sup>	
До 150	0,5–1,0
Більше 150	0,5
Більше 150 (з краплеуловлювачами)	0,05
Вентилятори градирні з краплеуловлювачами	0,2–0,5

Всі втрати води в охолоджувальній системі зворотного водопостачання компенсуються додаванням води з джерела.

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

Кількість води, що втрачається в результаті випаровування під час охолодження, м<sup>3</sup>/год:

$$q_1 = \frac{P_1 \cdot Q_{об}}{100} \quad (3.4)$$

Кількість води, що виводиться з системи з продувкою, м<sup>3</sup>/год:

$$q_{\text{пр}} = \frac{P_3 \cdot Q_{\text{об}}}{100}. \quad (3.5)$$

Кількість води, що додається у систему, м<sup>3</sup>/год:

$$q_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д}} \cdot Q_{\text{об}}}{100}. \quad (3.6)$$

Вважається в результаті випаровування частини води в охолоджувачі розчинені солі води, що випарилася (повністю або частково) залишаються в оборотній воді, підвищуючи їх концентрацію.

Найбільш поширеним методом стабілізації охолоджуючої води є продувка систем водяного охолодження, тобто відведення частини оборотної води з заміною її свіжою. Під час продувки відбувається загальне зниження концентрації всіх домішок, у тому числі хлоридів і сульфатів, що зокрема, сприяє послабленню процесів корозії в оборотній системі охолодження. Але зазвичай стабілізація охолоджуючої води суміщає комплекс заходів, що включають як продувку системи, так і обробку води хімічними реагентами (підкислення, рекарбонізацію, фосфатування).

### **3.2 Визначення коефіцієнта концентрування через водний та сольовий баланси**

Ступінь підвищення концентрації розчинених речовин називають коефіцієнтом концентрування або коефіцієнтом випаровування. Чисельне значення цього коефіцієнта може бути виражено:

а) за випаровуванням води:

$$K_{\text{вип}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{д}} - P_1} \quad (3.7)$$

б) за концентруванням солей:

$$K_{\text{к}} = \frac{C_{\text{об}}}{C_{\text{д}}} \quad \text{або} \quad K_{\text{Cl}} = \frac{Cl_{\text{об}}^-}{Cl_{\text{д}}^-}, \quad (3.8)$$

де  $P_1$  – втрати води з системи за рахунок випаровування;

$P_2$  – втрати води з системи через винесення вітром;



$P_3$  – скид води з системи (продувка);

$C_{об}, C_{д}$  – концентрації розчинених у воді речовин, що не випадають в осад (наприклад, хлоридів) відповідно в оборотній (циркуляційній) воді та воді, що додається в систему, мг/л;

$Cl_{об}, Cl_{д}$  – концентрації іонів хлору відповідно в оборотній і підживлювальній воді;

$K_K$  - коефіцієнт концентрування (випаровування) показує у скільки разів концентрація розчинених речовин у циркуляційній воді більше ніж у підживлювальній воді.

Оскільки основним призначенням продувки є підтримання карбонатної жорсткості оборотної води нижче гранично допустимої, значення цієї продувки можна визначити з рівняння водно-сольового балансу.

$$K_K = \frac{C_{об}}{C_{д}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3};$$

$$Ж_{ГРАН}^K (P_2 + P_3) = Ж_{д}^K (P_1 + P_2 + P_3),$$

Звідки 
$$P_3 = \frac{Ж_{д}^K \cdot P_1}{Ж_{ГРАН}^K - Ж_{д}^K} - P_2, \quad (3.9)$$

або 
$$P_3 = \frac{C_{д} \cdot P_1}{C_{об} - C_{д}} - P_2, \quad (3.10)$$

де  $C_{д}$  – концентрація солей жорсткості в підживлювальній воді, мг-екв/л;

$C_{об}$  – максимально допустима концентрація солей жорсткості в циркуляційній (оборотній) воді, мг-екв/л;

Головна вимога до водно-хімічного режиму систем оборотного водопостачання полягає в тому, що в системі повинні бути відсутні карбонатні відкладення і корозія устаткування та трубопроводів.

У системах водяного охолодження теплонавантажених елементів утворюються переважно відкладення карбонату кальцію при втраті вільної вуглекислоти через нагрівання води. При цьому відбувається розкладення бікарбонатних іонів  $HCO_3^-$  з утворенням карбонатних  $CO_3^{2-}$ , які реагують з

іонами  $\text{Ca}^{2+}$  і створюють малорозчинні з'єднання  $\text{CaCO}_3$ , що осаджуються на стінках трубопроводів:



Якщо таке розкладання в системі відсутнє, то має місце співвідношення

$$L_{\text{ц}} = K_{\text{к}} \cdot L_{\text{д}} \quad (3.11)$$

де  $L_{\text{ц}}$ ,  $L_{\text{д}}$  – лужність відповідно циркуляційної і додаткової води, мг-екв/л.

При співвідношенні  $L_{\text{ц}} > K_{\text{у}} \cdot L_{\text{д}}$  в систему додаються або поступають лужні речовини. Співвідношення  $L_{\text{ц}} < K_{\text{у}} \cdot L_{\text{д}}$  свідчить про те, що в системі відбуваються розпад  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  і утворення відкладень в кількості

$$\Delta L = K_{\text{у}} \cdot L_{\text{д}} - L_{\text{ц}}. \quad (3.12)$$

Концентрацію добре розчинних солей в оборотній воді  $C_{\text{ц}}$  в залежності від вмісту цих солей у підживлювальній (свіжій) воді можна визначити за допомогою рівняння сольового балансу системи:

$$C_{\text{ц}} = K_{\text{к}} \cdot C_{\text{д}}, \quad (3.13)$$

Якщо система працює без продувки, то збільшення концентрації розчинених речовин в оборотній воді описуватиметься наступною залежністю

$$C_{\text{ц}} = C_{\text{н}} + \frac{q_{\text{д}} \cdot t}{V} C_{\text{д}}, \quad (3.14)$$

де  $C_{\text{н}}$  – початкова концентрація тих же речовин у воді, що заповнює систему (до включення охолоджувача в оборотний цикл);

$q_{\text{д}}$  – кількість води, що додається в систему для компенсації втрати води на випаровування,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$V$  – об'єм води в системі,  $\text{м}^3$ ;

$t$  – час роботи системи без продувки, год.

Якщо прийняти, що  $C_{\text{н}} = C_{\text{д}}$ , то формула (3.13) набуває простішого вигляду :

$$C_{\text{ц}} = \left( 1 + \frac{q_{\text{д}} \cdot t}{V} \right) C_{\text{д}}, \text{ мг/л}; \quad (3.15)$$

$$K_{\text{к}} = 1 + \frac{q_{\text{д}} \cdot t}{V} \quad \text{або} \quad K_{\text{к}} = 1 + \frac{P_1 \cdot Q_{\text{оо}}}{V} t, \quad (3.16)$$

де  $Q_{об}$  – кількість води, що знаходиться в обороті, м<sup>3</sup>/год;

$P_1$  – величина випаровування води в оборотній системі, % від витрати оборотної води.

### **Приклади розв'язання задач**

**Приклад 1.** Визначити розмір продувки системи оборотного охолодження, що стабілізує циркуляційну воду, і витрату підживлювальної води за таких умов її роботи: карбонатна жорсткість підживлювальної води 2,2 мг-екв/л, гранична карбонатна жорсткість 4 мг-екв/л; перепад температур  $\Delta t = 12$  °С, втрати води з краплинним винесенням вітром  $P_2 = 0,5$  %.

#### **Вирішення**

Втрати води на випаровування  $P_{вип}$  визначаємо за формулою (3.1) для осінньо-весняного періоду:

$$P_1 = 0,16 \cdot 0,75 \cdot 12 = 1,44 \text{ \%}.$$

Продувку системи знаходимо за формулою (3.9)

$$P_3 = \frac{1,44 \cdot 2,2}{4,0 - 2,2} - 0,5 = 1,26 \text{ \%},$$

Тоді загальна витрата підживлювальної води буде дорівнювати

$$P_d = P_1 + P_2 + P_3 = 1,44 + 0,5 + 1,26 = 3,2 \text{ \%};$$

для літнього періоду:

$$P_1 = 0,16 \cdot 1,0 \cdot 12 = 1,92 \text{ \%},$$

$$P_3 = \frac{1,92 \cdot 2,2}{4,0 - 2,2} - 0,5 = 1,85 \text{ \%},$$

$$P_d = 1,92 + 0,5 + 1,85 = 4,27 \text{ \%}.$$

**Приклад 2.** Яку кількість води необхідно виводити з оборотного циклу й скільки свіжої води слід у нього додавати, щоб підтримувати коефіцієнт випаровування на рівні 1,5? Витрата оборотної води складає  $50 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/год, втрата води на випаровування дорівнює 1,5 %.

### **Вирішення**

З формули для визначення коефіцієнту концентрування добре розчинних солей або коефіцієнту випаровування через водний баланс знайдемо добавку свіжої (підживлювальної) води  $P_D$ , що додається в оборотну систему:

$$K_{\text{вип}} = \frac{P_1 + P_3}{P_3} = \frac{P_D}{P_D - 1}, \text{ звідки } P_D = \frac{K_{\text{вип}}}{K_{\text{вип}} - 1} \cdot P_1 = \frac{1,5}{1,5 - 1} \cdot 1,5 = 4,5 \%$$

$$\text{Тоді } q_D = \frac{P_D \cdot Q_{\text{об}}}{100} = \frac{4,5 \cdot 50 \cdot 10^3}{100} = 2250 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Далі знаходимо кількість води, що необхідно виводити з оборотного циклу, тобто продувку системи ( $P_3$ ):

$$P_3 = 4,5 - 1,5 = 3 \%$$

$$\text{Тоді } q_3 = \frac{3 \cdot 50 \cdot 10^3}{100} = 1500 \text{ м}^3/\text{год.}$$

**Приклад 3.** Визначити параметри водно-хімічного режиму оборотного циклу, якщо лужність оборотної води дорівнює 4,2 мг-екв/л, лужність добавочної води 3,7 мг-екв/л, витрата оборотної води  $Q_{\text{об}} = 6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ , перепад температур нагрітої та охолодженої води складає  $\Delta t = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ , продувка  $P_3 = 3 \%$ .

### **Вирішення**

Перевіримо співвідношення (3.11), яке показує чи утворюються в системі карбонатні відкладення. Для нашого випадку  $K_k \cdot L_d = 1,35 \cdot 3,7 = 5$ , отже маємо  $L_{\text{ц}} < K_k \cdot L_d$ .

Таким чином в системі відбувається розпад  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  і утворення карбонатних відкладень в кількості  $\Delta L = 5 - 4,2 = 0,8 \text{ мг-екв/л}$ . Для запобігання утворенню карбонатних відкладень можна застосовувати два способи:

- а) відповідну обробку води, що додається;
- б) збільшити добавку свіжої води в систему.

В останньому випадку, якщо вказане значення  $L_{ц} = 4,2$  мг-екв/л є стабільним параметром, слід було б працювати з коефіцієнтом випаровування або концентрування добре розчинних солей  $K_k = \frac{4,2}{3,7} = 1,13$ .

Знайдемо добавку свіжої води в систему Рд:

$$P_d = \frac{K_{вип}}{K_{вип} - 1} \cdot P_1 = \frac{1,135}{0,136} \cdot 1 = 8,4 \%$$

тобто в систему треба було б додавати свіжої води в кількості:

$$Q_d = 0,084 \cdot 6 \cdot 10^3 = 500 \text{ м}^3/\text{год},$$

що може бути економічно не вигідним і недоцільним.

Тоді залишається перший спосіб – спеціальна обробка підживлювальної води.

### **Контрольна робота № 1**

**Задача 1.** Визначити основні параметри водно-хімічного режиму оборотного циклу (коефіцієнт випаровування і витрату свіжої води, що додається в систему). Перевірити чи будуть в системі утворюватися карбонатні відкладення. Знайти концентрацію добре розчинних солей в оборотній воді залежно від вмісту цих солей у підживлювальній воді.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для виконання контрольної роботи

Вихідні дані	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Лужність оборотної (циркуляційної) води $L_{ц}$ , мг-екв/л	4,2	4,5	3,9	4,1	4,6
Витрата оборотної води, $Q_{об}$ , м <sup>3</sup> /год	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$
Лужність підживлювальної води, $L_d$ , мг-екв/л	3,7	4,0	3,5	3,6	4,1
Перепад температур нагрітої та охолодженої води $\Delta t$ , °C	8	10	12	9	6
Втрати води з продувкою, $P_3$ , %	3,0	2,5	1,8	3,2	2,3
Концентрація добре розчинних солей у підживлювальній воді $C_{доб}$ , мг/л	550	570	610	450	490

## Задача 2

Об'єм води в басейні оборотного циклу електростанції дорівнює  $V$ , а кількість води в обороті  $Q_{об}$ . Через скільки годин роботи оборотного циклу з моменту його пуску початкова концентрація хлоридів в оборотній воді збільшиться у  $n$  разів ( $C_{ц} = n C_{нач}$ ) за умови якщо  $C_{нач} = C_{д}$ , і система працює без продувки?

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для виконання контрольної роботи за варіантами

Параметри	Номери варіантів				
	1	2	3	4	5
Об'єм води в басейні оборотного циклу, $V$ , $m^3$	$3,8 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$
Кількість води в обороті $Q_{об}$ , $m^3/год$	$2 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$
Втрати води на випаровування $P_1$ , %	0,02	0,025	0,02	0,008	0,02
Збільшення концентрації розчинених в оборотній воді речовин $n$	2,2	1,2	1,5	2,0	1,3

## 4 ОХОЛОДЖУВАЧІ ОБОРОТНОЇ ВОДИ

### 4.1 Вибір типу охолоджувача

Вибір типу охолоджувача здійснюється на підставі техніко-економічного порівняння варіантів. Тип охолоджувача приймається з урахування розрахункової витрати води, режиму роботи охолоджувача, умов розміщення на промисловому майданчику, розрахункової температури охолодженої води, перепаду температур води в системі, глибини охолодження, технологічних вимог до стабільного ефекту охолодження, особливостей експлуатації, хімічного складу води і її втрат на випаровування та винос вітром. При виборі охолоджувача крім того, слід враховувати вимоги природоохоронних органів до роботи охолоджувач, як можливих джерел негативного впливу на стан

навколишнього середовища (винос краплинної вологи, викид шкідливих речовин, шум).

Рекомендована область застосування (табл. 4.1) різних типів охолоджувачів води визначається їх якісними і кількісними характеристиками: гідравлічним навантаженням, тепловим навантаженням, шириною охолодження (перепадом температур) і глибиною охолодження (різницею температури охолодженої води і температури повітря за змоченим периметром), а також іншими факторами.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані області застосування охолоджувачів

Охолоджувач	Область застосування охолоджувача води		
	Питоме теплове навантаження, тис. ккал/м <sup>2</sup> /год	Перепад температур води, °С	Різниця температури охолодженої води та температури атмосферного повітря за змоченим термометром, °С
Вентиляторні градирні	80–100 і вище	3–20	4–5
Баштові градирні	60–100	5–15	8–10
Бризкальні басейни	5–20	5–10	10–12
Водосховища-охолоджувачі	0,2–0,4	5–10	6–8
Радіаторні (сухі) градирні	–	5–10	25–30
Відкриті та бризкальні	7–15	5–10	10–12
Примітка. Показники в таблиці надані для води, що надходить на охолоджувач з температурою менше 40 °С			

*Ставки-охолоджувачі* на протязі більшої частини року забезпечують мінімальну температуру води, але потребують великих площ для розміщення, тому застосування їх обґрунтовано при наявності вільних малоцінних земель, природних водоймищ або штучних водосховищ, при невисоких вимогах до ефекту охолодження води, а також у тих випадках, коли потребується забезпечити мінімальну середньорічну температуру охолодженої води.

*Бризкальні басейни.* Вони із-зі порівняно низької вартості і простоти в експлуатації широко застосовуються для охолодження води при невисоких вимогах до ефекту охолодження води, коли не потрібна низька постійна температура води та при наявності підходящих майданчиків для їх розміщення з відкритим доступом повітря. Вони володіють дуже низькою охолоджуючою здатністю особливо в районах зі слабкими вітрами і довготривалими штилями у літній період. Втрати води в них більше, ніж у градирнях.

*Відкриті градирні* застосовуються при витратах до 300 м<sup>3</sup>/год, вони близькі за параметрами до бризкальних басейнів, можуть розташовуватися на покрівлях будівель. Їх недолік – низький охолоджуючий ефект і його залежність від атмосферних факторів. Відкриті краплинні градирні володіють більш високим охолоджуючим ефектом і застосовуються при витратах до 1 000 м<sup>3</sup>/год при охолодженні води для компресорних і дизельних установок, не вимогливих до температури охолоджуючої води.

*Баштові градирні* застосовуються при будь-яких витратах. Вони мають невелике віднесення води вітром. Завдяки тязі повітря, що створюється баштою, забезпечують більш високий і стійкіший ефект охолодження ніж бризкальні басейни і відкриті градирні. Вони можуть бути компактно розташовані на майданчику підприємства на невеликих відстанях від виробничих будівель і споруд. Недоліком баштових градирень є складність будівництва і висока будівельна вартість.

*Вентилятори градирні.* Вони забезпечують найвищий найстійкіший ефект охолодження води. У літній час можуть давати температуру нижче, ніж в ставках-охолоджувачах. Температуру охолоджуючої води можна регулювати шляхом зміни частоти оборотів вентиляторів або відключенням окремих вентиляторів. Будівельна вартість їх значно нижче, а будівництво простіше, ніж баштових градирень, але робота вентиляторів вимагає великої витрати електричної енергії і складнішої експлуатації. Вентиляторні градирні застосовуються при будь-яких витратах, там, де технологічні процеси



підприємства вимагають низької і стабільної температури охолоджуючої води, а також в районах з жарким і вологим кліматом.

Охолодження води в градирнях відбувається в результаті її випаровування і тепловіддачі при контакті з атмосферним повітрям. Поверхнями, що охолоджують воду в градирнях, є зрошувальні пристрої плівкового або краплинного типу. Градирні з плівковим зрошувачем, в яких охолоджуюча поверхня води створюється на щитах зрошувача у вигляді плівки, застосовуються для охолодження незабруднених вод із змістом зважених речовин не більше 80 мг/л. При забрудненості охолоджуваної води 80–260 мг/л використовуються градирні з краплинним зрошувачем, в якому тепловіддача відбувається переважно з поверхні крапель води. При більшій забрудненості води слід застосовувати бризкальні градирні без зрошувача, в яких тепловіддача відбувається з поверхні бризг води, що створюються соплами.

*Вибір типу зрошувача* проводиться залежно від якості охолоджуваної води. За наявності в оборотній воді жирів, смол і нафтопродуктів застосовують градирні з краплинним зрошувачем. За наявності завислих речовин, які створюють відкладення, що не змиваються водою – бризкальні градирні [4]. Найкращим типом зрошувача є плівковий, оскільки він має найбільшу поверхню на одиницю об'єму градирні і низький аеродинамічний опір. Проте такі градирні більш матеріаломісткі. Так, витрата будівельних матеріалів для плівкового зрошувача в 2–3 рази вище, ніж для краплинного. Тому плівкові зрошувачі застосовують тільки у випадках недоліку території для розміщення градирень.

Орієнтовне гідравлічне навантаження – відношення витрати охолоджуваної води до площі градирні в плані,  $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$  приймається при зрошувачі:

- плівкового типа – 8–12
- краплинного типа – 6–10
- бризкальному – 5–6.

Для охолодження оборотної води газоочисток доменного цеху слід приймати вентилятори градирні з бризкальним зрошувачем. При цьому допускається наявність зважених речовин в кількості більше 120 мг/л, а також масел і нафтопродуктів.

З умов запобігання руйнуванню конструкційних матеріалів градирні температура води, яка до неї поступає не повинна перевищувати 60 °С.

З умов надійності, зручності і економічності експлуатації рекомендується від двох до дванадцяти секцій або градирень в одному оборотному циклі водопостачання. Якщо за технологічними розрахунками число секцій виходить за межі, слід вибрати інший типорозмір градирні.

У вентиляторах градирнях слід використовувати в основному низьконапірні водорозподільні системи.

Зрошувач бризкального типу являє собою щити, які направляють повітря і одночасно декілька збільшують поверхню прилягання води до повітря. Відстані між щитами 500 мм.

Вибір конструкції градирні і тип зрошувача залежить в основному від якості води, яка піддається охолодженню та її кількості [1–4].

## **4.2 Розрахунок охолоджувачів**

### **4.2.1 Розрахунок градирень**

*Відкриті градирні.* Розрахунок відкритих краплинних градирень виконують за графіками, побудованими за експериментальними даними для певних стандартних умов. Конкретні умови враховуються введенням поправочних коефіцієнтів.

Номограма для розрахунку відкритих краплинних градирень (дод. А, рис. А.1) складається з двох видів графіків:

1. Основного (рис. А.1, А), побудованого для градирні шириною 4 м, числом ярусів  $n = 10$ ; при температурі повітря за змоченим термометром  $\tau = 20^\circ\text{C}$ , швидкості вітру  $w = 1,5 \text{ м/с}$  і  $\frac{\tau}{T} > 0,9$ , де  $T$  - температура повітря за сухим термометром.

2. Допоміжних графіків для визначення поправочних коефіцієнтів  $\alpha_\tau$  і  $\alpha_w$  (рис. А.1, Б),  $\alpha_n$  (рис. А.1, В) і  $\frac{\tau}{T}$  (рис. А.1, Г), що відповідно враховують фактичну температуру  $\tau$ , фактичну швидкість вітру  $w$ , фактичне число ярусів  $n$  і фактичне відношення  $\frac{\tau}{T}$ .

Знаючи дійсне гідравлічне навантаження  $q_\Gamma$ , визначають приведені навантаження:

$$q_{np} = \frac{q_\Gamma}{\alpha_\tau \cdot \alpha_w \cdot \alpha_n}$$

За приведеним гідравлічним навантаженням  $q_{np}$ , л/м<sup>2</sup>·с (за номограмою) і перепадом  $\Delta t = t_1 - t_2$  за графіком (рис. А.1, А) визначають різницю температур  $\Delta t' = t_2 - \tau$ , де  $t_2$  - температура охолодженої в градирні води.

Розрахункову температуру охолодженої води  $t_2$  визначають з урахуванням поправки (рис. А.1, Г) за залежністю:

$$t_2 = \tau + \Delta t' + \delta,$$

де  $\delta$  - величина поправки °С.

Площа зрошувача градирні

$$F_{zp} = \frac{Q}{q_\Gamma},$$

де  $Q$  - витрата води, м<sup>3</sup>/год.

На рисунку А.1 (дод. А) пунктирними лініями показано хід визначення температури охолодженої води  $t_2$  у відкритій краплинній градирні висотою 11 м при гідравлічному навантаженні 3,7 м /м<sup>2</sup>·год,  $\Delta t = 14^\circ\text{C}$ ,  $T = 27,5^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 22^\circ\text{C}$ ,  $w = 1,3 \text{ м/с}$ .

Аналогічні номограми використовують для теплового розрахунку відкритих бризкальних градирень.

*Баштові градирні.* Розрахунок баштових градирень складається з аеродинамічного і теплового розрахунків.

У баштових градирнях тяга створюється за рахунок висоти башти. Охолоджуючий ефект залежить від конструкції зрошувача та швидкості руху повітря в зрошувачі.

У результаті аеродинамічного розрахунку визначають необхідну висоту башти, що забезпечить потрібну середню швидкість руху повітря у зрошувачі.

Розрахунки баштових градирень достатньо громіздкі і виконуються за спеціальними алгоритмами програм з використанням ЕОМ. Для спрощування теплового розрахунку баштових градирень використовують емпіричні графіки (дод. А, рис. А.2).

За графіком А при заданій щільності зрошення (гідравлічному навантаженні) і перепаду температур  $\Delta t$ , визначають температуру охолодженої води  $t_2$  при стандартних умовах: температурі повітря 25 °С, відносній вологості  $\varphi = 54\%$ . Поправку на інші значення температури і вологості визначають за графіком Б.

Тепловий розрахунок градирень проводять для середньодобових температур атмосферного повітря за літній період для забезпеченості від 1 до 10 %.

При реконструкції баштових градирень з заміною зрошувача, модернізацією водорозподільної системи, встановленням водоуловлювача до графіку охолодження води слід вводити корегуючі коефіцієнти, що може бути здійснено при натурних випробуваннях градирень після реконструкції. Однією з основних складових робіт, пов'язаних з реконструкцією градирень є заміна дерев'яних і азбестоцементних зрошувачів на пластмасові з виконанням відповідних технологічних розрахунків (з визначення коефіцієнтів опору зрошувача, коефіцієнтів масовіддачі, сили тяжіння, теплових розрахунків і т. п.) для визначення температури охолодженої води та швидкості повітря в баштовій градирні.

*Вентиляторні градирні.* Аеродинамічний розрахунок вентиляторних градирень полягає перш за все у визначенні аеродинамічного опору градирні в залежності від витрати повітря, що в неї подається. У вентиляторних градирнях тяга повітря створюється вентиляторами. Швидкість руху повітря у зрошувачі залежить від конструкції градирні, її гідродинамічного опору і продуктивності підбраного вентилятора. Середня швидкість руху повітря у зрошувачі вентиляторних градирень дорівнює 1,7-2,5 м/с.

Підбирають підходящий вентилятор і визначають параметри роботи, напір, продуктивність, коефіцієнт корисної дії.

Подальший розрахунок здійснюється з врахуванням прийнятої середньої швидкості руху повітря в зрошувачі.

Вихідні дані для розрахунку вентиляторних градирень:

1. Гідравлічне навантаження  $q_{\text{макс}}$ , м<sup>3</sup>/год – максимальна годинна витрата води, що надходить в градирні.

2. Температура води на вході  $t_1$  і на виході  $t_2$  з градирні, задається технологіями підприємства на підставі теплотехнічного розрахунку охолоджуваного устаткування.

Вода в градирне може бути охолоджена до температури нижчої, ніж температура атмосферного повітря по сухому термометру. Теоретичною межею охолодження води є температура по вологому термометру  $\tau$ . При наближенні температури  $t_2$  до теоретичної межі охолодження  $\tau$  необхідний розмір градирень збільшується. Тому, розрахункову температуру  $t_2$  приймають такою, щоб різниця  $t_2 - \tau$  була не менш ніж 4–5 °С.

Розрахунок градирень полягає у визначенні площі зрошувального пристрою і кількості градирень або їх секцій (якщо градирні секційні), які забезпечують охолодження заданої витрати води від температури на вході  $t_1$  до температури на виході з градирні  $t_2$  при заданих параметрах атмосферного повітря за сухим термометром  $\theta$ , вологості повітря  $\varphi$  и температури за вологим термометром  $\tau$ .

Параметри атмосферного повітря змінюються як протягом доби, так і в межах року. Розрахунок градирень проводиться на менш сприятливий літній період по середньодобових температурах повітря по сухому і вологому термометрах за багаторічними спостереженнями при забезпеченості 1–10 %. Залежно від категорії споживача. Значення параметрів атмосферного повітря (температур  $\theta$  і  $\tau$  і вологості  $\varphi$ ) для деяких міст наведено у таблиці Б.3 (дод. Б).

Розрахунок площі зрошування і кількості вентиляторів градирень виконується за допомогою графіків і таблиць, складених за дослідно-виробничими даними і теоретичних залежностей.

Площу зрошування вентиляторів градирень зі зрошувачем бризкального типу або краплинним зрошувачем визначають за формулою:

$$F_{op} = \frac{Q \cdot (t_1 - t_2) \sqrt{t_1 - t_2} \cdot 10^3}{K (V_e \cdot \rho)^{0,625} \cdot (t_1 - \tau)^{1,95}} \quad (4.1)$$

де  $Q$  – витрата охолоджуваної води, м<sup>3</sup>/год;

$t_1 - t_2$  – температура відповідно охолоджуваної і охолодженої води °С;

$K$  – коефіцієнт, який залежить від типу зрошувача, температури повітря по вологому термометру, ширини зони охолодження і напору води перед соплами. Визначається за таблицею Б.2 (дод. Б);

$V_e$  – швидкість руху повітря через зрошувач, м/с;

$\rho$  – щільність зовнішнього повітря залежно від його температури по сухому термометру і його відносній вологості, кг/м<sup>3</sup>

$\tau$  – температура повітря за вологим термометром °С, приймається за таблицею Б.3 (дод. Б).

Швидкість руху повітря в градирне складає близько 2 м/с. Наприклад, в градирнях площею 16 м<sup>2</sup> швидкість дорівнює 2,2,1 м/с; 64 м<sup>2</sup> – 2,17 м/с; 144 м<sup>2</sup> – 2,12 м/с; 192 м<sup>2</sup> – 1,9 м/с; 400 м<sup>2</sup> – 1,86 м/с; 380 м<sup>2</sup> – 1,97 м/с; 1 200 м<sup>2</sup> – 2,3 м/с.

Щільність повітря при вологості 40–00 % приблизно приймають залежно від температури повітря по сухому термометру: при  $\theta=20^\circ\text{C}$

$\rho = 1,17-1,18 \text{ кг/м}^3$ ;  $\theta = 22 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rho = 1,16-1,17 \text{ кг/м}^3$ ;  $\theta = 24 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rho = 1,15-1,16 \text{ кг/м}^3$ ;  $\theta = 26 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rho = 1,14-1,15 \text{ кг/м}^3$ ;  $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rho = 1,13-1,14 \text{ кг/м}^3$ .

Вказану формулу можна використовувати при ширині зони охолодження  $t_1 - t_2 = 3^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$ , висоті зони охолодження  $t_2 - \tau = 3^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}$ , температурі повітря по вологому термометру  $\tau = 15 - 22^\circ\text{C}$ , відносній вологості повітря  $\varphi = 30 - 70\%$ .

Існують типові проекти секційних градирень площею 24; 64; 144; 192; 400 м<sup>2</sup>. Бувають градирні дво-, три- і чотирисекційні.

#### 4.2.2 Розрахунок водосховищ-охолоджувачів

Розрахунок ставків-охолоджувачів складається з гідравлічного і теплового розрахунків.

Гідравлічний розрахунок полягає у визначенні плинності течії і розподілу температур за глибиною водосховища, обсягів транзитних коловоротних зон, ступеня їх участі в процесах теплообміну й визначенні коефіцієнта використання площі водосховища.

Тепловий розрахунок полягає у визначенні температури охолодженої води  $t_2$  при відомій площі і конфігурації ставка або у визначенні необхідної активної площі водосховища, що забезпечує отримання заданої температури  $t_2$  у місці водозабору.

Розрахунок здійснюють для найбільш несприятливої за метеорологічними умовами для охолодження води декади найбільш жаркого місяця.

Різниця між температурою охолодженої води в охолоджувачі  $t_2$  і температурою за вологим термометром  $\tau$  є висотою зони охолодження. Температура за вологим термометром при проектуванні приймається як теоретична межа охолодження води при заданому стані повітря, насиченого параметрами, і визначається психрометром.

Для полегшення практичних розрахунків використовують номограму, яка складена на підставі основних розрахунків і експериментальних даних. При

цьому слід розрахувати питому площу активної зони  $\omega_{num}$ , що приходить на одиницю витрати охолоджуючої води,  $\text{м}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{добу})$ . За номограмою визначається перегрів охолодженої у водосховищі циркуляційної води, що надходить до міста її забору, у порівнянні з природною температурою води  $(t_2 - t_{прир})$  в залежності від величини нагріву води на електростанції (перепаду температур  $\Delta t = t_1 - t_2$ ).

Номограма для теплового розрахунку водосховищ-охолоджувачів за методом Теплоэлектропроекта наведена у додатку Б (рис. Б.1).

**Приклад.** Визначити необхідну площу водосховища-охолоджувача, якщо витрата циркулюючої води  $G = 200\,000 \text{ м}^3/\text{добу}$ , температура гарячої води  $t_1 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ , вода повинна бути охолоджена до температури  $t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , розрахункова швидкість вітру  $w = 2 \text{ м/с}$ . Водосховище проектується у Свердловській області.

Значення природної температури  $t_{прир}$  у водоймище для Свердловської області у липні дорівнює  $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тоді температура перегріву  $\delta = t_2 - t_{прир} = 25 - 18,9 = 6,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Потім за графіком на рисунку В.1 (дод. В) знаходимо  $\Delta t = 11 \text{ }^\circ\text{C}$  і далі за схемою  $\delta \rightarrow \Delta t \rightarrow w_2 \rightarrow w_2 \rightarrow t_{прир}$  знаходимо  $f_{num} = 1,65 \text{ м}^2$ .

Площа водосховища при  $k = 0,75$

$$F_D = \frac{f_{num} \cdot G}{k} = \frac{1,65 \cdot 200\,000}{0,75 \cdot 10\,000} = 44 \text{ га.}$$

#### 4.2.3 Розрахунок бризкальних басейнів

Розрахунок бризкальних басейнів полягає у визначенні геометричних розмірів, що забезпечують потрібну температуру охолоджуючої води  $t_2$ . Оскільки теплові розрахунки складні, то вони здійснюються по спеціальних номограмах Н. Н. Терентьєва або Л. Д. Бермана.

На рисунку В.2 (дод. В) наведена номограма для теплового розрахунку, запропонована Л. Д. Берманом. Вона складається з двох діаграм основної А і



допоміжної  $B$  і дозволяє визначати температуру охолодженої води  $t_2$  залежно від величини напору у сопел  $H$  і температури повітря за змоченим термометром. За діаграмою наведеною при напорі перед соплами  $H = 5$  м і швидкості вітру  $2$  м/с визначається температура  $t_2'$  залежно від температури повітря за змоченим термометром і прийнятому значенню  $\Delta t$  – ширини зони охолодження. Потім по допоміжному графіку  $B$  визначається поправка  $t_2''$ , що враховує дійсний напір сопел, яка віднімається із температури  $t_2'$ .

Температура охолодженої води:

$$t_2 = t_2' - t_2''.$$

Недоліком цього засобу є неможливість оцінити вплив вітру при його швидкості більше  $2$  м/с і відсутність параметру залежності охолоджуючого ефекту від гідравлічного навантаження.

Розрахунок за експериментальними графіками Н. Н. Терентьєва дозволяє визначити температуру охолодженої води в залежності від величини напору у сопел  $H$ , щільності зрошення (гідравлічного навантаження), перепаду температур (ширини зони охолодження)  $\Delta t$  і метеорологічних умов (температури повітря, відносної вологості повітря і швидкості вітру).

## **5 ОБРОБКА ВОДИ В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

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

$$L_d \cdot K_K \geq 3, \tag{5.1}$$

де  $L_d$  – лужність підживлювальної води, мг-екв/л;

$K_K$  – коефіцієнт випаровування або концентрування добре розчинних солей в оборотній воді.

При невеликій лужності підживлювальної води безнакипна робота теплообмінної апаратури може бути забезпечена шляхом продувки

оборотного водопостачання. У цьому випадку величина продувки у відсотках від витрати оборотної вод дорівнюватиме:

$$P_3 = \frac{Ж_{\text{доо}} \cdot P_1}{Ж_{\text{об}} - Ж_{\text{доо}}} - P_2, \quad (5.2)$$

де  $Ж_{\text{доо}}$  – карбонатна жорсткість свіжої води, що додається мг-екв/л;

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

Для запобігання утворенню карбонатних відкладень у системах оборотного водопостачання приймають наступні методи обробки: обробка кислотою (підкислення), вуглекислотою, димовими газами (рекарбонізація), поліфосфатами натрію або триполіфосфатами натрію  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  (фосфатування), кислотно-фосфатна обробка та інші методи.

### **Метод підкислення**

При підкисленні відбувається руйнування іона  $\text{HCO}_3^-$ , за рахунок цього досягається зниження лужності підживлюючої води на деяке значення  $\Delta L_{\text{д}}$  і збільшення концентрації розчиненої вуглекислоти в циркуляційній воді. Обидва ці процеси сприяють стабілізації лужності води в оборотному циклі  $L'_{\text{ц}}$ .

Загальна лужність води, що додається:

$$L_{\text{д}} = L_{\text{зал}} + \Delta L_{\text{д}}. \quad (5.3)$$

Тоді  $K_{\text{вин}} \cdot L_{\text{зал}} = L'_{\text{ц}}$ , звідки  $L_{\text{зал}} = \frac{L'_{\text{об}}}{K_{\text{вин}}}$ .

$$\text{Отже } \Delta L_{\text{д}} = L_{\text{д}} - \frac{L'_{\text{об}}}{K_{\text{в}}}, \quad (5.4)$$

де  $L'_{\text{ц}}$  – гранична лужність оборотної (циркуляційної) води.

$$L'_{\text{об}} = \frac{A[(100 - P_{\text{д}})(\text{CO}_2)_{\text{ц}} + P_{\text{д}} \cdot ((\text{CO}_2)_{\text{д}} + 44L_{\text{д}})] + 100b}{100 + 44P_3A}, \quad (5.5)$$

де  $A, b$  – коефіцієнти, які приймають за таблицею 5.1.

$(\text{CO}_2)_{\text{ц}}$  і  $(\text{CO}_2)_{\text{д}}$  – концентрації  $\text{CO}_2$  відповідно в оборотній воді і воді, що додається (підживлювальній воді), мг/л.

Таблиця 5.1 – Коефіцієнти А і b

Температура оборотної води, К	А	b			
		Окисність води, що додається мг/л O <sub>2</sub>			
		5	10	20	30
303	0,26	3,2	3,8	4,3	4,6
313	0,17	2,5	3,0	3,4	3,8
323	0,10	2,1	2,6	3,0	3,2

При підкисленні води дозу кислоти з розрахунку на підживлювальну воду визначають за формулою:

$$D_k = e \left( L_{\text{од}} - \frac{L_{\text{об}}}{K_k} \right) \frac{100}{C_k}, \quad (5.6)$$

де  $C_k$  – вміст сірчаної або соляної кислоти, %;

$e_k$  – еквівалентна маса кислоти, для сірчаної кислоти  $e_k = 49$  мг/мг-екв, для соляної  $e_k = 36,5$  мг/мг-екв.

Лужність оборотної води, мг-екв/л: (5.7)

$$L_{\text{л}} = 0,1N \sqrt{4,84N^2 (P - P_1)^2 + (100 - P)(CO_2)_{\text{охол}} + P(CO_2)_{\text{об}} + 44PL_{\text{од}}} - 0,22N^2 (P - P_1),$$

де  $P = P_1 + P_2 + P_3$  – добавка води у систему;

$$N = \frac{\psi}{\sqrt{K_k (Ca^{2+})_л}}; \quad (5.8)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт, що визначається залежно від загального солевмісту оборотної води та температури охолодженої води (табл. 5.2);

$(CO_2)_{\text{охол}}$  – концентрація вуглекислоти в оборотній воді після охолоджувача, мг/л, що визначається залежно від лужності підживлювальної води і коефіцієнту концентрування води в системі (табл. 5.3).

Загальний солевміст оборотної води:

$$S_{\text{об}} = S_{\text{од}} K_k. \quad (5.9)$$

Сульфат кальцію не випадає в системі оборотного водопостачання, якщо добуток активних концентрацій іонів  $Ca^{2+}$  і  $SO_4^{2-}$  в оборотній воді не перевищує добуток розчинності сульфату кальцію:)

Таблиця 5.2 – Визначення коефіцієнта  $\psi$ 

Температура охлажденної води, $t_2$ °C	Солевміст охолодженої води, $S_{об}$ , мг/л														
	200	400	600	800	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000
5	8,29	8,96	9,49	9,93	10,32	11,11	12,10	12,65	13,29	13,74	14,28	14,70	15,13	15,47	15,89
10	8,09	8,75	9,26	9,69	10,07	10,84	11,81	12,34	12,97	13,41	13,93	14,35	14,76	15,10	15,50
15	7,82	8,47	8,96	9,38	9,75	10,49	11,42	11,94	12,55	12,97	13,48	13,89	14,29	14,61	15,00
20	7,53	8,14	8,62	9,02	9,37	10,09	10,99	11,49	12,07	12,48	12,98	13,35	13,74	14,05	14,43
25	7,18	7,76	8,22	8,60	8,94	9,62	10,48	10,96	11,51	11,90	12,37	12,74	13,10	13,40	13,76
30	6,83	7,39	7,82	8,18	8,50	9,15	9,97	10,42	10,95	11,32	11,77	12,12	12,47	12,75	13,09
35	6,38	6,90	7,31	7,64	7,95	8,55	9,31	9,74	10,23	10,58	10,99	11,32	11,65	11,91	12,23
40	5,91	6,39	6,76	7,08	7,92	8,62	9,02	9,47	9,79	10,18	10,18	10,48	10,78	11,03	11,32

$$f^2 \cdot C_{Ca} \cdot C_{SO_4}' \cdot K_y^2 \leq PP_{CaSO_4}, \quad (5.10)$$

де  $f$  – коефіцієнт активності двохвалентних іонів (табл. 5.4), що визначається залежно від іонної сили розчину оборотної води.

Іонна сила розчину оборотної води, г-іон/кг:

$$\mu = \frac{K_y}{2} [(C_{Cl}^- + C_{HCO_3^-} + C_{Na^+}) + 4(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}} + C_{SO_4}')] , \quad (5.11)$$

де  $C_{HCO_3^-}$ ,  $C_{Na^+}$ ,  $C_{Ca^{2+}}$ ,  $C_{Mg^{2+}}$  – концентрації іонів у підживлювальній воді, г-іон/кг.

$C_{Cl}^-$ ,  $C_{SO_4}'$  – концентрації хлоридних та сульфатних іонів в підкисленій підживлювальній воді, г-іон/кг.

При підкисленні сірчаною кислотою:

$$C_{SO_4}' = C_{SO_4 \text{ дод}} + \frac{D_k \cdot C_k}{98000 \cdot 100}, \quad C_{Cl} = C_{Cl \text{ доб}}. \quad (5.12)$$

При підкисленні соляною кислотою:

$$C_{SO_4}' = C_{SO_4 \text{ дод}}, \quad C_{Cl} = C_{Cl \text{ дод}} + \frac{D_k \cdot C_k}{36\,500 \cdot 100}. \quad (5.13)$$

Таблиця 5.3 – Концентрація  $(CO_2)_{\text{охол}}$  в оборотній воді, охолодженій в градирнях

Лужність підживлювальної води $L_{д.}$ , мг-екв/кг	Концентрація $(CO_2)_{\text{охол}}$ , мг/кг, при коефіцієнті випаровування				
	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

Добуток розчинності сульфату кальцію при температурі 25°C, приймають  $2,4 \cdot 10^{-5}$ .

Таблиця 5.4 – Коефіцієнт активності двохвалентних іонів

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

Витрату кислоти, необхідну для обробки води визначають за формулою:

$$q_k = \frac{Q \cdot D_k}{1000} \quad (5.14)$$

Тут Q – загальна кількість води, що додається в систему:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ м}^3/\text{год},$$

$D_k$  – доза кислоти, г/м<sup>3</sup>.

### Фосфатування

Як реагенти при фосфатуванні застосовують гексаметафосфат, тринатрійфосфат і суперфосфат. Граничне значення лужності 7 мг-екв/л.

Фосфатування успішно застосовують, якщо лужність додаткової води не перевищує 3,5–4 мг-екв/л. Інакше слід застосувати комбінований спосіб обробки – фосфатування разом з підкисленням.

Дозу технічного продукту (тринатрійфосфату або суперфосфату) для обробки добавочної води в системі можна розрахувати за формулою

$$D_\phi = \left(3 + 0,2 \frac{E}{q_{\text{доб}}}\right) \frac{100}{C}, \quad (5.15)$$

де E – об'єм води в системі (в резервуарах градирні, трубопроводах, лотках і газоочисних апаратах), м<sup>3</sup>;

$q_{\text{доб}}$  – кількість води, що додається у систему оборотного водопостачання, м<sup>3</sup>/год;

C – вміст P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> у технічному реагенті, %.

Витрату тринатрійфосфату, кг/год, визначають за формулою

$$G_\phi = \frac{D_\phi \cdot q_{\text{доб}}}{1000} \quad (5.16)$$

Необхідну ємкість баку для приготування робочого розчину фосфатів, м<sup>3</sup> визначають за формулою

$$V_p = \frac{0,1D \cdot q \cdot T}{1\,000 \cdot b}, \quad (5.17)$$

де  $b$  – міцність розчину, %;

$T$  – тривалість роботи приготовленим розчином, год.

Витрата фосфату, г/м<sup>3</sup>:

$$Q = \left( d_{\phi} + \frac{5W}{24q_d} \right) \frac{100}{C_{\phi}}, \quad (5.18)$$

де  $C_{\phi}$  – вміст  $P_2O_5$  в технічному продукті % (для гексаметафосфату 50–52 %, тринатрій фосфату 17–18 %, суперфосфату 16–18 %);

$D_{\phi}$  – доза  $P_2O_5$ , приймають в межах 1,5–2,5 мг/л  $P_2O_5$ .

### **Приклади розв'язання задач**

**Приклад 5.** Гранична лужність оборотної води дорівнює 4,5 мг-екв/л. Лужність підживлювальної води 4,2 мг-екв/л. Наскільки необхідно знизити підкисленням лужність води, що додається у систему, якщо втрати на випаровування та з продувкою відповідно складають 1,4 і 3 %.

#### **Вирішення**

Знаходимо добавку води у систему  $P_d$  та коефіцієнт випаровування

$$P_d = P_1 + P_3 = 3 + 1,4 = 4,4 \%$$

$$K_{\text{вип}} = \frac{P_d}{P_d - P_1} = \frac{4,4}{4,4 - 1,4} = 1,46.$$

За формулою (5.5) знаходимо значення  $\Delta L_d$ , на яке знизиться лужність підживлювальної води при її підкисленні:

$$\Delta L_d = 4,2 - \frac{4,5}{1,46} = 1,13 \text{ мг-екв/л.}$$

**Приклад 6.** Для охолодження конденсаторів турбін ТЕЦ передбачається оборотне водопостачання з градирнями. Температура води після конденсаторів турбін  $T_1$  в літньому режимі складає 13–17°C, в температура води після охолоджувача  $T_2 = 5$  °C. Річна кількість годин роботи ТЕЦ  $T = 3920$  год. На

технічне водопостачання ТЕЦ передбачається річкова вода після проходження трьох послідовно працюючих ставків-освітлювачів.

Таблиця 5.5 – Характеристика оборотної системи водопостачання

Режим роботи ТЕЦ	Витрата охолоджуючої води, м <sup>3</sup> /год.	Безповоротні втрати					
		випаровування		винос вітром		продувка	
		м <sup>3</sup> /ч	%	м <sup>3</sup> /ч	%	м <sup>3</sup> /год	%
Літній	112750	1750	1,55	565	0,5	115	0,1

Склад води:

Жорсткість  $J_{\text{заг}} = 7,3$  мг-екв/л;

Лужність  $L_{\text{доб}} = 6$  мг-екв/л;

$\text{Ca}^{2+}_{\text{доб}} = 5$  мг-екв/л =  $2,5 \cdot 10^{-3}$  г-іон/кг;

$\text{Mg}^{2+}_{\text{доб}} = 2,3$  мг-екв/л =  $1,155 \cdot 10^{-3}$  г-іон/кг;

$\text{Na}^{+}_{\text{доб}} = 6,59$  мг-екв/л =  $6,595 \cdot 10^{-3}$  г-іон/кг;

$\text{HCO}_3^{-}_{\text{доб}} = 6$  мг-екв/л =  $6 \cdot 10^{-3}$  г-іон/кг;

$\text{Cl}^{-}_{\text{доб}} = 3,95$  мг-екв/л =  $3,95 \cdot 10^{-3}$  г-іон/кг;

$\text{SO}_4^{2-}_{\text{доб}} = 3,9$  мг-екв/л =  $1,955 \cdot 10^{-3}$  г-іон/кг;

$\text{CO}_2^{-}_{\text{доб}} = 12,9$  мг/кг;

Солевміст  $S = 989$  мг/кг.

Визначити необхідність обробки охолоджуючої води з метою запобігання випадінню карбонатних відкладень, підтвердити прийнятий відсоток продувки при обробці води методом підкислення, визначити витрату сірчаної кислоти на обробку.

### **Вирішення**

1. *Визначення необхідності обробки охолоджуючої води з метою запобігання випадінню карбонатних відкладень.*

Обробку води слід передбачати за умови (5.1), якщо  $L_D \cdot K_{\text{вин}} > 3$

$$K_{\text{вин}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} = \frac{1,55 + 0,5 + 0,1}{0,5 + 0,1} = 3,6.$$

Отже маємо  $6 \cdot 3,6 = 21,6 > 3$ .

Це підтверджує необхідність обробки води, що додається.



Безповоротні втрати води в системі складають

$$P = 1,55 + 0,5 + 0,1 = 2,15 \%$$

За формулою (5.9) визначаємо солевміст оборотної води:

$$S_{об} = 989 \cdot 3,6 = 3\,600 \text{ мг/кг.}$$

За таблицею 5.2 знаходимо  $\psi = 10,68$ .

$$N = \frac{10,68}{\sqrt{3,6 \cdot 5}} = 2,5.$$

Концентрацію вуглекислоти в оборотній воді після охолоджувача визначаємо за таблицею 5.3  $CO_{2\text{охол}} = 5,3 \text{ мг/кг.}$

Далі за формулою (5.7) знаходимо лужність оборотної води:

$$L_{об} = 0,1 \cdot 1,33 \sqrt{4,84 \cdot 2,5^2 (2,15 - 1,55)^2 + (100 - 2,15) \cdot 5,3 + 2,15 \cdot 12,9 + 44 \cdot 2,15 \cdot 6 - 0,22 \cdot 2,5^2 (2,15 - 1,55)} = 4,2.$$

*2. Підтвердження прийнятого відсотка продувки при обробці води, методом підкислення.*

Прийнята обробка охолоджуючої води сірчаною кислотою. Це рішення перевіряється на невинпадіння в осад сульфату кальцію у разі продувки системи в літньому режимі при  $P_3 = 0,1 \%$ . Винпадіння сульфату кальцію може відбутися, якщо коефіцієнт випаровування  $K_{вип}$  досягне величини, при якій відбудеться неприпустиме збільшення концентрації сульфатів.

Перевіряємо співвідношення (5.10), тобто чи буде в системі винпадіння сульфату кальцію

$$0,48^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,952 \cdot 10^{-3} \cdot 3,6^2 = 1,46 \cdot 10^{-5} < 2,4 \cdot 10^{-5}.$$

Отже сульфат кальцію не винпадає в системі оборотного водопостачання.

За таблицею 5.3 знаходимо  $f = 0,48$ .

$$\mu = \frac{3,6}{2} \cdot 10^{-3} [(3,95 + 6 + 6,59) + (2,5 + 1,15 + 4,65)] = 0,045 \cdot \text{г-іон/кг.}$$

За формулою (5.13) одержуємо

$$C'_{Cl} = 3,95 \cdot 10^{-3} \text{ г-іон/кг}; C'_{SO_4} = 1,95 + \frac{257 \cdot 92}{98\,000 \cdot 100} = 1,952 \cdot 10^{-3} \text{ г-іон/кг.}$$

Доза сірчаної кислоти з розрахунку на підживлювальну воду:

$$D_k = 49 \cdot \left(6 - \frac{4,2}{3,6}\right) \cdot \frac{100}{92} = 257 \text{ г/м}^3.$$

Цим розрахунком прийнята продувка системи, яка дорівнює 0,1 % ( $Q_{\text{пр}} = 115 \text{ м}^3/\text{год}$ ), підтверджує застосування методу підкислення за відсутності випадання сульфату кальцію.

Якщо не передбачати продувку, то приблизні розрахунки покажуть, що співвідношення (5.10) не дотримуватиметься, тобто відбуватиметься випадання сульфату кальцію в системі. Це зумовило необхідність продувки системи в літньому режимі.

*3. Визначення витрати сірчаної кислоти, що потрібна для обробки охолоджуючої води.*

Годинна витрата кислоти (5.15):

$$q_k = \frac{Q_d \cdot D_k}{1\,000} = \frac{2\,430 \cdot 257}{1\,000} = 624,5 \text{ кг/год.}$$

Загальна кількість додаткової води в системі:

$$Q_d = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1\,750 + 565 + 115 = 2\,430 \text{ кг/год.}$$

Річна витрата кислоти:

$$Q_k = \frac{q_k \cdot T}{1\,000} = \frac{624,5 \cdot 3\,920}{1\,000} = 2\,448 \text{ т.}$$

**Приклад 7.** Виробничий об'єкт має оборотне водопостачання з витратою  $15 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ . Підживлювальна вода має лужність 4,2 мг-екв/л, концентрація  $\text{CO}_2$  у воді дорівнює 10 мг/л. Температура води складає 303 К. Розрахувати режим фосфатування циркуляційної води для літнього періоду при охолодженні оборотної води в градирнях, концентрація  $\text{CO}_2$  в циркуляційній воді після охолоджувача дорівнює 5 мг/л, температура 10 К.

**Вирішення:**

$$P_1 = 0,16 \cdot \Delta t = 1,6 \%,$$

$P_2 = 0,6$  – для баштових градирень.

Для економії приймаємо  $P_3 = 0,6 \%$ , тоді коефіцієнт випаровування  $K_{\text{вип}} = 2,3$ .

Граничне значення лужності  $L_{Ц} = 7$  мг-екв/л.

За таблицею 5.3 при концентрації  $(CO_2)_{охол} = 5$  мг/кг і  $K_{вип} = 2,3$  лужність підживлювальної води  $L_{д} = 3$  мг-екв/л, за вихідними даними вода, що додається має лужність  $L_{д} = 4,2$  мг-екв/л. Отже одного підкислення недостатньо.

Тому як варіант можна збільшити продувку до необхідного значення.

Для визначення продувки знаходимо значення  $K_{вип} = \frac{7,0}{4,2} = 1,67$ .

$K_K = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3}$  або у спрощеному вигляді  $K_K = 1 + \frac{P_1}{P_2 + P_3}$ , звідси продувка

$$P_3 = \frac{P_1 - (K_{вип} - 1) \cdot P_2}{K_{вип} - 1}; \quad (5.20)$$

$$P_3 = 1,8 \text{ \%}.$$

Таким чином продувка дорівнюватиме  $P_3 = 1,8 + 0,6 = 2,4 \text{ \%}$  або  $360 \text{ м}^3/\text{год}$ ;

Як другий варіант можна застосувати тільки підкислення або фосфатування разом з підкисленням.

Необхідно знизити лужність підживлювальної води на величину  $\Delta L = 4,2 - 3 = 1,2$  мг-екв/л. Тоді коефіцієнт випаровування циркуляційної води дорівнюватиме

$$K_{вип} = \frac{L_{гран}}{L_{д}} = \frac{7}{3} = 2,4.$$

Кількість продувки при обробці води фосфатами для попередження утворення щільних сольових відкладень за формулою (5.20):

$$P_3 = 0,64 \text{ \%}.$$

Отже продувка  $P_3 = 0,6 + 0,64 = 1,24 \text{ \%}$  або  $185 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Витрата 75% - сірчаної кислоти складе

$$1,2 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 2,86 \cdot 10^{-2} \cdot 4910^{-6} \cdot 720 = 18 \text{ т/міс}.$$

**Приклад 8.** Розрахувати установку для фосфатування підживлювальної води в кількості  $q_{доб} = 100 \text{ м}^3/\text{год}$ . Оборотну воду охолоджують на секційній вентиляторній градирні, об'єм води у системі  $W = 5000 \text{ м}^3$ .

### **Вирішення**

Для фосфатування підживлювальної води приймаємо тринатрійфосфат, який містить  $P_2O_5$  у кількості  $C = 18 \%$ .

Необхідну дозу тринатрійфосфату визначаємо за формулою (5.16):

$$D = (3 + 0,2 \frac{5\,000}{200}) \frac{100}{18} = 45 \text{ г/м}^3.$$

Витрату тринатрійфосфату розраховуємо за формулою (5.17):

$$G_{\phi} = \frac{45 \cdot 200}{1\,000} = 9 \text{ кг/год.}$$

Робочий розчин тринатрійфосфату готуємо 2 % міцністю. Тоді для роботи впродовж  $T = 4$  год ємкість робочого баку визначаємо за формулою (5.18)

$$V_p = 0,1 \cdot \frac{9 \cdot 4}{2} = 2 \text{ м}^3.$$

Приймаємо для розчинних бака круглої форми діаметром 1,45 м і висотою 1,35 м, об'ємом  $2,2 \text{ м}^3$ , днище конічне.

Ємкість розчинного баку тринатрійфосфату приймаємо

$$V_p' = 0,9V_p = 0,9 \cdot 2,2 = 1,98 \text{ м}^3.$$

### **Контрольна робота №2**

**Задача 1.** Оборотна система охолодження конденсаторів парових турбін електростанції підживлюється водою, якість якої наведено у таблиці 5.6. Система працює з коефіцієнтом випаровування  $K_{\text{вип}}$ . Для попередження випадіння солей жорсткості передбачається обробка води сірчаною кислотою. Підкисленням досягається зниження лужності підживлювальної води на деяке значення  $\Delta L$ . Визначити чи буде при цьому у системі випадати гіпс ( $CaSO_4$ )?

Таблиця 5.6 – Вихідні дані для виконання контрольної роботи за варіантами

Параметри	Варіант				
	1	2	3	4	5
Склад підживлювальної води:					
Ca <sup>2+</sup> , мг-екв/л	10,0	8,0	9,0	8,0	7,0
Mg <sup>2+</sup> , мг-екв/л	2,5	2,0	2,0	1,8	2,5
Na <sup>+</sup> ,	3,0	3,0	4,0	5,0	3,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг-екв/л	8,0	7,0	6,0	10,0	8,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг-екв/л	5,0	4,0	4,0	3,0	2,5
Cl <sup>-</sup> , мг-екв/л	7,0	7,0	8,0	6,0	5,0
CO <sub>2</sub> , мг/л	12,9	12,0	12,5	11,9	10,0
Солевміст, мг/кг	1 200	1 000	900	2 900	2 500
Кількість води в обороті Q <sub>об</sub> , м <sup>3</sup> /ГОД	100·10 <sup>3</sup>	90·10 <sup>3</sup>	80·10 <sup>3</sup>	70·10 <sup>3</sup>	50·10 <sup>3</sup>
Коефіцієнт випаровування	1,7	1,9	2,1	2,4	2,2
Температура оборотної води, °С	25	25	27	30	27
ΔI, мг-екв/л	3,0	2,7	4,2	2,5	3,4

## 6 ЗМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ

### 6.1 Вибір методу зм'якшення води та складу споруд

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

Методи обробки води й можливість використання її в системах оборотного водопостачання залежать, насамперед, від вимог, які пред'являються до якості води, використовуваної в цих системах

При проектуванні споруд для зм'якшення води повинні бути вирішені наступні завдання:

1. Вибір методу пом'якшення та складу споруд.
2. Розрахунок споруд з пом'якшення.
3. Розрахунок реагентного господарства.

Вибір методу зм'якшення залежить від якості вихідної води і вимог споживача, продуктивності споруд та інших місцевих умов.

Рекомендації щодо вибору методів зм'якшення наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Методи зм'якшення води

Технологія	Якість вихідної води	Якість фільтрату	
		Загальна жорсткість, мг-екв/л	Загальна лужність, мг-екв/л
1	2	3	4
<i>Реагентні методи</i>			
1 Вапнування	Необхідно прояснення води	на 0,4–0,8 мг-екв/л більше некарбонатної жорсткості вихідної води	0,8–1,2
2 Вапняно-содове пом'якшення	Необхідно прояснення води	0,5-1,0	0,8–1,2
<i>Катіонування</i>			
3 Одноступеневе Na-катіонування	Каламутність – до 5–8 мг/л, кольоровість – до 30°	0,05-0,1	не змінюється
4 Двохступеневе Na-катіонування	Каламутність – до 5–8 мг/л, кольоровість – до 30°	0,01	не змінюється

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4
5 Паралельне Н-катионування, видалення CO <sub>2</sub>	Каламутність – до 5–8 мг/л, кольоровість – до 30°, сумарний вміст хлоридів та сульфатів – до 4 мг-екв/л, натрію – 2 мг-екв/л.	0,1	0,4
6 Послідовне Н-Na-катионування	Каламутність – до 5–8 мг/л, кольоровість – до 30°	0,01	0,7
7 Н-катионування з «голодною» регенерацією, буферні катіонітові фільтри, видалення CO <sub>2</sub>	Каламутність – до 5–8 мг/л, кольоровість – до 30°	На 0,7–1,5 мг-екв/л більше некарбонатної жорсткості вихідної води	0,7–1,5

Для часткового усунення карбонатної жорсткості застосовують зм'якшення води вапнуванням. Одночасно з вапнуванням води здійснюють і її коагулювання з використанням у більшості випадків залізного купоросу FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O.

Доза вапна, в мг/л, визначають для двох розрахункових випадків в залежності від співвідношення концентрації у воді іонів Ca<sup>2+</sup> і карбонатної жорсткості (табл. 6.2)

Дозу коагулянту, мг/л, визначають за формулою:

$$D_k = 3\sqrt{C}, \quad (6.1)$$

де  $C$  – кількість завислих речовин, що утворюються при реагентному зм'якшенні води (в перерахунку на суху речовину), мг/л;

$$C = M_{вих} + 50\left(\frac{(CO_2)}{22} + 2J_k\right) + 29\frac{(Mg^{2+})}{12} + D_s\left(\frac{100 - m}{100}\right), \quad (6.2)$$

де  $M_{вих}$  – вміст завислих речовин у вихідній воді, мг/л;

$m$  – вміст CaO в технічному вапні, %;

Для зниження некарбонатної жорсткості поряд з карбонатною застосовують вапняно-содовий метод зм'якшення води. Дози вапна і соди, мг/л, у цьому випадку визначають за співвідношеннями наведеними в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Дози реагентів

Метод	Реагент	Доза, мг/л	Умови застосування
вапнування	вапно	$D_B = 28\left(\frac{CO_2}{22} + Ж_к + \frac{D_к}{e_к} + 0,3\right);$ $D_B = 28\left(\frac{CO_2}{22} + 2Ж_к - \frac{Ca^{2+}}{20} + \frac{D_к}{e_к} + 0,5\right)$	$\frac{Ca^{2+}}{20} > Ж_к;$ $\frac{Ca^{2+}}{20} < Ж_к$
вапняно-содовий	Вапно, сода	$D_B = 28\left(\frac{CO_2}{22} + Ж_к + \frac{Mg^{2+}}{12} + \frac{D_к}{e_к} + 0,5\right);$ $D_C = 53\left(Ж_{нк} + \frac{D_к}{e_к} + 1\right)$	

У таблиці прийняті наступні позначення:

$Ж_к, Ж_{нк}$  – карбонатна і некарбонатна жорсткість води, мг-екв/л;

$(CO_2), (Ca^{2+}), (Mg^{2+})$  – концентрації у воді вільної вуглекислоти, іонів кальцію і магнію, мг/л;

$D_к$  – доза коагулянту, мг/л;

$e_к$  – еквівалентна маса активної речовини коагулянту, г/г-екв (для  $FeCl_3$  – 54, для  $FeSO_4$  – 67);

Об'єм бака для приготування вапняного молока визначають за формулою:

$$W = \frac{q \cdot n \cdot D_B}{10\,000 \cdot b_B \cdot \gamma_B}, \quad (6.3)$$

де  $q$  – витрата води, м<sup>3</sup>/год;

$n$  – час, на який готується вапняне молоко;

$b_B$  – концентрація вапняного молока (не більше 5 %);

$\gamma_B$  – об'ємна вага вапняного молока (1 т/м<sup>3</sup>).



## 6.2 Розрахунок споруд для зм'якшення води реагентним методом

До складу установки для реагентного зм'якшення води входять: склади реагентів; пристрої і апарати для приготування й дозування розчинів реагентів; змішувачі; освітлювачі із завислим шаром осаду або вихрові реактори; фільтри; резервуари зм'якшеної води, насосна станція та інші допоміжні елементи, а також установки для стабілізаційної обробки води.

Кількість води, що підлягає пом'якшенню, % від загальної кількості води, визначають за формулою:

$$q_{ном} = 100(Ж_{заг}^{вих} - Ж_{заг}) / (Ж_{заг}^{вих} - Ж_{зм}), \quad (6.4)$$

де  $Ж_{заг}^{вих}$  – загальна жорсткість вихідної води, мг-екв/л;

$Ж_{заг}$  – загальна жорсткість води, що подається в мережу, мг-екв/л;

$Ж_{зм}$  – жорсткість зм'якшеної води, мг-екв/л.

Для видалення завислих речовин, що утворюються при реагентному пом'якшенні води застосовують освітлювачі із завислим осадом спеціальної конструкції з подальшим фільтруванням через одно- або двохшарове завантаження з піску чи подрібненого антрациту крупністю зерен 0,5–1,25 (коефіцієнт неоднорідності – 2–2,2). Висота шару завантаження 0,8–1 м, швидкість фільтрування – до 6 м/год.

За умови, якщо  $\frac{Ca^{2+}}{20} > Ж_{к}$ , вміст магнію у вихідній воді не більше 15 мг/л і перманганатна окисність не більше 10 мг  $O_2$ /л для зм'якшення води застосовують вихрові реактори. Для розрахунку вихрових реакторів приймають: швидкість входу в реактор 0,8–1 м/с, кут конуса 15–20°, швидкість висхідного руху води на рівні водовідвідних пристроїв 4–6 мм/с. В якості контактної маси для завантаження вихрових реакторів застосовують мелений вапняк, розмелену крупку карбонату кальцію, що утворилася у вихрових реакторах або мармурову крихту крупністю зерен 0,2–0,3 мм та кількості 10 кг на 1 м<sup>3</sup> об'єму реактора. У випадку обробки води у вихрових реакторах коагулянт не додають.

### *Порядок розрахунку установки реагентного зм'якшення води*

1. За вихідними даними й вимогами споживачів до зм'якшеної води обирають метод реагентного зм'якшення води.
2. Визначають дози вапна, соди, т/добу.
3. Визначають кількість реагентів (вапна, соди, хлорного заліза) за формулами:

$$G_B = \frac{Q \cdot D_e}{P_e \cdot 10^6};$$

$$G_c = \frac{Q \cdot D_c}{P_c \cdot 10^6};$$

$$G_{\text{коаг}} = \frac{Q \cdot D_k}{P_k \cdot 10^6},$$

де  $P_B$  – вміст CaO у товарному продукті (50–75 %);

$P_c$  – вміст  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  у товарному продукті (95 %);

$P_k$  – вміст  $\text{FeCl}_3$  у товарному продукті (98 %).

4. Здійснюють розрахунок складів реагентів і реагентного господарства.
5. Здійснюють розрахунок вихрового змішувача.
6. Виконують розрахунок прояснювача з завислим шаром осаду або вихрового реактора.
7. Розраховують швидкі фільтри.

### ***Приклад розрахунку***

Розрахувати станцію зм'якшення води при наступних вихідних даних: Продуктивність станції (корисна)  $Q = 4\,000 \text{ м}^3/\text{добу}$  або  $167 \text{ м}^3/\text{год}$ . Якість вихідної води: каламутність – 20 мг/л, кольоровість – 30 град., жорсткість загальна 11,5 мг-екв/л, карбонатна – 5,5 мг-екв/л, вміст іонів  $\text{Ca}^{2+}$  – 210 мг/л,  $\text{Mg}^{2+}$  – 12 мг/л, окисність 6 мг О/л, вміст вільної  $\text{CO}_2$  – 87 мг/л. За вимогами споживачів – каламутність – 1,5 мг/л, загальна жорсткість – 7 мг-екв/л.

### ***Вирішення***

Аналіз якості вихідної води та вимог споживача свідчить про необхідність очистки води від мутності, кольоровості та жорсткості. Необхідна жорсткість води, може бути отримана методом вапнування.

Склад споруд обираємо наступний:

- 1) реагентне господарство для приготування вапна;
- 2) вихровий реактор;
- 3) фільтри.

Можливість використання вихрового реактора обумовлена тим, що виконуються умови його застосування за ДБН В.2.5-74:2013 [3]:  $Ca^{2+}/20 = 210/20 = 10,5 > Ж_{карб} = 5,5$  мг-екв/л, концентрація магнію  $12 < 15$  мг/л, окисність –  $6 < 10$  мг О/л. Вихровий реактор дешевше ніж освітлювач із завислим шаром осаду, крім цього, тут не потребується введення коагулянтів, що значно спрощує реагентне господарство й експлуатацію споруд.

Оскільки продуктивність станції порівняно невелика, приймаємо для остаточного (кінцевого) прояснення води напірні фільтри [3].

Розрахунок споруд для зм'якшення води:

Дозу вапна визначаємо за співвідношеннями наведеними в таблиці 6.2.

Необхідну кількість вихрових реакторів визначають виходячи з продуктивності одного реактора в межах  $100 \text{ м}^3/\text{год}$ . У даному випадку приймаємо  $N = 2$ .

Далі за продуктивністю реактора й швидкостями визначаємо площі верхнього й нижнього перерізів реактора

$$f_n = \frac{Q}{N \cdot V_n} = \frac{0,046}{2 \cdot 1,0} = 0,023 \text{ м}^2;$$

$$f_g = \frac{Q}{N \cdot V_g} = \frac{0,046}{2 \cdot 0,005} = 4,6 \text{ м}^2,$$

де  $V_g$  та  $V_n$  – швидкості входу води у реактор й в верхній його частині, м/с.

Визначаємо діаметри реактора в нижній і верхній частинах

$$d_n = \sqrt{\frac{f_n}{0,785}} = \sqrt{\frac{0,023}{0,785}} = 0,171 \text{ м. Приймаємо діаметр } 200 \text{ м.}$$

$$d_g = \sqrt{\frac{f_g}{0,785}} = \sqrt{\frac{4,6}{0,785}} = 2,42 \text{ м. Приймаємо діаметр } 250 \text{ м}$$

Приймаємо величину кута конусності  $15\text{--}20^\circ$ , визначаємо висоту реактора:

$$h_p = \frac{d_e - d_n}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2,5 - 0,2}{2} \cdot \operatorname{ctg} 10^\circ = 6,52 \text{ м.}$$

Об'єм реактора:

$$W = \frac{1}{3} h (d_e^2 + d_n^2 + d_e \cdot d_n) = \frac{1}{3} 6,52 (2,5^2 + 0,2^2 + 2,5 + 0,2) = 11,6 \text{ м}^3.$$

Необхідний об'єм контактної маси визначаємо виходячи з норми 10 кг на 1 м<sup>3</sup>:

$$G_{\text{конт}} = W \cdot 10 = 11,6 \cdot 10 = 116 \text{ кг.}$$

Витрату контактної маси, що додається, визначають за формулою:

$$G = 0,045 \cdot (J_{\text{вих}} - J_{\text{кінц}}) \cdot Q;$$

$$G = 0,045 \cdot (11,5 - 7) \cdot 167 = 33,8 \text{ кг/год};$$

$$\frac{Ca^{2+}}{20} = \frac{210}{20} = 10,5.$$

Оскільки  $\frac{Ca^{2+}}{20} > J_k$  (5,5 мг-екв/л), дозу вапна визначаємо за формулою 1 (табл. 6.2):

$$D_e = 28 \left[ \frac{87}{22} + 5,5 + 0,3 \right] = 273$$

При використанні вихрових реакторів коагулянт в воду не вводять, тому у даному випадку доза коагулянту  $D_k = 0$ .

### 6.3 Катіонітне зм'якшення води. Розрахунок Na-катіонітових фільтрів

Вибір методу катіонування визначається в кожному конкретному випадку хімічним складом води, умовами роботи системи й техніко-економічним порівнянням варіантів. При зм'якшенні води методом іонного обміну можуть застосовуватися Na-катіонування, H- і H-Na-катіонування. Процес Na-катіонування може бути як одноступінчастим, так і двоступінчастим.

Розрахунок здійснюють у наступній послідовності: вибір схеми підготовки води, вибір марки катіоніта, визначення питомої витрати реагенту на регенерацію, робочої обмінної ємкості, швидкості фільтрування, необхідної площі фільтрування.

### 6.3.1 Одноступеневе Na-катіонування

Дану схему застосовують для неглибокого зм'якшення води. Залишкова жорсткість фільтрату дорівнює 0,05–0,1 мг-екв/л. Швидкість фільтрування приймають залежно від жорсткості вихідної води. Висота шару катіоніту  $H = 2\text{--}2,5$  м, втрати напору складають 4–7 м.

Вихідні дані для розрахунку установок одноступеневого Na-катіонування:

- корисна продуктивність установки  $q_{\text{кор}}$ , м<sup>3</sup>/год;
- жорсткість вихідної води  $J_{\text{вих}}$ , мг-екв/л;
- лужність вихідної води  $L_{\text{вих}} = J_{\text{карб. вих}}$ , мг-екв/л;
- допустима жорсткість зм'якшеної води  $J_{\text{зм}}$ , мг-екв/л.

При визначенні загального об'єму фільтруючого матеріалу приймають:

- марку катіоніту – сульфовугілля КУ-2;
- число регенерацій за добу  $n_p = 1\text{--}3$ ;
- питома витрата солі на регенерацію  $q_c = 150\text{--}200$  г/г-екв.

*Робоча обмінна ємкість катіоніту*, г-екв/м<sup>3</sup>:

$$E_{\text{роб}}^{\text{Na}} = \alpha_{\text{Na}} \cdot \beta_{\text{Na}} \cdot E_{\text{повн}} - 0,5 \cdot q_{\text{пит}} \cdot J_{\text{заг.}}, \quad (6.5)$$

де  $J_{\text{заг.}}$  – загальна жорсткість вихідної води, г-екв/м<sup>3</sup>;

$\alpha_{\text{Na}}$  – коефіцієнт ефективності регенерації, що враховує неповноту регенерації катіоні і приймається залежно від питомої витрати солі (табл. 6.3);

$\beta_{\text{Na}}$  – коефіцієнт, що враховує зниження обмінної ємкості катіоніту за  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  внаслідок часткового затримування катіонів  $\text{Na}^+$  і залежить від концентрації натрію у вихідній воді  $C_{\text{Na}} = (\text{Na}^+)/23$  г-екв/м<sup>3</sup> (табл. 6.4);

$E_{\text{повн}}$  – повна обмінна ємкість катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>, визначається за паспортними даними, а за їх відсутності приймають для сульфовугілля крупністю 0,5–1,1 мм – 500–550 г-екв/м<sup>3</sup>, для катіоніта КУ-2 крупністю 0,8–1,2 мм – 1 500–1 700 г-екв/м<sup>3</sup>;

$q_{\text{пит}} -$  питома витрата води на відмивання катіоніту,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  катіоніту, приймають для сульфовугілля – 4 і для КУ-2 – 6

$J_{\text{заг}}$  – загальна жорсткість вихідної води, г-екв/м<sup>3</sup>;

Таблиця 6.3 – коефіцієнт  $\alpha_{\text{Na}}$

Питома витрата солі на регенерацію катіоніту, г/г-екв	100	150	200	250	300
Коефіцієнт $\alpha_{\text{Na}}$	0,62	0,74	0,81	0,86	0,9

Таблиця 6.4 – коефіцієнт  $\beta_{\text{Na}}$

$C_{\text{Na}}/J_0^{\text{вих}}$	0,01	0,05	0,1	0,5	1	5	10
Коефіцієнт $\beta_{\text{Na}}$	0,93	0,88	0,83	0,7	0,65	0,54	0,5

Об'єм катіоніту фільтрів I ступеня визначають за формулою:

$$W_{\text{к}} = \frac{24 \cdot Q_{\text{кат.ф.І}} \cdot J_0^{\text{вих}}}{n_p \cdot E_{\text{роб}}^{\text{кат}}}, \text{М}^3, \quad (6.6)$$

де  $Q_{\text{кат.ф.І}}$  – витрата води, що надходить на натрій-катіонування,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$J_0^{\text{вих}}$  – загальна жорсткість вихідної води, г-екв/м<sup>3</sup>;

$E_{\text{роб}}^{\text{кат}}$  – робоча обмінна ємкість катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>;

$n_p$  – число регенерацій кожного фільтра за добу, приймають від 1 до 3.

Загальна площа фільтрів I ступеня:

$$F_{\text{кат.ф.І}} = \frac{W_{\text{к}}}{H_{\text{к}}}, \text{М}^2, \quad (6.7)$$

де  $H_{\text{к}}$  – висота шару катіоніту, приймають 2–2,5м (більшу висоту завантаження приймають при жорсткості більше за 10 г-екв/м<sup>3</sup>).

**Приклад.** Продуктивність установки  $Q_{\text{доб}} = 4\,450 \text{ м}^3/\text{добу}$ . Вміст завислих речовин у зм'якшеній воді не більше 5–8 мг/л, кольоровість не більше за 30 °С. Загальна жорсткість вихідної води  $J_{\text{заг}} = 6 \text{ мг-екв/л}$ , карбонатна жорсткість 1,9 мг-екв/л, допустима жорсткість зм'якшеної води 0,2 мг-екв/л. Вміст іонів  $\text{Na}^+$  у вихідній воді становить 15 мг/л.

## Вирішення

Приймаємо установку одноступеневого натрій-катіонування. Розрахунок ведеться на корисну продуктивність, оскільки для власних потреб використовується прояснена, але не зм'якшена вода.

Повну обмінну ємкість катіоніту приймаємо для сульфовугілля крупністю 0,5–1,1 мм 550 г-екв/м<sup>3</sup>. Робочу обмінну ємкість катіоніту визначаємо за формулою 6.5.

Для розрахунку робочої обмінної ємкості катіоніту спочатку визначаємо коефіцієнти  $\alpha_{Na}$  і  $\beta_{Na}$ , що входять до формули (6.5):

При питомій витраті солі 200 г/г-екв (рекомендується 150–200 г/г-екв при одноступеневій схемі) коефіцієнт  $\alpha_{Na} = 0,81$ .

Оскільки у вихідній воді вміщується 15 мг/л Na<sup>+</sup>, то в перерахунку на мг-екв/л величина концентрації Na<sup>+</sup> дорівнюватиме:

$$C_{Na} = \frac{Na}{23} = \frac{15}{23} = 0,65 \text{ мг-екв/л.}$$

При співвідношенні  $\frac{C_{Na}}{Ж_{\text{заг}}^{\text{вих}}} = \frac{0,65}{6} = 0,108$  коефіцієнт  $\beta_{Na} = 0,83$ .

Тоді  $E_{\text{роб}}^{Na} = 0,81 \cdot 0,83 \cdot 550 - 0,5 \cdot 4 \cdot 6 = 358$  г-екв/м<sup>3</sup>.

Необхідний об'єм сульфовугілля за формулою (6.6):

$$W = \frac{4 \cdot 450 \cdot 6}{2 \cdot 358} = 36 \text{ м}^3.$$

Висоту катіонітового завантаження приймаємо 2,5 м.

Допустима розрахункова швидкість фільтрування через Na-катіонітовий фільтр – в межах 10–25 м/год залежно від загальної жорсткості води.

### 6.3.2 Двохступеневе Na-катіонування

Na-катіонітовий метод зм'якшення води за двохступеневою схемою застосовують для глибокого зм'якшення води, коли необхідно знизити жорсткість води до 0,01 мг-екв/л. Застосування такої схеми доцільно при

жорсткості вихідної води більше за 10 мг-екв/л. При розрахунку фільтрів II ступеня жорсткість вихідної води приймають 0,1 мг-екв/л.

При двохступеневому Na-катіонуванні вода, що зм'якшується проходить послідовно через Na-катіонітові фільтри I, а потім II ступеня. На фільтрах I ступеня жорсткість вихідної води знижується на 70–90 %. Ці фільтри регенерують при зниженій витраті солі (125–150 г/г-екв поглинених катіонів), а фільтри II ступеня – підвищеній (300–400 /г-екв поглинених катіонів), що дозволяє отримати глибоко зм'якшений фільтрат.

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

При розрахунку Na-катіонітових фільтрів II ступеня:

1. Загальна жорсткість вихідної води дорівнює жорсткості води після I ступеня.
2. Висоту шару катіоніту приймають 1–1,5 м.
3. Швидкість фільтрування – до 40 м/год.
4. Втрати напору – 13–14 м.
5. Питому витрату повареної солі на регенерацію фільтрів I ступеня приймають 120–50 г/г-екв поглинених катіонітів, для регенерації фільтрів II ступеня – 300-400 г/г-екв.
6. Концентрація регенераційного розчину – 8–12%.
7. Робоча ємкість поглинання катіоніту – 250–300 г-екв/м<sup>3</sup>

Необхідні для розрахунку технологічні параметри фільтрів наведено у таблиці 6.5.

Фільтри II ступеня відмивають (після регенерації) зм'якшеною водою, що отримують після фільтрів I ступеня. Тому для фільтрів II ступеня величина робочої обмінної здатності Na-катіоніту буде більш високою.



Таблиця 6.5 – Технологічні дані для розрахунку *Na*-катіонітових фільтрів

Показники	Фільтр I ступеня	Фільтр II ступеня
Висота шару катіоніта, м.....	2–2,5	1,5
Крупність зерен катіоніта, мм.....	0,5–1,1	0,5–1,1
Швидкість фільтрування, м/год, нормальна (форсована), при жорсткості, мг-екв/л:		
до 5.....	25 (35)	
до 10.....	15 (25)	40 (50)
до 15.....	10 (20)	–
Втрати напору на фільтрах, м (у дужках - при завантаженні дрібного катіоніту з крупністю зерен 0,3-0,8 мм), при швидкості фільтрування, м/год:		–
10.....	5 (6)	–
20.....	5 (7)	–
30.....	6 (9)	–
40.....	7 (11)	13
60.....	9 (14)	14
Розпушуюче промивання, катіоніту:		
інтенсивність <sup>2</sup> , л/(м <sup>2</sup> ·с) .....	4 (3)	4 (3)
тривалість <sup>3</sup> , хв.....	30 (15)	30 (15)
Питома витрата повареної солі на регенерацію сульфовугілля, г/г-екв, при двоступінчастому <i>Na</i> -катіонуванні й жорсткості оброблюваної води, мг-екв/л:		
до 5.....	100–200	300–400
до 10.....	120–200	–
до 15.....	170–250	–
до 20.....	200–300	–
Концентрація регенераційного розчину, %.....	2	3
Швидкість пропуску регенераційного розчину, м/год.....	5–8	8–12
Робоча обмінна ємкість сульфовугілля, г-екв/м <sup>3</sup> .....	3–4	3–5
Відмивання катіоніту від продуктів регенерації:	По	250–300
швидкість пропуску відмивної води через катіоніт, м/год..	розрахунка	
питома витрата відмивної води, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> , при завантаженні фільтра:	х	
сульфовугіллям.....	6–8	6–8
катіонітом КУ-2.....	4	6
Загальна тривалість регенерації фільтра, год, при завантаженні фільтра:	6	8
сульфовугіллям.....		2,5–3,5
катіонітом КУ-2.....	2	3,5–5,0
	3–4,5	

### 6.3.3 H-Na-катіонування

Застосовують для одночасного зм'якшення та зниження лужності води.

Можливі два варіанта схем:

- паралельне H-Na-катіонування;
- послідовне H-Na-катіонування.

Співвідношення витрат води, що подається на H-катіонітові та Na-катіонітові фільтри *при зм'якшенні води паралельним H-Na-катіонуванням* визначають за формулами:

- витрата води, що подається на H-катіонітові фільтри, м<sup>3</sup>/год:

$$q_{кор}^H = q_{кор} \frac{L_{вих} - L_{зм}}{A + L_{вих}}, \quad (6.8)$$

- витрата води, що подається Na-катіонітові фільтри, м<sup>3</sup>/год

$$q_{кор}^{Na} = q_{кор} - q_{кор}^H, \quad (6.9)$$

де  $q_{кор}$  – корисна продуктивність H-Na-катіонітової установки (загальна), м<sup>3</sup>/год;

$q_{кор}^H$  та  $q_{кор}^{Na}$  – корисна продуктивність відповідно H-катіонітових і Na-катіонітових фільтрів, м<sup>3</sup>/год;

$L_{вих}$  – лужність вихідної води, г-екв/м<sup>3</sup>;

$L_{зм}$  – необхідна лужність зм'якшеної води, г-екв/м<sup>3</sup>;

A – сумарний вміст у зм'якшеній воді аніонів сильних кислот (сульфатів, хлоридів тощо), г-екв/м<sup>3</sup>.

Вміст іонів в еквівалентну форму переводять за формулами:

$$C_{SO_4} = \frac{SO_4^{2+}}{48,03}, \quad C_{Cl} = \frac{Cl^-}{35,46}.$$

Об'єм катіоніту H-катіонітових фільтрів визначають за формулою:

$$W_H = \frac{24 \cdot q_H \cdot (Ж_{заг} + C_{Na})}{n_p \cdot E_{роб}^H}, \quad M^3. \quad (6.10)$$

Об'єм катіоніту Na-катіонітових фільтрів:

$$W_{Na} = \frac{24 \cdot q_{Na} \cdot Ж_{заг}}{n_p \cdot E_{роб}^{Na}}, \quad M^3, \quad (6.11)$$

де  $n$  – число регенерацій кожного фільтра за добу, приймають 1–3;

$E_{роб}^H$  – робоча обмінна ємкість Н-катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>;

$E_{роб}^{Na}$  – робоча обмінна ємкість Na-катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>;

$C_{Na}$  – концентрація у воді натрію.

Робоча обмінна ємкість Н-катіонітових фільтрів, г-екв/м<sup>3</sup>:

$$E_{роб}^H = \alpha_H \cdot E_{повн} - 0,5 \cdot q_{нит} \cdot C_k, \quad (6.12)$$

де  $\alpha_H$  – коефіцієнт ефективності регенерації Н-катіонітових фільтрів, приймають залежно від питомої витрати сірчаної кислоти (табл. 6.6);

$E_{повн}^{кат}$  – повна обмінна ємкість катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>, визначається за рекомендаціями п. 6.3.1;

$q_{нит}$  – питома витрата води на відмивання катіоніту, приймають 4-5 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> катіоніту;

$C_k$  – загальний вміст у воді катіонів кальцію, магнію, натрію, калію, г-екв/л.

Таблиця 6.6 – Коефіцієнт  $\alpha_H$

Питома витрата сірчаної кислоти, г/г-екв	50	100	150	200
Коефіцієнт $\alpha_H$	0,68	0,85	0,91	0,92

Робоча обмінна ємкість Na-катіонітових фільтрів, г-екв/м<sup>3</sup>, розраховується за формулою 6.5.

Площу фільтрів визначають за формулами:

$$F_H = \frac{W_H}{H_H}, \quad F_{Na} = \frac{W_{Na}}{H_{Na}}, \quad \text{м}^2, \quad (6.13)$$

де  $H_{Na}$ ,  $H_H$  – висота шару катіоніту, м.

## 7 ВИДАЛЕННЯ З ВОДИ ВІЛЬНОЇ ВУГЛЕКИСЛОТИ. РОЗРАХУНОК ПЛІВКОВОГО ДЕГАЗАТОРА

При *H-Na*-катіонітовому зм'якшенні, іонітовому знесоленні води виникає необхідність видалення вільної вуглекислоти з метою найбільш повного і ефективного протікання процесу очистки. Крім того, вуглекислота відноситься до числа корозійно-активних газів по відношенню до бетону і металу та оказує безпосередній вплив на показник стабільності води.

Для видалення з води вуглекислого газу застосовують дегазатори (плівкові, з примусовою або природною вентиляцією, барботажні, пінні й вакуумні).

Найбільшого поширення отримали плівкові дегазатори з насадкою з кілець Рашига і хордовою дерев'яною насадкою (при  $Q < 150 \text{ м}^3/\text{год}$  і  $\text{CO}_2 < 150 \text{ мг/л}$ ).

Дегазатор являє собою колону, заповнену насадкою (дерев'яною, керамічними кільцями Рашига) для подрібнення потоку води, що подається зверху на плівки, які стікають, що збільшує поверхню контакту води і повітря. Повітря, що нагнічується вентилятором, рухається в насадці назустріч потоку води і потім разом з  $\text{CO}_2$ , який виділився виводиться через верхній патрубок. Витрату повітря приймають  $20 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  води.

Розрахунок дегазатора полягає у визначенні геометричних розмірів поверхні насадки і необхідного напору, що розвиває вентилятор. Необхідні для розрахунку дані наведено в таблиці 7.1.

Площу поперечного перерізу дегазатора визначають за щільністю зрошення насадки, тобто за витратою води, що приходить на одиницю площі поперечного перерізу.

Для насадки з кілець Рашига щільність зрошення приймають  $60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \times \text{год})$ , звідки

$$f_d = \frac{Q_d}{60}, \quad (7.1)$$

де  $Q_d$  – продуктивність дегазатора,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Таблиця 7.1 – Технологічні параметри для розрахунку плівкового дегазатора

Показники	Кислотоупорна керамічна насадка	Дерев'яна хордова насадка
Розмір насадки	Кільця Рашига 25 × 25 × 3	Бруски
Висота шару насадки, м, залежно від вмісту вуглекислоти, що подається в дегазатор (CO <sub>2</sub> ) <sub>св.</sub> , г/м <sup>3</sup>		
50	3,0	4,0
100	4,0	5,2
150	4,7	6,0
200	5,1	6,5
250	5,5	6,8
300	5,7	7,0
Щільність зрошення, м <sup>3</sup> /год, на 1 м <sup>2</sup> площі дегазатора	60	40
Подача повітря вентилятором, м <sup>3</sup> на 1 м <sup>3</sup> води	15	15
Втрати напору, мм вод. ст., на 1 м висоти шару насадки	30	10

Діаметр дегазатора, визначають за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} \quad (7.2)$$

Потрібну площу поверхні насадки, м<sup>2</sup>, при якій забезпечується заданий ефект видалення вільної вуглекислоти визначають з рівняння

$$F_n = \frac{G}{k_m \cdot \Delta C_{сер}} \quad (7.3)$$

Вміст вільної вуглекислоти (CO<sub>2</sub>)<sub>вільн.</sub>, г/м<sup>3</sup>, у воді, що подається в дегазатор, визначають за формулою:

$$(CO_2)_{вільн.} = (CO_2)_{вих.} + 44 \cdot L_{вих.} \quad (7.4)$$

де (CO<sub>2</sub>)<sub>вих.</sub> – вміст вільної вуглекислоти у вихідній воді, г/м<sup>3</sup>;

L<sub>вих.</sub> – лужність вихідної води, мг-екв/л (г-екв/м<sup>3</sup>).

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств : навч. посібник / Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 280 с.
2. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. под ред. В. Н. Самохина. – Изд 2-е. – М. : Стройиздат, 1981. – 639 с.
3. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування : ДБН В.2.5-74:2013. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 172 с.
4. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. – М. : Стройиздат, 1977. – 590 с.
5. Кучеренко Д. И. Обратное водоснабжение (системы водяного охлаждения) / Д. И Кучеренко, В. А. Гладков. – М. : Стройиздат, 1980. – 168 с.
6. Вахлер Б. Л. Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях : Справочник / Б. Л. Вахлер. – М. : Металлургия, 1977. – 320 с.
7. Защита водоемов от загрязнения сточными водами предприятий черной металлургии / Г. М. Левин, Г. С. Пантелют, И. А. Ванштейн, Ю. М. Супрун. – М. : Металлургия, 1978. – 216 с.
8. Особенности промышленного водоснабжения / С. М. Андоньев, В. М. Жильцов, Г. М. Левин и др. / Под ред. С. М. Андоньева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Київ : Будівельник, 1981. – 246 с.
9. Аксенов В. И. Водное хозяйство промышленных предприятий : справ. пособие / В. И. Аксенов. – М. : Теплотехник, 2005. – 640 с.
10. Иванов В. Г. Водоснабжение промышленных предприятий : учеб. пособие / В. Г. Иванов. – СПб : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 537 с.

# ДОДАТОК А

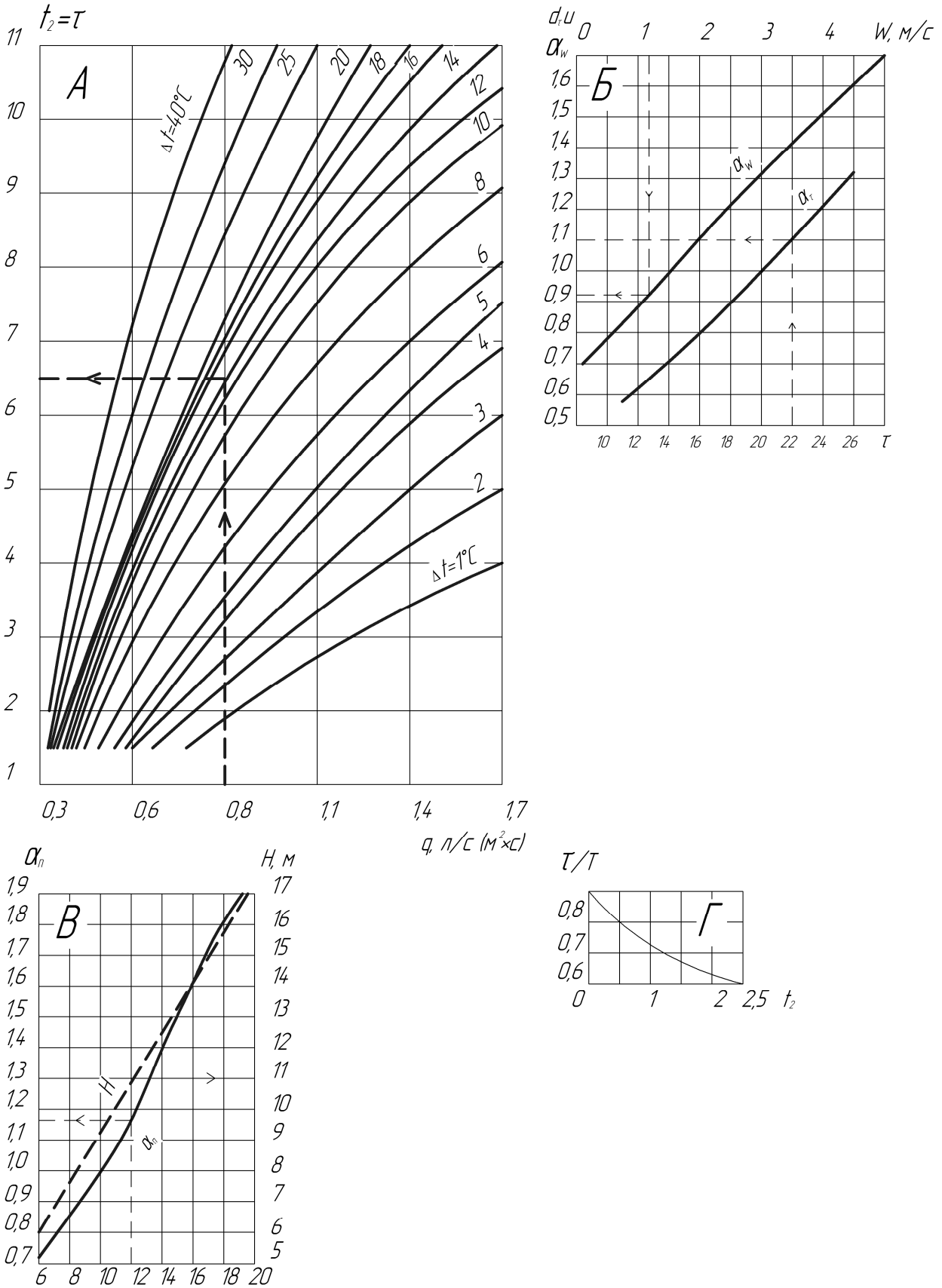


Рисунок А.1 – Номограма для розрахунку відкритих краплинних градієнь

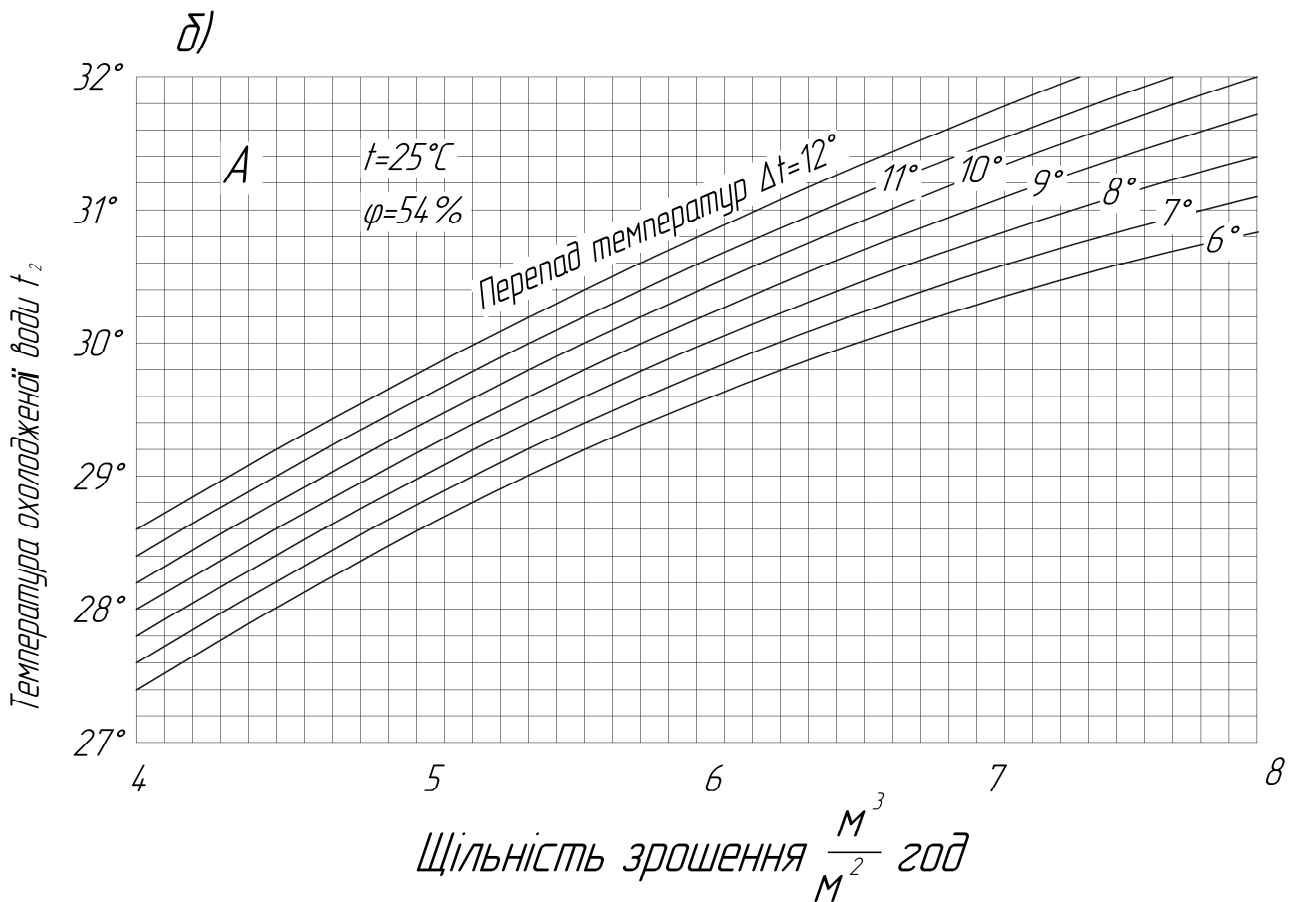
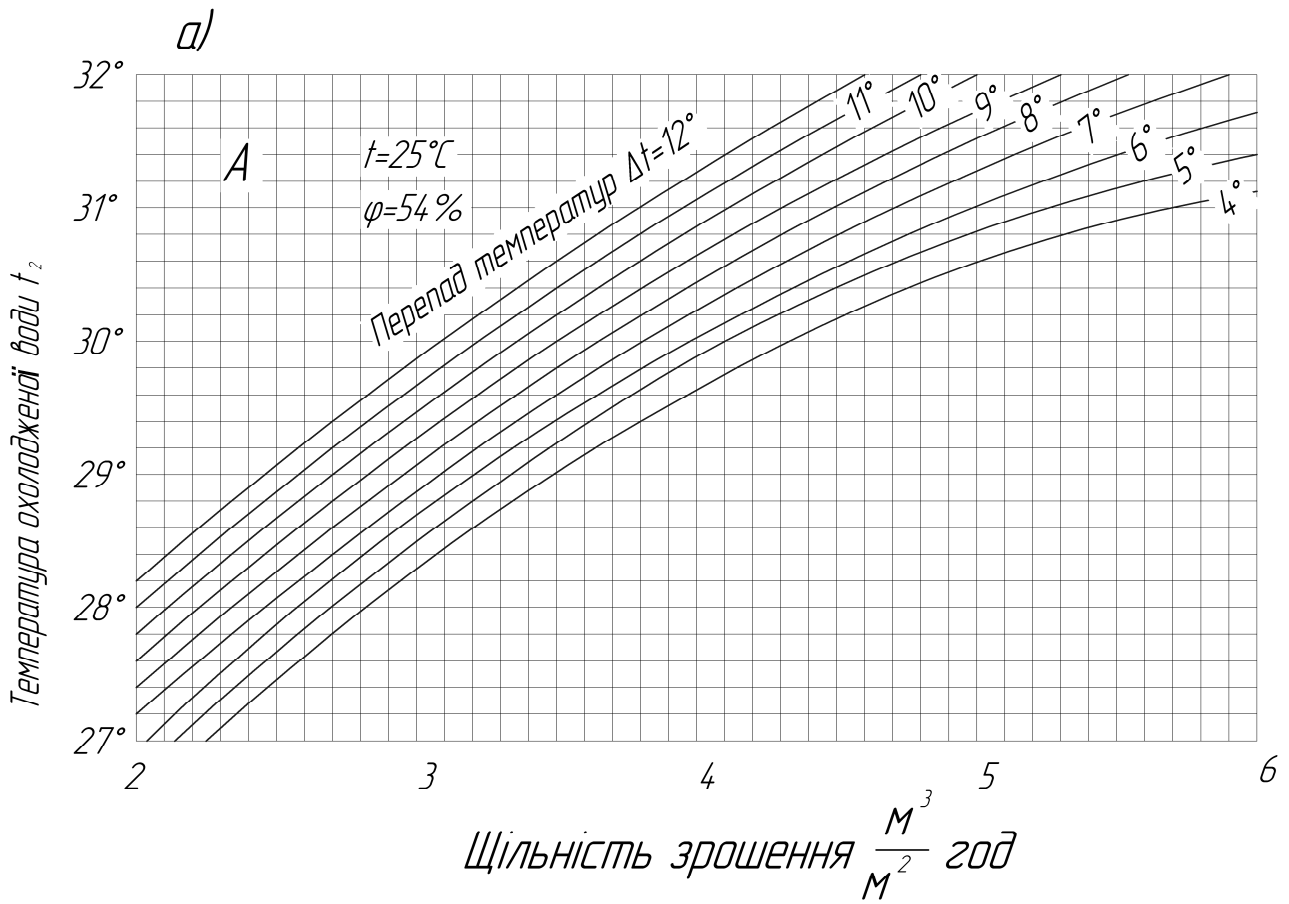


Рисунок А.2 – Номограма для розрахунку баштових градирень  
а – краплинні градирні б – плівкові градирні



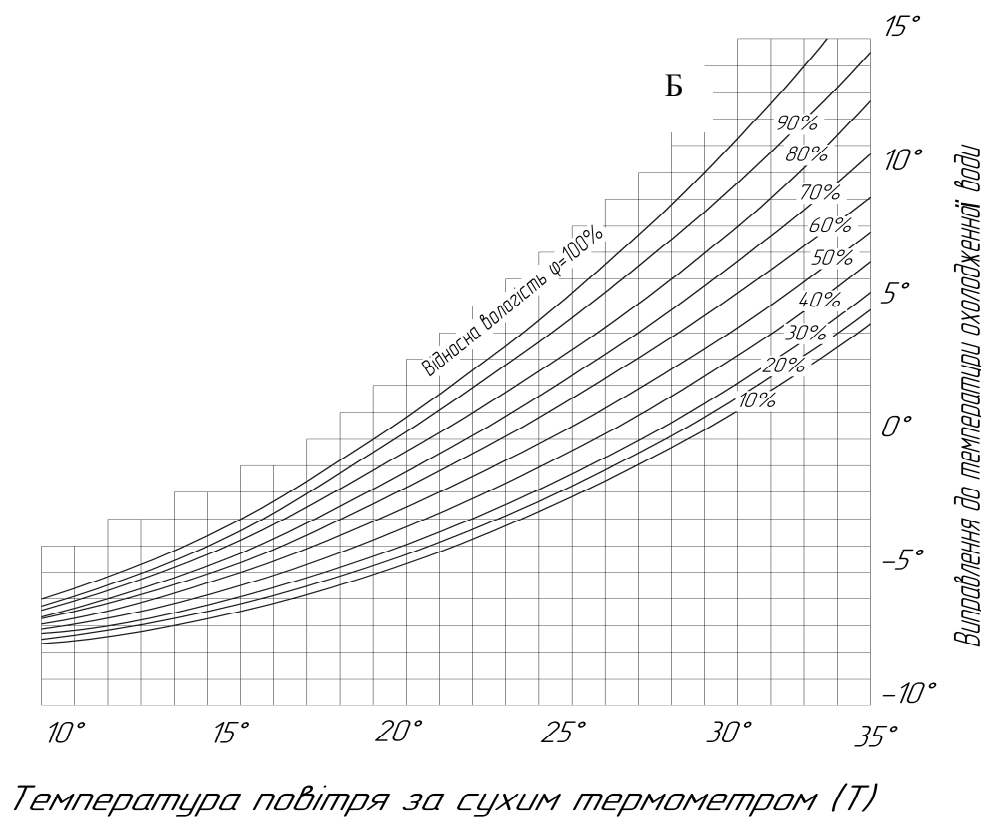
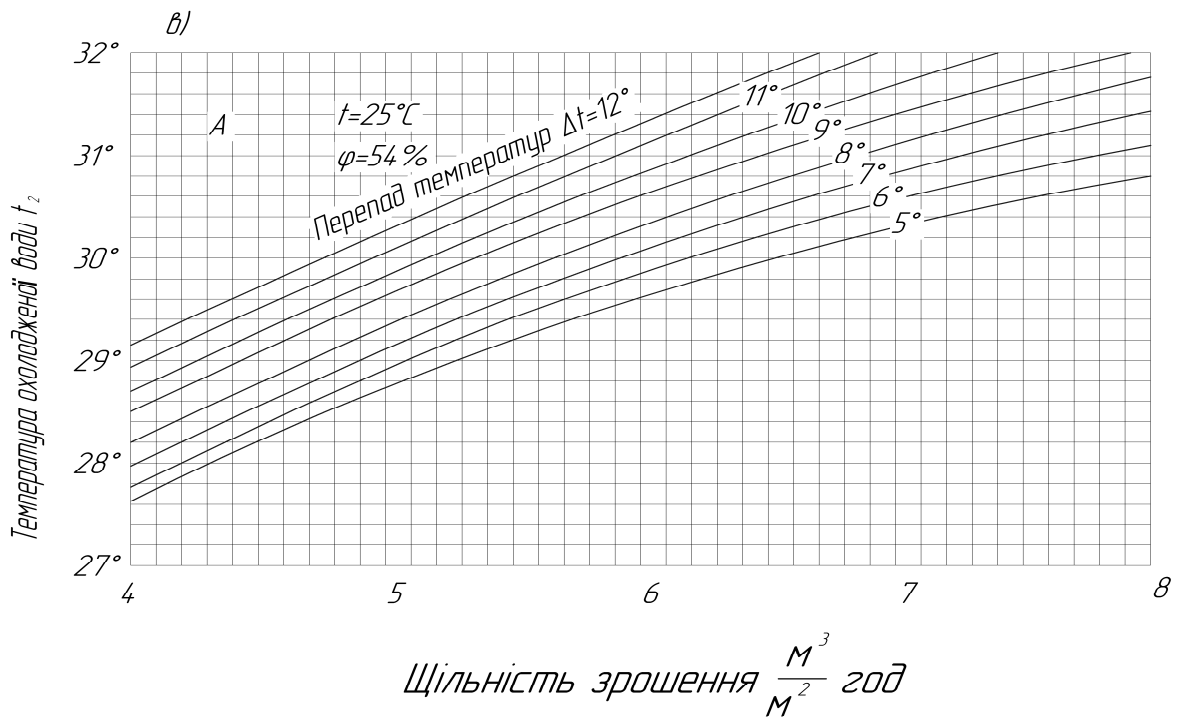


Рисунок А.3 – Номограма для розрахунку баштових градирень  
 в – краплинно-плівкові градирні

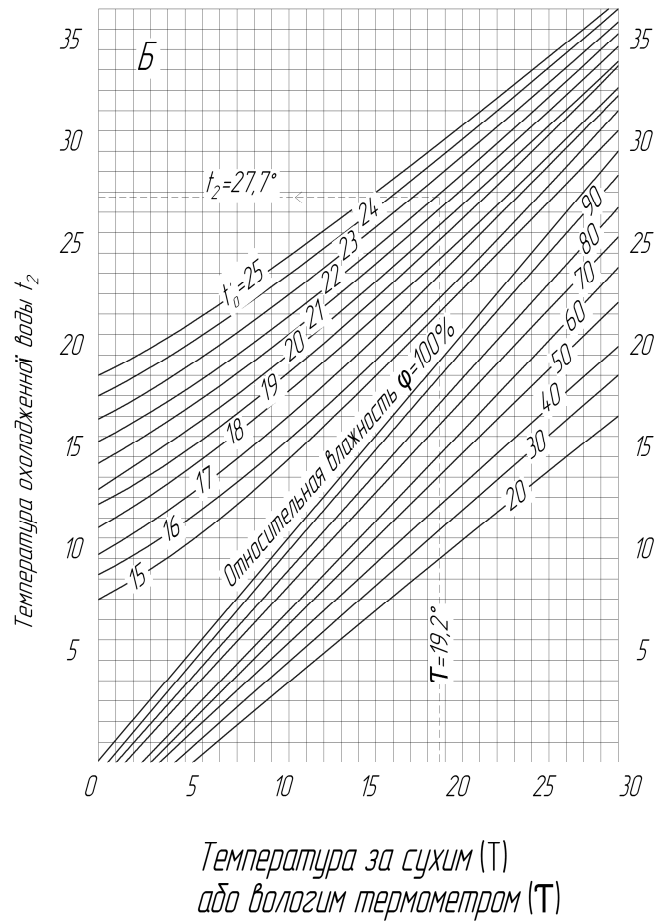
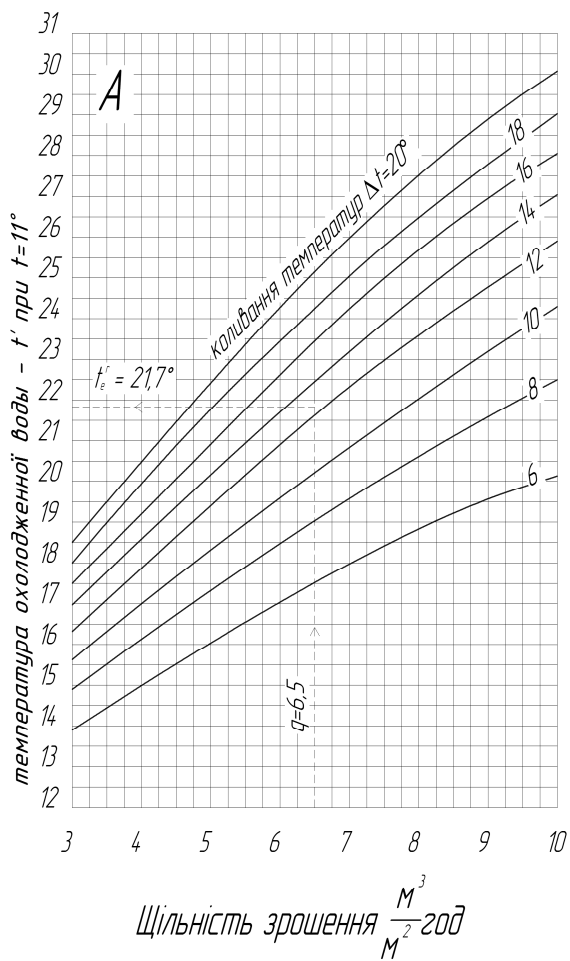


Рисунок А.4 – Графіки для теплового розрахунку вентиляторних плівкових градирень при середній швидкості повітря у зрошувачі 1,7-1,8 м/с

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Коефіцієнти  $K_{вин}$  для градирень

Температура повітря за сухим термометром,	0	10	20	30	40
$K_{вин}$	0,001	0,0012	0,0014	0,0015	0,0016

Таблиця Б.2 – Значення коефіцієнта К для вентиляторних градирень з крапельним зрошувачем або зрошувачем бризкального типу

Напір води перед соплом, м	Температура повітря за вологим термометром, $\tau$ °C							
	15	16	17	18	19	20	21	22
$\Delta t = 5$ °C								
4,5	442/395	461/408	485/422	506/436	528/450	549/466	570/485	592/505
3,5	420/380	441/392	461/406	481/419	502/433	522/448	543/467	563/486
2	388/358	407/369	426/381	445/493	464/407	483/422	502/439	521/458
$\Delta t = 10$ °C								
4,5	404/367	423/374	442/386	461/398	480/410	499/425	518/441	537/458
3,5	384/347	403/338	421/379	438/394	457/410	475/410	493/425	511/442
2	355/325	372/355	389/347	504/358	422/371	439/386	456/399	473/418
$\Delta t = 15$ °C								
4,5	363/324	380/335	397/346	414/357	432/370	450/384	457/398	484/417
3,5	344/311	361/321	377/332	394/343	411/355	428/369	448/383	461/402
2	316/291	322/301	348/311	364/322	379/333	395/346	410/360	426/379
$\Delta t = 20$ °C								
4,5	317/283	334/293	351/305	368/317	386/330	404/343	421	348/370
3,5	298/258	315/275	331/287	348/299	365/312	382/327	398	415/358
2	270/245	286/256	302/268	318/280	333/293	349/397	364	380/338

Таблиця Б.3 - Параметри атмосферного повітря

Пункти спостереження	Забезпеченість параметрів атмосферного повітря, %								
	1			5			10		
	$\theta$	$\varphi$	$\tau$	$\theta$	$\varphi$	$\tau$	$\theta$	$\varphi$	$\tau$
Астрахань	30,4	52	23,2	28,8	55	22,4	27,8	56	21,6
Горький	26,8	48	19,6	24,0	52	17,8	22,7	56	17,3
Іркутськ	22,0	63	17,6	20,5	68	16,9	19,7	71	16,5
Казань	26,8	43	18,7	24,6	51	18,2	23,4	55	17,8
Краснодар	28,0	55	21,6	26,5	57	20,6	25,5	59	20,1
Красноярськ	24,4	55	18,6	22,5	61	17,8	21,4	64	17,2
Ленінград	26,0	56	20,1	23,2	60	18,3	21,7	63	17,4
Луганськ	30,1	30	18,8	27,0	37	17,8	25,7	44	18,0
Москва	27,0	55	20,8	24,5	57	19,0	22,9	59	17,9
Новосибірськ	25,4	54	19,3	23,3	59	18,2	22,0	63	17,6
Омськ	27,4	44	19,4	24,1	50	17,6	22,5	55	17,0
Свердловськ	25,8	49	18,8	23,2	57	17,8	21,5	62	17,0
Ташкент	31,2	37	21,0	29,4	38	19,8	28,6	40	19,6
Тула	25,5	56	19,6	23,1	60	18,2	21,6	63	17,3
Уфа	27,6	44	19,5	25,3	48	18,3	23,8	53	17,8
Харків	28,5	38	19,2	26,4	45	18,8	24,9	52	18,6

Таблиця Б.4 - Типи вентиляторних градирень

Площа секції, м <sup>2</sup>	Розмір однієї секції, м <sup>2</sup>	Вид зрошувача	Висота зрошувача, м	Тип вентилятора	Подача повітря вентилятором	Номер проекту
16	4 × 4	плівковий	3,81	2ВГ-25	140	901-6-56
		краплинний	3,86		110	
		бризкальний	2,50		140	
16	4 × 4	плівковий	3,42	2ВГ-25	140	901-6-59
		краплинний	3,60		110	
		бризкальний	3,40		135	
24	4 × 6	бризкальний	1,76	3ВГ-25	180	901-6-67.83
64	8 × 8	плівковий	3,36	ИВГ-50	585	901-6-51
		краплинний	3,48		490	
		бризкальний	3,00		570	
64	8 × 8	плівковий	3,68	ИВГ-50	580	901-6-29
		краплинний	3,68		465	
		бризкальний	3,80		550	
144	12 × 12	плівковий	3,36	2ВГ-70	1290	901-6-48
192	12 × 16	бризкальний	2,00	2ВГ-70	1425	901-6-62
192	12 × 16	краплинний	3,67	2ВГ-70	1130	901-6-61
192	12 × 16	краплинний	3,80	2ВГ-70	1240	901-6-43
		бризкальний	3,60		1400	

ДОДАТОК В

$W_2, \text{ м/с}$

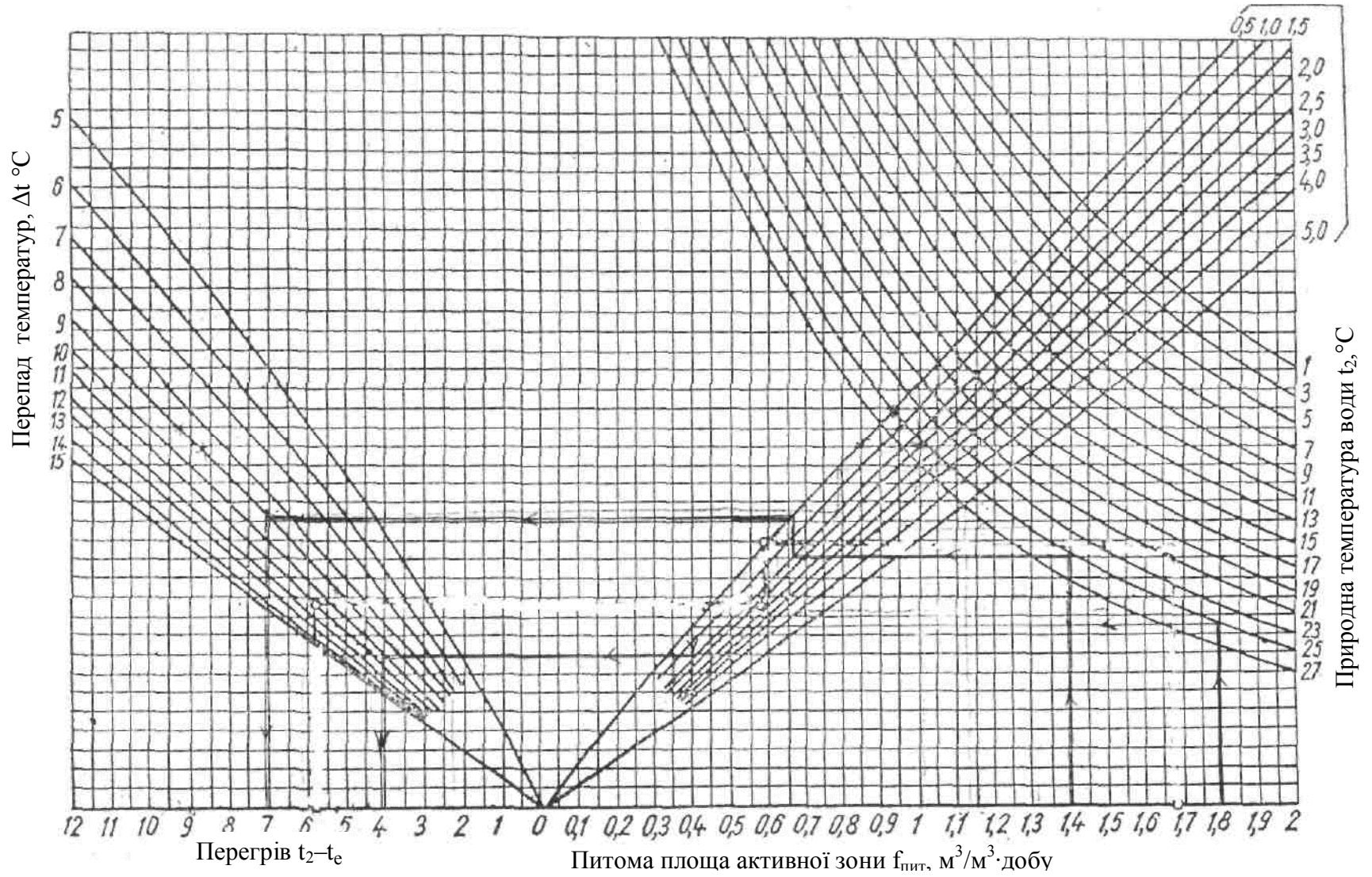


Рисунок В.1 – Графік розрахунку активної площі ставка-охолоджувача за методом Теплоелектропроекта

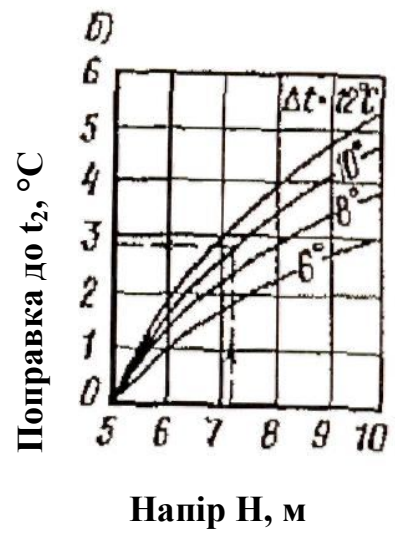
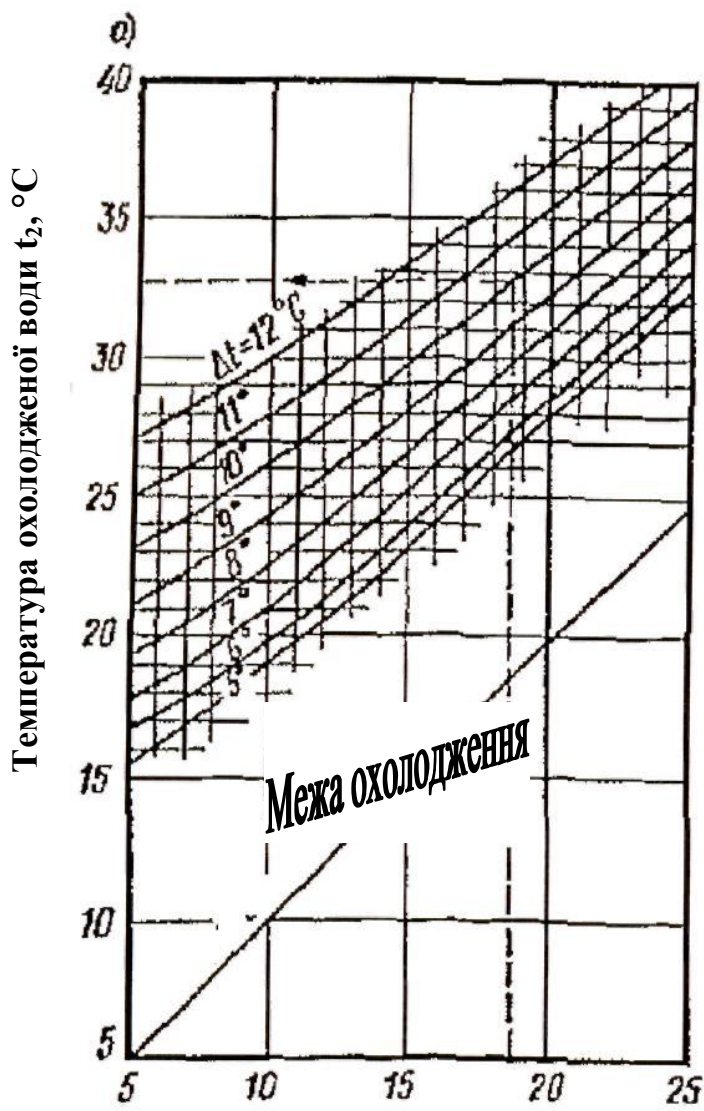


Рисунок В.2 – Графік для розрахунку параметрів бризкального басейну

*Виробничо-практичне видання*

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до практичних занять

із навчальної дисципліни

**«ТЕХНОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ  
У ПРОМИСЛОВОСТІ»**

*(для студентів усіх форм навчання*

*освітнього рівня «бакалавр»*

*за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія*

*(освітня програма «Гідротехніка (водні ресурси)»)*

Укладач **АЙРАПЕТЯН** Тамара Степанівна

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *Є. Г. Панова*

План 2020, поз. 78М

---

Підп. до друку 20.07.2020.

Друк на ризографі.

Зам. №

Формат 60 x 84/16.

Ум. друк. арк. 3,7.

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,

вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017 р.