

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

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до практичних занять

із навчальної дисципліни

**«ПРОМИСЛОВА ВОДОПІДГОТОВКА»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти  
зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,  
освітня програма «Цивільна інженерія»)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2024**

Методичні рекомендації до практичних занять із навчальної дисципліни «Промислова водопідготовка» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітня програма «Цивільна інженерія») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Т. С. Айрапетян, С. В. Лукашенко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 43 с.

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

Рецензент

**О. А. Сироватський**, кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очищення вод, протокол № 1 від 30.08.2023*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Практичне заняття № 1 РОЗРАХУНОК ВОДОСПОЖИВАННЯ ОСНОВНИХ ВИРОБНИЦТВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ЗАВОДУ.....	5
Практичне заняття № 2 РОЗРАХУНОК ВТРАТ ВОДИ В СИСТЕМІ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ.....	9
Практичне заняття № 3 ПОПЕРЕДНЄ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ .....	12
Практичне заняття № 4 РОЗРАХУНОК СПОРУД ЛОКАЛЬНОЇ ОЧИСТКИ ВІДСТІЙНОГО ТИПУ ТА НАПІРНИХ ФІЛЬТРІВ.....	16
Практичне заняття № 5 ОБРОБКА ВОДИ МЕТОДОМ ЙОННОГО ОБМІНУ.....	21
Практичне заняття № 6 ОХОЛОДЖЕННЯ ОБОРотної ВОДИ. РОЗРАХУНОК ОХОЛОДЖУВАЧІВ.....	24
Практичне заняття № 7 ОБРОБКА ВОДИ В СИСТЕМАХ ОБОРотноГО ВОДОПОСТАЧАННЯ. МЕТОД ПІДКИСЛЕННЯ.....	29
Практичне заняття № 8 ОБРОБКА ВОДИ В СИСТЕМАХ ОБОРотноГО ВОДОПОСТАЧАННЯ. МЕТОДИ ФОСФАТУВАННЯ ТА РЕКАРБОНІЗАЦІЇ.....	33
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35
ДОДАТКИ.....	36

## ВСТУП

Водне господарство промислових підприємств – це комплексна система, що забезпечує подачу води споживачам і відведення стічних вод, взаємозв'язок систем водопостачання і водовідведення окремих виробництв підприємства або заводу, захист водного басейну від забруднення та утилізацію відходів, що містяться в стічних водах [1–3]. При цьому очистка стічних вод розглядається як підготовка їх до повторного використання.

Предметом вивчення дисципліни «Промислова водопідготовка» є вивчення водного господарства промислових підприємств, а також отримання знань з теорії і практики створення оборотних і систем водопостачання, які дозволяють скоротити або повністю виключити скид стічних вод і забруднення водних об'єктів.

Метою вивчення дисципліни є підготовка фахівця, який володітиме знаннями, пов'язаними з вирішенням питань промислового водопостачання та водовідведення, розробкою систем і схем промислового водопостачання, що забезпечуватимуть охорону водних джерел від виснаження та забруднення й завдаватимуть мінімальної екологічної шкоди навколишньому природному середовищу.

Метою практичних занять є вивчення особливостей використання води на підприємствах чорної металургії, розрахунок оборотної системи та складання балансової схеми водоспоживання основних цехів металургійного заводу.

У процесі проведення практичних занять студенти закріплюють теоретичні знання і оволодівають навичками проектування і розрахунку систем виробничого водопостачання, які суттєво відрізняються від систем централізованого водопостачання населених міст як за схемами, так і за складом споруд.

Розрахунки на практичних заняттях виконуються в зошиті. Вони можуть виконуватися за прикладом, наданим викладачем, або за індивідуальними даними. Наприкінці кожного практичного заняття студент представляє викладачеві результати його виконання. Викладач оцінює в балах: індивідуальність виконання роботи, ступінь та правильність виконання. У разі невиконання певного практичного заняття з об'єктивних причин студент має право його відпрацювати. Час та порядок відпрацювання визначається викладачем.

## Практичне заняття № 1

### РОЗРАХУНОК ВОДОСПОЖИВАННЯ ОСНОВНИХ ВИРОБНИЦТВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ЗАВОДУ

У сучасних умовах, коли вирішального значення набули вимоги екології та раціонального використання води, застосовують оборотні, послідовні та замкнені схеми водопостачання металургійних підприємств.

При проектуванні системи виробничого водопостачання вирішують такі питання:

- якої категорії і для яких цілей використовується вода;
- 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 до водойми.

Принцип системи прямого водопостачання (СПВ) полягає в тому, що воду з джерела подають на підприємство, де її використовують у різних технологічних процесах. Після цього відпрацьовану воду скидають до водойми відповідно до санітарних вимог випуску стічних вод.

«Умовно чисті» води можуть скидатися без очистки, а забруднені стічні води направляють на каналізаційні очисні споруди, після яких очищені стічні води скидають до водойми. Принцип системи оборотного водопостачання полягає в тому, що нагріту в технологічних процесах воду не скидають до водойми, а направляють на охолодження і потім знову подають у виробництво. При цьому частина води в оборотному циклі втрачається, тому передбачають поповнення втрат за рахунок додавання до системи свіжої води.

Витрати і втрати води у оборотних циклах водопостачання та необхідну витрату свіжої води, яку необхідно додавати, розраховують на підставі вихідних даних (табл. 1.1). Розрахунки виконують для всіх основних циклів підприємства чи заводу.

Таблиця 1.1 – Нормативні показники водоспоживання

Найменування споживачів води	Норма водоспоживання	Коефіцієнт годинної нерівномірності	Втрати води у виробництві, %	Необхідний вільний напір на ввводі в цех, м
Доменні печі, охолодження (чистий цикл), м <sup>3</sup> /т	18–60	1,0–1,15	0,2	50–100
Газоочистка доменного цеху («брудний» цикл), м <sup>3</sup> на 1 000 м <sup>3</sup> газу	5,7–10,3	1,0–1,05	2	50–90
Розливальні машини з душуючими установками («брудний» цикл), м <sup>3</sup> /т	3,5	1,5–1,6	10	20–25
Грануляційні установки (брудний цикл), м <sup>3</sup> /т	2,5–5	1,2–1,6	15–30	20–25
Конверторний цех, охолодження елементів конверторів (чистий цикл), м <sup>3</sup> /т	22	1,1–1,15	1–2	30–50
Газоочистка конверторів («брудний цикл»), м <sup>3</sup> на 1 000 м <sup>3</sup> газу	18 2–20*	1,0–1,05	3	50–80
Мартенівський цех, охолодження печей (чистий цикл), м <sup>3</sup> /т	20	1,0–1,15	1–2	25–30
Газоочистка мартенівських печей, м <sup>3</sup> на 1 000 м <sup>3</sup> газу	1,5–2,0	1,0–1,05	3	50–80
Електросталеплавильний цех, охолодження печей (чистий цикл), м <sup>3</sup> /т	23	1,1–1,15	1–2	25–30
Газоочистка електросталеплавильних печей («брудний» цикл), м <sup>3</sup> на 1 000 м <sup>3</sup> газу	4–6	1,0–1,05	3	50–80
Установки безперервного розлиття сталі (УБРС), охолодження кристалізаторів (чистий цикл), м <sup>3</sup> /т	15–21	1,15–1,2	0,2	30–90
Установки безперервного розлиття сталі (УБРС), вторинне охолодження злитків («брудний» цикл), м <sup>3</sup> /т	10–14	1,15–1,2	5	30–90
Прокатні стани середньосортні, м <sup>3</sup> /т	12–23 8–9**	1,0–1,15	2–3	25–30
* У чисельнику конвертори без допалювання СО, у знаменнику – із допалюванням СО. ** У чисельнику чистий цикл прокатного стану, у знаменнику – брудний.				

Таблиця 1.2 – Розрахункова таблиця водоспоживання (приклад заповнення)

Найменування водоспоживачів	Річна продуктивність, т	Кількість годин роботи за рік, год	Норма водоспоживання	Коефіцієнт годинної нерівномірності	Розрахункова витрата оборотної води, м <sup>3</sup> /год	Втрати оборотної води %/м <sup>3</sup> /год				Витрата підживлювальної води, що додається в систему, м <sup>3</sup> /год	Вільний напір в цеху, м	Температура води t, °С	
						у виробництві та з продувкою	в процесі охолодження	в процесі очищення	загальні			до споживання	після споживання
Доменні печі, охолодження (чистий цикл)	1,3 · 10 <sup>6</sup>	8 472	60	1,1	10 127,5								
Газоочистка доменного цеху («брудний» цикл)	1,3 · 10 <sup>6</sup>	8 472	6 м <sup>3</sup> на 1 000 м <sup>3</sup> газу	1,05	3 866,9								

Розрахункову витрату оборотної води у системі водопостачання кожного виробництва визначають за такою формулою (чистий цикл):

$$Q_p = \frac{n_e \cdot N \cdot K_{год}}{T}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1.1)$$

де  $n_e$  – норма водоспоживання (кількість води на одиницю продукції), м<sup>3</sup>/т;

$N$  – річна продуктивність заводу (цеху), т/год;

$K_{год}$  – коефіцієнт годинної нерівномірності;

$T$  – кількість годин роботи виробництва за рік, год.

При розрахунку витрат оборотної води в газоочистках металургійних агрегатів (доменних, мартенівських, конверторних, електросталеплавильних) потрібно враховувати, що норму водоспоживання вимірюють в м<sup>3</sup> на 1 000 м<sup>3</sup> газу, що виділяється.

Розрахункову витрату оборотної води в системі газоочисток визначають за формулою, м<sup>3</sup>/год

$$Q_p = \frac{n_e \cdot N \cdot N_2 \cdot K_{год}}{1\,000 \cdot T}, \quad (1.2)$$

де  $N_2$  – кількість газу, що виділяється під час плавки 1 т металу.

Під час виплавки 1 т металу виділяється така кількість газу:

доменного – 4 000 м<sup>3</sup>;

мартенівського – 5 000 м<sup>3</sup>;

конверторного – 400 м<sup>3</sup> (при роботі без допалювання СО);

– 1 200 м<sup>3</sup>–1 600 м<sup>3</sup> (з допалюванням СО);

електросталеплавильного – 1 500 м<sup>3</sup>.



## Практичне заняття № 2

### РОЗРАХУНОК ВТРАТ ВОДИ В СИСТЕМІ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

У відкритих системах оборотного водопостачання відбуваються втрати води за рахунок випаровування частини її в охолоджувачах й через краплинне винесення вітром. Розчинені солі води, що випарилася (повністю або частково) залишаються в оборотній воді, підвищуючи їх концентрацію.

Таблиця 2.1 – Температурні нормативи якості води

Водоспоживачі	Температура, °С		
	нагрітої (відпрацьованої) води, $t_1$ , °С	охолодженої води, $t_2$ , °С	перепад температур, $\Delta t = t_2 - t_1$
Доменні печі	36–42	30–35	6–7
Газоочистка доменних печей	42–50	30–35	12–15
Розливальні машини	Не нормується		
Грануляційні установки	Не нормується		
Конверторний цех	42–47	30–35	12–15
Газоочистка конвертерного цеху	42–50	30–35	12–20
Мартенівський цех	40–47	30–35	10–15
Газоочистка мартенівських печей	Не нормується		
Електросталеплавильний цех	35–47	30–35	12
Газоочистка електросталеплавильного цеху	Не нормується		
УБРС (чистий цикл)	42–50	30–35	12–15
УБРС («брудний» цикл)	35–60	30–35	5–25
Прокатний стан (чистий цикл)	38–45	30–35	8–10
Прокатний стан («брудний» цикл)	33–40	30–35	3–5

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

Втрати води на випаровування в градирнях, %:

$$P_1 = K_{\text{вип}} \cdot \Delta t \cdot 100, \quad (2.1)$$

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

$\Delta t$  – перепад температур води, який визначається як різниця температур води, що надходить до охолоджувача, і температури охолодженої води, °С .

Втрати води з краплинним винесенням вітром залежать від типу охолоджувача (дод. А, табл. А.4).

Для поповнення втрат в циклі водопостачання й підтримки постійного складу води в систему оборотного водопостачання постійно надходить деяка кількість свіжої води, обробленої у тому чи іншому ступені.

Крім цього, здійснюють продувку оборотних систем, що сприяє зниженню загального солемісту й концентрації окремих йонів. У результаті впливу всіх цих чинників досягається свого роду рівновага, за якої концентрації, що встановилися, залежать від співвідношення між кількістю води й розчинених речовин, що надходять та видаляються.

Кількість води, що додається в систему  $P_d$ , %, дорівнює загальній сумі втрат води у системі:

$$P_d = P_1 + P_2 + P_3, \quad (2.2)$$

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

$P_3$  – величина продувки, %.

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

- за випаровуванням води:

$$K_y = \frac{P_{исп} + P_{ун} + P_{сбр}}{P_{ун} + P_{сбр}} = \frac{P_{дооб}}{P_{дооб} - P_{исп}}; \quad (2.3)$$

- за концентруванням солей:

$$K_k = \frac{C_{об}}{C_{дооб}} \quad \text{или} \quad K_{Cl} = \frac{Cl_{об}^-}{Cl_{дооб}^-} \quad (2.4)$$

Таблиця 2.2 – Розрахункова таблиця водоспоживання (приклад заповнення)

Найменування водоспоживачів	Річна продуктивність, т	Кількість годин роботи за рік, год	Норма водоспоживання	Коефіцієнт годинної нерівномірності	Розрахункова витрата оборотної води, м <sup>3</sup> /год	Втрати оборотної води % $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$				Витрата підживлювальної води, що додається в систему, м <sup>3</sup> /ГОД	Вільний напір в цеху, м	Температура води t, °С	
						у виробництві та з продувкою	в процесі охолодження	в процесі очищення	загальні			до споживання	після споживання
Доменні печі, охолодження (чистий цикл)	$1,3 \cdot 10^6$	8 472	60	1,1	10 127,5	$\frac{0,2}{20,3}$	$\frac{1,52}{153,43}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,72}{173,7}$	173,7	50	30	37
Газоочистка доменного цеха («брудний» цикл)	$1,3 \cdot 10^6$	8 472	6 м <sup>3</sup> на 1 000 м <sup>3</sup> газу	1,05	3 866,9	$\frac{1}{38,67}$	$\frac{2,68}{103,44}$	$\frac{0,5}{19,33}$	$\frac{4,17}{161,4}$	161,4	30	30	45

## Практичне заняття № 3

### ПОПЕРЕДНЄ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

#### Пом'якшення води. Вибір методу пом'якшення води

Для задоволення різноманітних вимог до якості води, споживаної при виробленні електричної і 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 ставляться до якості води, використовуваної в цих системах.

При проектуванні споруд для пом'якшення води мають бути вирішені такі завдання:

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

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

Рекомендації щодо вибору методів пом'якшення наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Методи пом'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	Необхідне прояснення води	на 0,4–0,8 мг-екв/л більше некарбонатної жорсткості вихідної води	0,8–1,2
2. Вапняно-содове пом'якшення	Необхідне прояснення води	0,5–1,0	0,8–1,2
<i>Катіонування</i>			
3. Одноступеневе Na-катіонування	Каламутність до 5–8 мг/л, забарвленість до 30 град.	0,05–0,1	не змінюється
4. Двоступеневе Na-катіонування	Каламутність до 5–8 мг/л, кольоровість до 30 град.	0,01	не змінюється
5. Паралельне H-катіонування, видалення CO <sub>2</sub>	Каламутність до 5–8 мг/л, кольоровість до 30 град., сумарний вміст хлоридів та сульфатів до 4 мг-екв/л, натрію до 2 мг-екв/л.	0,1	0,4

### Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
6. Послідовне Н- Na-катіонування	Каламутність до 5-8 мг/л, кольоровість до 30 град.	0,01	0,7
7. Н-катіонування з «голодною» регенерацією, буферні катіонітові фільтри, видалення CO <sub>2</sub>	Каламутність до 5-8 мг/л, кольоровість до 30 град.	на 0,7–1,5 мг-екв/л більше некарбо-натної жорсткості вихідної води	0,7-1,5

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

#### **Вибір складу та розрахунок споруд для пом'якшення води реагентним методом**

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

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

За умови, якщо  $\frac{Ca^{2+}}{20} > Ж_k$ , вмісті магнію у вихідній воді не більше 15 мг/л і перманганатній окисності не більше 10 мг O<sub>2</sub>/л, для пом'якшення води застосовують **вихрові реактори**. Остаточне освітлення води після вихрових реакторів здійснюють на фільтрах.

За умови, якщо  $\frac{Ca^{2+}}{20} < Ж_{\kappa}$ , декарбонізацію води здійснюють

в освітлювачах з подальшим доосвітленням на фільтрах.

*Порядок розрахунку установки реагентного пом'якшення води*

1. За вихідними даними й вимогами споживачів до пом'якшеної води обирають метод реагентного пом'якшення води: декарбонізацію або содово-вапняне пом'якшення води.

2. Визначають дози вапна, соди, коагулянту, мг/л.

Дозу вапна, у мг/л, визначають для двох розрахункових випадків залежно від співвідношення концентрації у воді йонів  $Ca^{2+}$  і карбонатної жорсткості (табл. 3.2)

Для зниження некарбонатної жорсткості поряд з карбонатною застосовують вапняно-содовий метод пом'якшення води. Дози вапна й соди, мг/л, у цьому випадку визначають за співвідношеннями, наведеними в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Дози реагентів

Метод	Реагент	Доза, мг/л	Умови застосування
Вапнування	вапно	$D_B = 28\left(\frac{CO_2}{22} + Ж_{\kappa} + \frac{D_{\kappa}}{e_{\kappa}} + 0,3\right)$	$\frac{Ca^{2+}}{20} > Ж_{\kappa}$
		$D_B = 28\left(\frac{CO_2}{22} + 2Ж_{\kappa} - \frac{Ca^{2+}}{20} + \frac{D_{\kappa}}{e_{\kappa}} + 0,5\right)$	$\frac{Ca^{2+}}{20} < Ж_{\kappa}$
Вапняно-содовий	вапно, сода	$D_B = 28\left(\frac{CO_2}{22} + Ж_{\kappa} + \frac{Mg^{2+}}{12} + \frac{D_{\kappa}}{e_{\kappa}} + 0,5\right)$ $D_C = 53\left(Ж_{нк} + \frac{D_{\kappa}}{e_{\kappa}} + 1\right)$	

У таблиці 3.2 прийнято такі позначення:

$Ж_{\kappa}$ ,  $Ж_{нк}$  – карбонатна й некарбонатна жорсткість води, мг-екв/л;

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

$D_{\kappa}$  – доза коагулянту, мг/л;

$e_k$  – еквівалентна маса активної речовини коагулянту, г/г-екв (для  $\text{FeCl}_3$  – 54, для  $\text{FeSO}_4$  – 67);

Дози коагулянту з розрахунку на безводні продукти  $\text{FeCl}_3$  або  $\text{FeSO}_4$  належить приймати 25–35 мг/л з подальшим уточненням у процесі експлуатації водопом’якшувальної установки.

Дозу коагулянту для уточнення, мг/л, визначають за формулою:

$$D_k = 3\sqrt[3]{C}, \quad (3.1)$$

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

$$C = M_{вих} + 50 \left( \frac{CO_2}{22} + 2Ж_k \right) + 29 \frac{Mg^{2+}}{12} + D_e \left( \frac{100 - m}{100} \right), \quad (3.2)$$

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

$m$  – вміст  $\text{CaO}$  у технічному вапні,  $m = 70\%$ ;

3. Визначають кількість реагентів в т/добу (вапна, соди, хлорного заліза) за формулами:

$$G_e = \frac{Q \cdot D_e}{P_e \cdot 10^4} \quad (3.3)$$

$$G_c = \frac{Q \cdot D_c}{P_c \cdot 10^4} \quad (3.4)$$

$$G_{коаг} = \frac{Q \cdot D_k}{P_k \cdot 10^4} \quad (3.5)$$

де  $Q$  – добова продуктивність станції очищення, м<sup>3</sup>/добу;

$P_e$  – вміст  $\text{CaO}$  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 %).

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

$$W = \frac{q \cdot n \cdot D_B}{10000 \cdot b_B \cdot \gamma_B}, \quad \text{м}^3 \quad (3.6)$$

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

$n$  – час, на який готується вапняне молоко (12–24 год);

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

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

## Практичне заняття № 4

### РОЗРАХУНОК СПОРУД ЛОКАЛЬНОЇ ОЧИСТКИ ВІДСТІЙНОГО ТИПУ ТА НАПІРНИХ ФІЛЬТРІВ

Використання очищених стічних вод у системах оборотного водопостачання є центральним питанням загальної проблеми переведення промислових підприємств на замкнений режим роботи без скиду стічних вод.

Від механічних домішок стічні води найчастіше очищують відстоюванням. Залежно від кількості стічних вод, що очищують, характеру забруднюючих речовин і засобу обробки осаду, що виділяється зі стічних вод, обирають тип відстійників або інших відстійних споруд.

Розрахунок очисних споруд полягає у визначенні розмірів і кількості споруд залежно від витрати води в оборотному циклі з урахуванням втрат води і кількості підживлювальної води.

#### *Горизонтальні відстійники*

Площу зони осадження,  $m^2$ , приймають залежно від питомого гідравлічного навантаження:

$$F = \frac{Q}{q_{уд}}. \quad (4.1)$$

Довжина відстійника:

$$L = V_{cp} \cdot t, \quad (4.2)$$

де  $V_{cp}$  – середня швидкість руху води, м/с. У проточній частині відстійника приймають  $V_{cp} = 5-10$  мм/с;

$t$  – час перебування води у відстійнику, с.

$$t = \frac{H}{U_0}, \quad (4.3)$$

де  $H$  – глибина проточної частини відстійника, приймають 1,5–4 м (при відношенні довжини до глибини відстійника 8 до 20-ти);

$U_0$  – гідравлічна крупність частинок зважених речовин у стічній воді, мм/с.

Ширина відстійника, м:



$$B = \frac{Q}{V_{cp} \cdot H}. \quad (4.4)$$

Ширину однієї секції приймають рівною 3–6 м, в окремих випадках – до 9 м залежно від способу видалення осаду.

#### *Радіальні відстійники*

Найбільшого розповсюдження при очищенні стічних вод металургійних виробництв набули відстійники діаметром 30 м з камерою флокуляції конструкції ДП УкрНТЦ «Енергосталь». Технічні характеристики радіальних відстійників із вбудованою камерою флокуляції наведено у таблиці Б.1 (дод. Б).

Відстійник має в центральній частині глибину 6 м, біля стінки (на периферії) – 3,18 м. Максимальна продуктивність – 3 500 м<sup>3</sup>/год. Камера флокуляції має діаметр 10 м і розташована в центрі відстійника. Наявність камери флокуляції дозволяє збільшити гідравлічне навантаження порівняно із звичайними відстійниками.

Для інтенсифікації процесу очищення стічних вод застосовують різні коагулянти і флокулянти. Як коагулянти найчастіше використовують хлорне і сірчаноокисле залізо, сірчаноокислий алюміній, вапно тощо, як флокулянти – різні високомолекулярні органічні сполуки, наприклад, поліакриламід (ПАА), активована кремнекислота та ін..

При визначенні площі зони осадження в цих відстійниках не враховується площа камери флокуляції.

Площа зони осадження радіальних відстійників, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{q_{y\delta}}. \quad (4.5)$$

Площа зони осадження одного відстійника, м<sup>2</sup>:

$$F_1 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (4.6)$$

де  $D$  – діаметр відстійника, 30 м;

$d$  – діаметр камери флокуляції, 10 м.

Число відстійників:

$$n = \frac{F}{F_1}. \quad (4.7)$$

#### *Відкриті безнапірні гідроциклони і флокулятори*

Відкриті гідроциклони доцільно застосовувати для освітлення порівняно невеликої кількості стічних вод (100–200 м<sup>3</sup>/год), які володіють значною концентрацією суспензії і високими флокуляційними властивостями.

Найбільшого поширення в чорній металургії одержали відкриті гідроциклони діаметром 6 м, технічні характеристики яких наведено у таблиці Б.5 (дод. Б).

Ефект очищення у відкритих гідроциклонах визначається гідравлічним навантаженням, яке встановлюється залежно від характеристики стічних вод, ступеня очистки і геометричних розмірів гідроциклона.

Питоме гідравлічне навантаження для відкритих гідроциклонів визначають за формулою

$$q = 3,6 \cdot U_0, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}, \quad (4.8)$$

де  $U_0$  – гідравлічна крупність, мм/с.

Апарат працює як без коагуляції й флокуляції за допомогою реагентів, так і особливо ефективно за допомогою коагулянтів і флокулянтів.

Ефект роботи гідроциклона значно збільшується при використанні коагулянтів. Наприклад, стосовно до стічних вод газоочисток мартенівських печей і конверторів для досягання необхідної ефективності очистки (150 мг/л у проясненій воді) навантаження без коагуляції складає 5–6 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год, а з застосуванням коагулянтів – 10–12 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год.

Площа одного гідроциклона, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (4.9)$$

Продуктивність одного апарату, м<sup>3</sup>/год:

$$Q_1 = q \cdot F. \quad (4.10)$$

Кількість споруд, шт.:

$$n = \frac{Q}{Q_1}. \quad (4.11)$$

*Флокулятор* – апарат, у якому суміщені конструктивні елементи відкритого гідроциклону та радіального відстійника. Діаметр флокулятора і висота 12 м. При очищенні стічних вод газоочисток питома гідравлічне навантаження на апарат становить 7–8 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>хгод, концентрація суспензії в очищеній воді – до 100 мг/л при концентрації у вихідній – 3–4 г/л; концентрація масел в очищеній воді не перевищує 40 мг/л при концентрації у вихідній – 100 мг/л.

*Тонкошаровий флокулятор* – апарат, у якому поєднано безперервне механізоване збирання шламу за допомогою обертаючої скребкової ферми з максимальним ступенем заповнення поперечного перерізу апарата пластинчатими тонкошаровими модулями.

Технічні характеристики флокуляторів наведено у таблицях Б.2, Б.3 (дод. Б).

Порядок розрахунку флокуляторів такий:

1. Визначають витрату води на один апарат, м<sup>3</sup>/год:

$$Q_1 = q_{num} \cdot S_{\phi}, \quad (4.12)$$

де  $q_{num}$  – питома гідравлічне навантаження на один апарат, м<sup>3</sup>/ч;

$S_{\phi}$  – площа флокулятора, м<sup>2</sup>,  $S_{\phi} = 113 \text{ м}^2$ .

2. Визначають кількість апаратів, шт.:

$$n = \frac{Q}{Q_1}, \quad (4.13)$$

де  $Q$  – загальна витрата стічних вод, що надходять на очищення, м<sup>3</sup>/год.

3. Об'єм камери флокуляції, м<sup>2</sup>:

$$W_k = \frac{\pi}{4} (D_{\phi}^2 - D_k^2) \cdot H, \quad (4.14)$$

де  $D_{\phi}$  – діаметр флокулятора, м ( $D_{\phi} = 12 \text{ м}$ );

$D_k$  – діаметр камери, м ( $D_k = 10,6 \text{ м}$ );

$H$  – висота флокулятора, м ( $H = 10 \text{ м}$ ).

4. Об'єм зони відстоювання, м<sup>3</sup>:

$$W_{\text{відст}} = \frac{\pi \cdot D_{\kappa}^2}{4} \cdot H. \quad (4.15)$$

Для підведення води в апарат передбачаються 8–12 патрубків, які розташовані тангенціально у два-три яруси.

#### *Напірні фільтри*

На підприємствах чорної металургії найчастіше застосовують фільтри діаметром 3,4 м. Технічні характеристики напірних антрацито-кварцових фільтрів ДП УкрНТЦ «Енергосталь» наведено у таблиці Б.4 (дод. Б).

Кількість напірних фільтрів визначають залежно від робочої площі фільтрування одного апарату.

Загальна площа фільтрування визначається залежністю, м<sup>2</sup>:

$$F_{\phi} = \frac{\alpha \cdot Q}{V_{\phi}}, \quad (4.16)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує витрату освітленої води на власні потреби, приймається залежно від кількості промивок,  $\alpha = 1,03–1,1$ ;

$Q$  – витрата води, яка підлягає фільтруванню, м<sup>3</sup>/год;

$V_{\phi}$  – швидкість фільтрування при нормальному режимі роботи, м/год.

Витрата води на промивку фільтра, м<sup>3</sup>/год:

$$q_{\phi} = \frac{F_{\phi} \cdot q_{np} \cdot t \cdot n}{24}, \quad (4.17)$$

де  $q_{np}$  – інтенсивність промивки фільтра, л/(с·м<sup>2</sup>), для піщаного завантаження і завантаження з мармурової крихти – 15 л/(с·м<sup>2</sup>), для подрібненого антрациту – 10 л/(с·м<sup>2</sup>);

$t$  – тривалість промивки  $t = 30$  хв.;

$n$  – число промивок на добу ( $n = 1–2$ ).

## Практичне заняття № 5

### ОБРОБКА ВОДИ МЕТОДОМ ЙОННОГО ОБМІНУ

#### Катіонітне пом'якшення води

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

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

#### Одноступеневе *Na*-катіонування

Таку схему застосовують для неглибокого пом'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 становлять 4–7 м.

Вихідні дані для розрахунку установок одноступеневого *Na*-катіонування:

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

При визначенні загального об'єму фільтруючого матеріалу приймають:

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

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

$$E_{роб}^{Na} = \alpha_{Na} \cdot \beta_{Na} \cdot E_{новн} - 0,5 \cdot q_{пит} \cdot J_{заг.} \quad (5.1)$$

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

$\alpha_{Na}$  – коефіцієнт ефективності регенерації, що враховує неповноту регенерації катіонів, приймають залежно від питомої витрати солі (табл. 5.1);

$\beta_{Na}$  – коефіцієнт, що враховує зниження обмінної ємкості катіоніту за  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$  внаслідок часткового затримування катіонів  $Na^+$  і залежить від концентрації натрію у вихідній воді  $C_{Na} = (Na^+)/23$  г-екв/м<sup>3</sup> (табл. 5.2);

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

$q_{нут}$  – питома витрата води на відмивання катіоніту, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> катіоніту, приймають для сульфовугілля – 4 і для КУ-2 – 6;

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

Коефіцієнти  $\alpha_{Na}$  и  $\beta_{Na}$  приймають за таблицями 5.1. і 5.2 залежно від питомої витрати солі на регенерацію катіоніту, г/г-екв, та співвідношення концентрації натрію і загальної жорсткості у вихідній воді.

Таблиця 5.1 – Коефіцієнт  $\alpha_{Na}$

Питома витрата солі на регенерацію катіоніту, г/г-екв	100	150	200	250	300	400
Коефіцієнт $\alpha_{Na}$	0,62	0,74	0,81	0,86	0,9	0,91

Таблиця 5.2 – коефіцієнт  $\beta_{Na}$

$C_{Na^2}/J_0^{вих}$	0,01	0,03	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10
Коефіцієнт $\beta_{Na}$	0,93	0,9	0,88	0,83	0,7	0,65	0,57	0,54	0,5

Об'єм катіоніту фільтрів I ступеня визначають за формулою:

$$W_k = \frac{24 \cdot Q_{кат.ф.I} \cdot J_0^{вих}}{n_p \cdot E_{роб}^{кат}}, \text{ м}^3, \quad (5.2)$$

де  $Q_{кат.ф.I}$  – витрата води, що надходить на натрій-катіонування, м<sup>3</sup>/год;

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

$E_{роб}^{кат}$  – 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:

$$F_{кат.ф.I} = \frac{W_k}{H_k}, \text{ м}^2, \quad (5.3)$$

де  $H_k$  – висота шару катіоніту, приймають 2–2,5 м (більшу висоту завантаження приймають при жорсткості, більшій за 10 г-екв/м<sup>3</sup>).

### Двоступеневе Na-катіонування

Натрій-катіонітовий метод пом'якшення води за двоступеневою схемою застосовують для глибокого пом'якшення води, коли необхідно знизити жорсткість води до 0,01 мг-екв/л. Застосування такої схеми доцільне при жорсткості вихідної води, більшій за 10 мг-екв/л. При розрахунку фільтрів II ступеня жорсткість вихідної води приймають 0,1 мг-екв/л.

При двоступеневому Na-катіонуванні вода, що пом'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/г-екв поглинених катіонів), що дозволяє отримати глибоко пом'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 120–150 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>

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

### **Практичне заняття № 6**

## **ОХОЛОДЖЕННЯ ОБОРОТНОЇ ВОДИ. РОЗРАХУНОК**

### **ОХОЛОДЖУВАЧІВ**

#### *Вибір типу охолоджувача*

Вибір типу охолоджувача здійснюють на підставі техніко-економічного порівняння варіантів. Тип охолоджувача приймають з урахуванням розрахункової витрати води, режиму роботи, умов розміщення на промисловому майданчику, розрахункової температури охолодженої води, перепаду температур води в системі, глибини охолодження, технологічних вимог до стабільності ефекту охолодження, особливостей експлуатації, хімічного складу води та її втрат під час охолодження. При виборі охолоджувача враховують також вимоги природоохоронних органів до роботи охолоджувача як можливих джерел негативного впливу на стан навколишнього середовища (винос краплинної вологи, викид шкідливих речовин, шум).

Рекомендована сфера застосування різних типів охолоджувачів води (табл. 6.1) визначається їх якісними й 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.



Вибір типу зрошувача здійснюють залежно від якості охолоджуваної води. Основним типом зрошувачів, що забезпечують найбільш високий ефект охолодження, є плівковий, але він чутливий до наявності у воді нафтопродуктів, завислих речовин та інших домішок, що викликають заростання зазорів між елементами. Плівкові зрошувачі застосовують при концентрації нафтопродуктів менше 25 мг/л і завислих речовин до 50 мг/л. При загальній концентрації в оборотній воді жирів і нафтопродуктів 25–125 мг/л застосовують краплинні або краплинно-плівкові зрошувачі, а при концентрації цих речовин більше 120 мг/л – бризкальні.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані сфери застосування охолоджувачів

Охолоджувач	Сфера 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 надано для води, що надходить на охолоджувач з температурою < 40 °С.

Орієнтовне гідравлічне навантаження (відношення витрати охолоджуваної води до площі градирні в плані), м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год), приймають при зрошувачі: плівкового типу – 8–12; краплинного типу – 6–10; бризкальному – 5–6.

За умовами надійності, зручності й економічності експлуатації рекомендується від 2 до 12 секцій або градирень в одному оборотному циклі водопостачання. Якщо за технологічними розрахунками число секцій виходить за ці межі, потрібно вибрати інший типорозмір градирні.

### *Розрахунок баштових градирень*

Розрахунок баштових градирень складається з аеродинамічного і теплового розрахунків.

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

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

Розрахунки баштових градирень виконують за спеціальними алгоритмами програм з використанням ЕОМ. Для спрощування теплового розрахунку баштових градирень використовують емпіричні графіки (дод. А).

При використанні баштових градирень для охолодження води розрахунок ведуть наступним чином. За графіком А при заданій щільності зрошення (гідралічному навантаженні) і перепаду температур  $\Delta t$ , визначають температуру охолодженої води  $t_2$  при стандартних умовах: температурі повітря  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , відносній вологості  $\varphi = 54\%$ . За графіком Б визначають поправку до значень температури і вологості повітря.

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

При реконструкції баштових градирень із заміною зрошувача, модернізацією водорозподільної системи, встановленням водоуловлювача до графіка охолодження води потрібно вводити корегувальні коефіцієнти, що може бути здійснено при натурних випробуваннях градирень після реконструкції. Однією з основних складових робіт, пов'язаних із 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 тощо) для визначення температури охолодженої води та швидкості повітря в баштовій градирні.

### Розрахунок вентиляторних градирень

Аеродинамічний розрахунок вентиляторних градирень полягає перш за все у визначенні аеродинамічного опору градирні залежно 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 із врахуванням прийнятої середньої швидкості руху повітря в зрошувачі.

Вихідні дані для розрахунку вентиляторних градирень:

1) гідравлічне навантаження  $q_{\max}$ , м<sup>3</sup>/год – максимальна годинна витрата води, що надходить у градирні;

2) температура води на вході  $t_1$  і виході  $t_2$  з градирні задається технологіями підприємства на підставі теплотехнічного розрахунку охолоджувального устаткування.

Розрахунок градирень полягає у визначенні площі зрошувального пристрою і кількості градирень або їх секцій (якщо градирні секційні), що забезпечують охолодження заданих витрат 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  $\varphi$  і температурі за вологим термометром  $\tau$ .

Параметри атмосферного повітря змінюються як протягом доби, так і в межах року. Розрахунок градирень здійснюють на найменш сприятливий літній період за середньодобовими температурами повітря за сухим і вологим термометрами за багаторічними спостереженнями при забезпеченості 1–10 %. Значення параметрів атмосферного повітря (температур  $\theta$  і  $\tau$  і вологості  $\varphi$ ) для деяких міст наведено в таблиці А.3 (дод. А).

Розрахунок площі зрошування і кількості вентиляторів градирень виконують за допомогою графіків і таблиць, складених за дослідно-виробничими даними і теоретичними залежностями.

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

$$F_{op} = \frac{Q \cdot (t_1 - t_2) \sqrt{t_1 - t_2} \cdot 10^3}{K (V_6 \cdot \rho)^{0,625} \cdot (t_1 - \tau)^{1,95}}, \quad (6.1)$$

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

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

$K$  – коефіцієнт, що залежить від типу зрошувача, температури повітря за вологим термометром, ширини зони охолодження і натиску води перед соплами, визначається за таблицею А.2 (дод. А);

$V_6$  – швидкість руху повітря через зрошувач, м/с;

$\rho$  – щільність зовнішнього повітря залежно від його температури за сухим термометром і його відносною вологістю, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – температура повітря за вологим термометром °С.

Швидкість руху повітря в градирні становить близько 2 м/с. Наприклад, у градирнях площею 16 м<sup>2</sup> ця швидкість становить 2,21 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; 1200 м<sup>2</sup> – 2,3 м/с.

Щільність повітря при вологості 40–100 % приблизно приймають залежно від температури повітря за сухим термометром при  $\theta = 20$  °С  $\rho = 1,17$ – $1,18$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta = 22$  °С  $\rho = 1,16$ – $1,17$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta = 24$  °С  $\rho = 1,15$ – $1,16$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta = 26$  °С  $\rho = 1,14$ – $1,15$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta = 80$  °С  $\rho = 1,13$ – $1,14$  кг/м<sup>3</sup>.

Вказану формулу можна використовувати при ширині зони охолодження  $t_1 - t_2 = 3$ – $20$  °С, висоті зони охолодження  $t_2 - \tau = 3$ – $4$  °С, температурі повітря за вологим термометром  $\tau = 15$ – $22$  °С, відносній вологості  $\varphi = 30$ – $70$  %.

Заключним етапом теплотехнічного розрахунку є підбір типового проекту градирень (табл. А.5, дод. А).

## Практичне заняття № 7

### ОБРОБКА ВОДИ В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ. МЕТОД ПІДКИСЛЕННЯ

Як показує досвід експлуатації, при роботі систем водопостачання газоочисток металургійних агрегатів у газоочисних апаратах і трубопроводах відбувається інтенсивне утворення щільних сольових відкладень. Це викликає серйозні ускладнення у роботі доменних печей, кисневих конвертерів, агломераційних машин та інших металургійних агрегатів.

Необхідність обробки води для запобігання карбонатним відкладенням визначають за лужністю води, що додають до системи, і коефіцієнтом випаровування оборотної води, за умови, якщо

$$L_D \cdot K_K \geq 3, \quad (7.1)$$

де  $L_D$  – лужність свіжої (підживлювальної) води, мг-екв/л;

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

Боротьбу з відкладанням карбонату кальцію в теплообмінних апаратах і трубопроводах систем оборотного водопостачання ведуть такими способами:

- безперервним додаванням в систему оборотного водопостачання води з меншою карбонатною жорсткістю при скиді частини відпрацьованої (оборотної) води із системи (продувкою);
- підкисленням (обробка кислотою);
- фосфатуванням – (додавання в оборотну воду речовин, що гальмують процес кристалізації карбонату кальцію – поліфосфат натрію, триполіфосфат натрію  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ );
- кислотно-фосфатною обробкою;
- рекарбонізацією (компенсація втрат рівноважної вуглекислоти в системі оборотного водопостачання шляхом додавання у воду вуглекислоти, наприклад димових газів);
- зм'якшенням підживлювальної води вапном з проясненням, натрій-катіонуванням або Н-катіонуванням з голодною регенерацією.

Кількість води, що скидають із системи під час продувки для підтримання гранично допустимої (максимальної) величини карбонатної жорсткості оборотної води, % від витрати оборотної води, визначають за формулою

$$P_3 = \frac{P_1 \cdot \mathcal{J}_{\text{ДОД}}^K}{\mathcal{J}_{\text{ГРАН}}^K - \mathcal{J}_{\text{ОБ}}^K} - P_2, \quad (7.2)$$

де  $\mathcal{J}_{\text{ДОД}}$  – карбонатна жорсткість свіжої води, що додається мг-екв/л;

$\mathcal{J}_{\text{ОБ}}$  – гранична жорсткість оборотної води, мг-екв/л.

#### Метод підкислення

При підкисленні води дозу кислоти  $D_k$ , мг/л з розрахунку на підживлювальну воду визначають за формулою [8]:

$$D_k = e \left( L_d - \frac{L_{об}}{K_k} \right) \frac{100}{C_k}, \quad (7.3)$$

де  $C_k$  – вміст сірчаної або соляної кислоти % (для сірчаної кислоти  $C_k = 92$  %);

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

Лужність оборотної води, мг-екв/л: (7.4)

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

де  $P = P_1 + P_2 + P_3$  – добавка води до системи, %;

$$N = \frac{\psi}{\sqrt{K_k (Ca^{2+})_d}}; \quad (7.5)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт, що визначається залежно від загального солемісту оборотної води та температури охолодженої води (табл. 7.1);

$(CO_2)_{охол}$  – концентрація вуглекислоти в оборотній воді після охолоджувача, мг/л, що визначається залежно від лужності підживлювальної води й коефіцієнта концентрування води в системі (табл. 7.2).

Загальний солеміст оборотної води:

$$S_{об} = S_{од} K_k. \quad (7.6)$$

Таблиця 7.1 – Визначення коефіцієнта  $\psi$  залежно від загального солемісту оборотної води та температури охолодженої води

Температура охолодженої води, $t_2$ °С	Солеміст 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

Сульфат кальцію не випадає в системі оборотного водопостачання, якщо добуток активних концентрацій іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{SO}_4^{2-}$  в оборотній воді не перевищує добуток розчинності сульфату кальцію:

$$f^2 \cdot C_{\text{Ca}} \cdot C'_{\text{SO}_4} \cdot K_y^2 \leq \text{PP}_{\text{CaSO}_4}, \quad (7.7)$$

де  $f$  – коефіцієнт активності двовалентних йонів (табл. 7.3), що визначається залежно від йонної сили розчину оборотної води.

Таблиця 7.2 – Концентрація  $(\text{CO}_2)_{\text{охол}}$  в оборотній воді, охолодженій у градирнях

Лужність підживлювальної води $L_d$ , мг-екв/л	Концентрація $(\text{CO}_2)_{\text{охол}}$ , мг/л, 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

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

$$\mu = \frac{K_y}{2} [(C'_{\text{Cl}} + C_{\text{HCO}_3^-} + C_{\text{Na}^+}) + 4(C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}} + C'_{\text{SO}_4})], \quad (7.8)$$

де  $C_{\text{HCO}_3^-}$ ,  $C_{\text{Na}^+}$ ,  $C_{\text{Ca}^{2+}}$ ,  $C_{\text{Mg}^{2+}}$  – концентрації йонів у підживлювальній воді, г-йон/л.

$C'_{\text{Cl}^-}$ ,  $C'_{\text{SO}_4}$  – концентрації хлоридних і сульфатних йонів у підкисленій воді, г-йон/л.

При підкисленні сірчаною кислотою:

$$C'_{\text{SO}_4} = C_{\text{SO}_4 \text{ дод}} + \frac{D_k \cdot C_k}{98 \cdot 1000 \cdot 100}, \quad (7.9)$$

$$C'_{\text{Cl}} = C_{\text{Cl доб}}. \quad (7.10)$$

При підкисленні соляною кислотою:

$$C'_{\text{SO}_4} = C_{\text{SO}_4 \text{ дод}}, \quad (7.11)$$

$$C'_{\text{Cl}} = C_{\text{Cl дод}} + \frac{D_k \cdot C_k}{36 \cdot 500 \cdot 100} \quad (7.12)$$



Добуток розчинності сульфату кальцію при температурі 25–60 °С, приймають  $2,4 \cdot 10^{-5}$ .

Таблиця 7.3 – Коефіцієнт активності двовалентних йонів

$\mu$ , 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

$$q_k = \frac{Q \cdot D_k}{1000} \quad (7.13)$$

Тут  $Q$  – загальна кількість води, що додають до системи:

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

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

### Практичне заняття № 8

#### ОБРОБКА ВОДИ В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ.

#### МЕТОДИ ФОСФАТУВАННЯ ТА РЕКАРБОНІЗАЦІЇ

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

Фосфатування застосовують у випадку, якщо лужність свіжої води, що додається до системи, не перевищує 3,5–4 мг-екв/л.

Доза технічного продукту (тринатрійфосфату або суперфосфату):

$$D_\phi = (3 + 0,2 \frac{E}{q_d}) \frac{100}{C}, \quad (8.1)$$

де  $E$  – об'єм води в системі, м<sup>3</sup>;

$q_d$  – кількість води, що додають до системи, 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

$$G_\phi = \frac{D_\phi \cdot q_{доб}}{1000} \quad (8.2)$$

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

Необхідну ємкість баку для приготування робочого розчину фосфатів визначають за формулою

$$V_p = \frac{0,1 \cdot D \cdot q \cdot T}{1\,000 \cdot b}, \text{ м}^3, \quad (8.3)$$

де  $b$  – міцність розчину, %;

$T$  – тривалість роботи приготовленим розчином, год

Витрата фосфату, г/м<sup>3</sup>:

$$Q = \left( d_{\phi} + \frac{5W}{24q_{\phi}} \right) \frac{100}{C_{\phi}}, \quad (8.4)$$

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

### *Метод рекарбонізації*

Метод рекарбонізації оборотної води димовими газами або вуглекислою застосовують для обмеженого діапазону величини лужності і коефіцієнта випаровування. На практиці метод рекарбонізації застосовують при лужності підживлювальної води до 3–3,5 мг-екв/л і коефіцієнтах випаровування, що не перевищують 1,5.

Доза вуглекислоти, мг/л, у перерахунку на витрату оборотної води:

$$D_{CO_2} = \frac{L_D^2}{N} \left( \frac{P}{P - P_1} \right)^2 - \frac{100 - P}{100} (CO_2)_{охл} - \frac{P}{100} (CO_2)_D \quad (8.5)$$

або

$$D_{CO_2} = \frac{(L_D \cdot K_{вин})^2}{N^2} - \frac{100 - P}{100} (CO_2)_{охл} - \frac{P}{100} (CO_2)_D;$$

$$N = \frac{\psi}{\sqrt{K_{вин} \cdot Ca_D}},$$

де  $\psi$  – величина, що залежить від загального солевмісту оборотної  $S_{об}$  і температури охолодженої води  $t_2$ .

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Чинний від 01–01–2014. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 214 с.
3. Водне господарство промислових підприємств : навч. посіб. / Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 280 с.
4. Тугай А. М. Водопостачання : підручник / А. М. Тугай, Орлов В. О. – Київ : Знання, 2009. – 735 с.
5. Орлов В. О. Водопостачання промислових підприємств : навч. посіб. / В. О. Орлов, Л. Л. Литвиненко, А. М. Орлова. – Київ : Знання, 2014. – 278 с.
6. Орлов В. О. Водопідготовка : навч. посіб. / В. О. Орлов, А. М. Зошук. – Рівне : НУВГП, 2004. – 215 с.

## ДОДАТОК А

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

Температура повітря за сухим термометром, °С	0	10	20	30	40
$K_{вин}$	0,001	0,001 2	0,001 4	0,001 5	0,001 6

Таблиця А.2 – Значення коефіцієнта К для вентиляторних градирень краплинним зрошувачем або зрошувачем бризкального типу

Напір води перед соплом, м	Температура повітря за вологим термометром, $\tau$ °С							
	15	16	17	18	19	20	21	22
$\Delta t = 5$ °С								
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
$\Delta t = 10$ °С								
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
$\Delta t = 15$ °С								
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
$\Delta t = 20$ °С								
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 А.3 – Параметри атмосферного повітря м. Харкова

Пункти спостереження	Забезпеченість параметрів атмосферного повітря, %								
	1			5			10		
	$\theta$	$\varphi$	$\tau$	$\theta$	$\varphi$	$\tau$	$\theta$	$\varphi$	$\tau$
Харків	28,5	38	19,2	26,4	45	18,8	24,9	52	18,6

Таблиця А.4 – Втрати води з краплинним винесенням вітром у процесі охолодження

Тип охолоджувальних 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

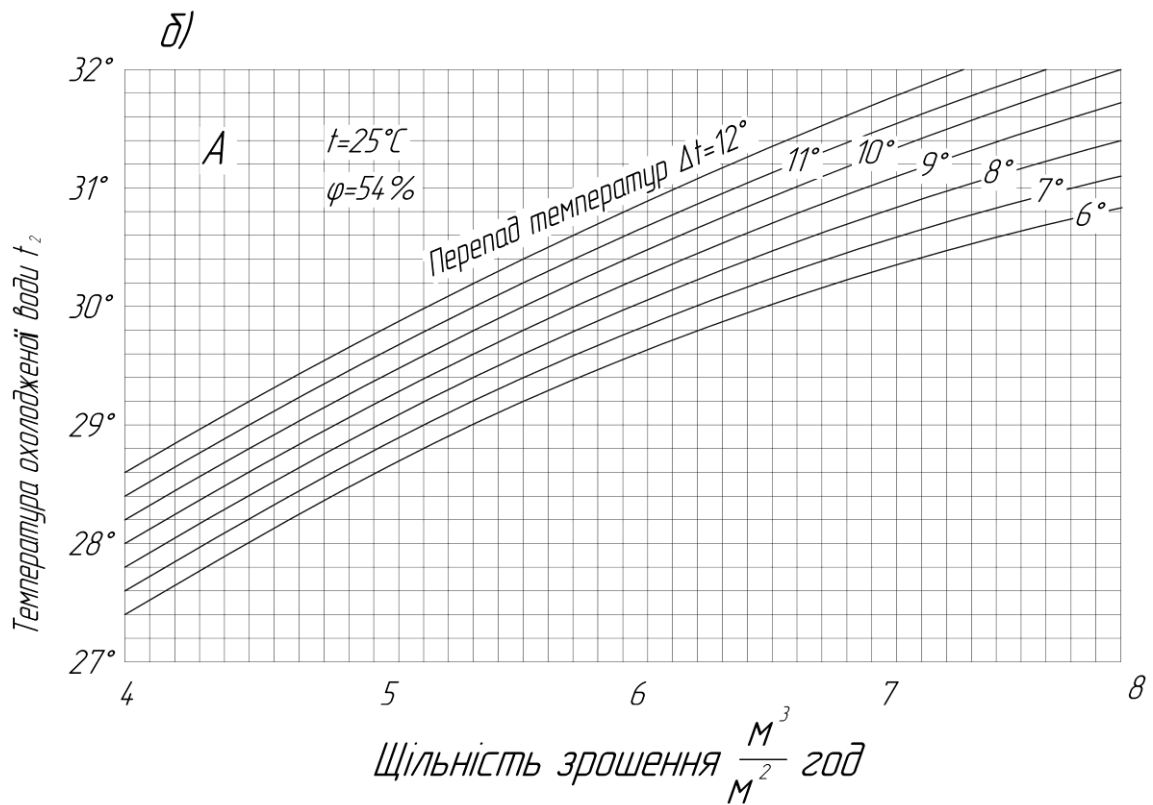
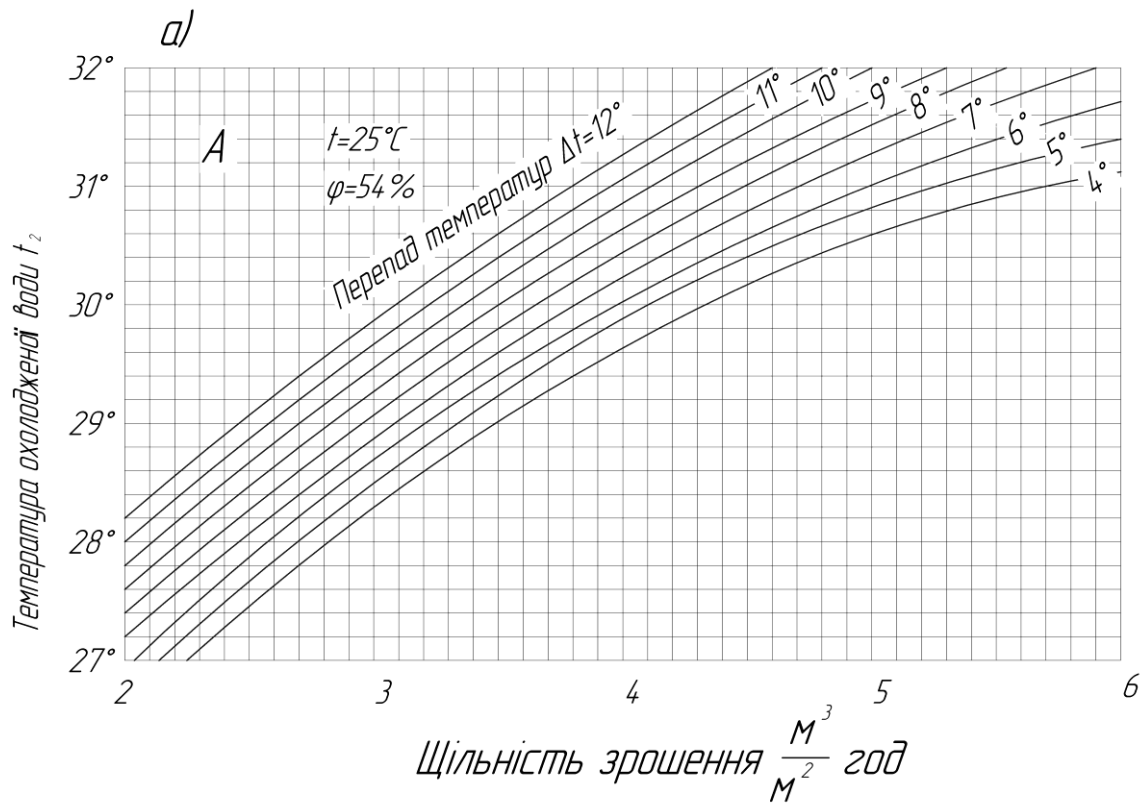


Рисунок А.1 – Номограма для розрахунку баштових градирень:  
а – краплинні градирні; б – плівкові градирні

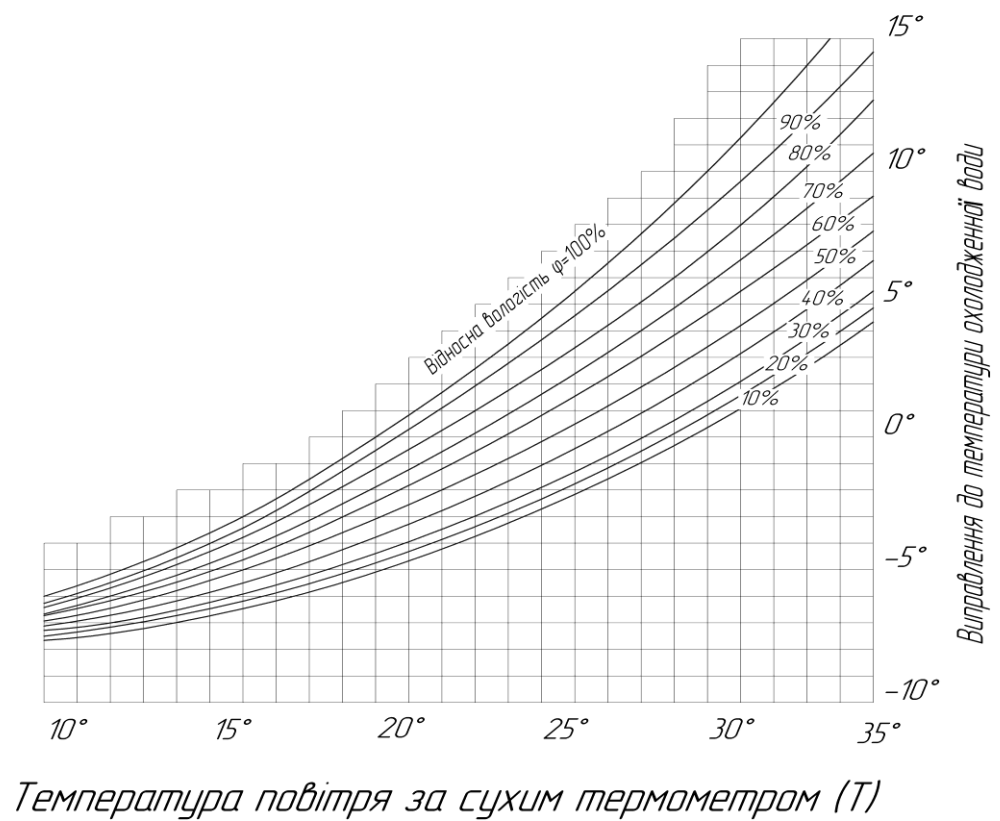
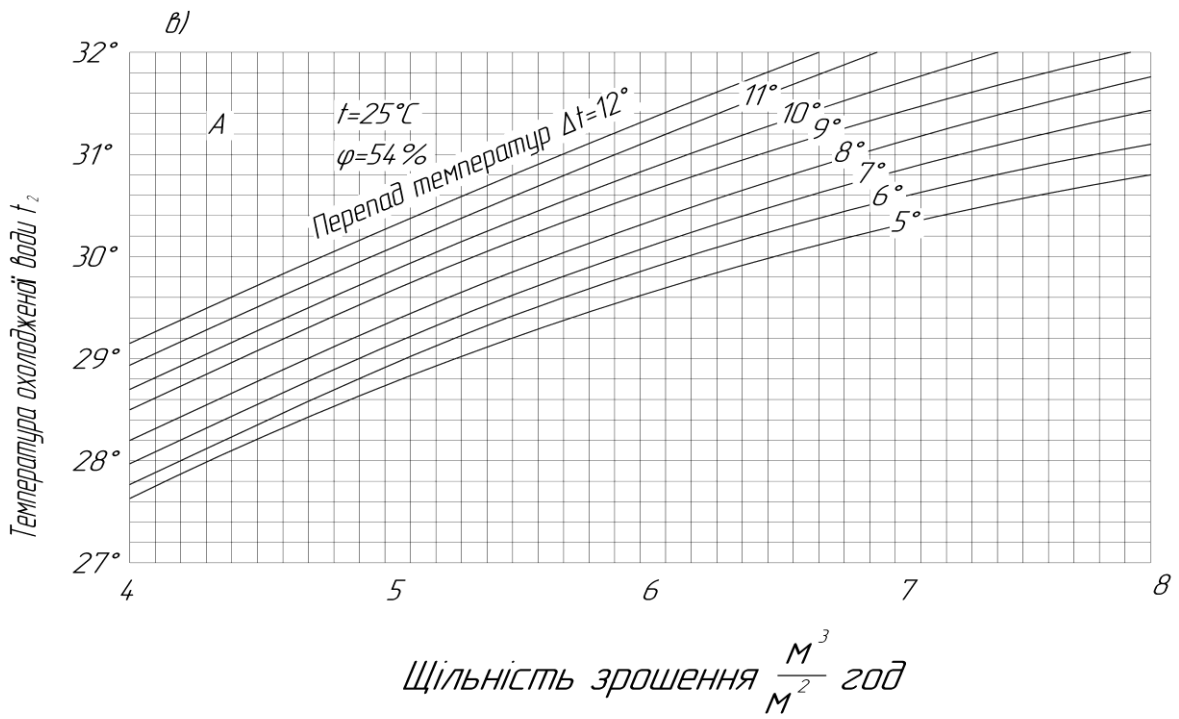


Рисунок А.2 – Номограма для розрахунку баштових градирень:  
в – краплинно-плівкові градирні

Таблиця А.5 – 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 проєкту
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	1 290	901-6-48
192	12 × 16	бризкальний	2,00	2ВГ-70	1 425	901-6-62
192	12 × 16	краплинний	3,67	2ВГ-70	1 130	901-6-61
192	12 × 16	краплинний	3,80	2ВГ-70	1 240	901-6-43
		бризкальний	3,60		1 400	



## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Технічні характеристики радіальних відстійників із вбудованою камерою флокуляції

Показники	Значення
Навантаження	до 4 м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·год
Вміст завислих речовин у проясненій воді: – при очищенні стічних вод газоочисток доменних печей; – при очищенні стічних вод газоочисток конвертерів. При очищенні стічних вод прокатних станів: – вміст завислих речовин; – масел.	до 150 мг/л до 300 мг/л  50–100 мг/л 20– 30 мг/л
Потужність електроприводу	7,5 кВт
Діаметр	30 м

Таблиця Б.2 – Технічні характеристики флокуляторів

Діаметр	6–12 м
Продуктивність	600–1 000 м <sup>3</sup> /год – при очищенні стічних вод газоочисток; 300–350 м <sup>3</sup> /год – при очищенні стічних вод МБЛЗ та сортопрокатних станів
Вміст завислих речовин	до 150 мг/л – при очищенні стічних вод газоочисток доменних печей; до 300 мг/л – при очищенні стічних вод газоочисток конвертерів; 50–100 мг/л – при очищенні стічних вод сортопрокатних станів та МБЛЗ
Вміст масел	20–30 мг/л – при очищенні стічних вод прокатних станів

Таблиця Б.3 – Технічні характеристики тонкошарових флокуляторів

Вид стічних вод	Питоме навантаження, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> · год	Вміст завислих речовин у проясненій воді
Стічні води газоочисток конверторів (з обробкою флокулянтами)	до 12	до 300 мг/л
Стічні води газоочисток доменних печей (з реагентною обробкою)	до 12	до 150 мг/л

Таблиця Б.4 – Технічні характеристики напірних антрацито-кварцових фільтрів ДП УкрНТЦ «Енергосталь»

Показники	Значення
Швидкість фільтрування, м/год	до 50
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год: – фільтр d 3,0 м; – фільтр d 2,0 м	до 350 до 160
Робочий тиск, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	до 6 (0,6)
Фільтрувальне завантаження: кварцовий пісок і антрацит	
Концентрація забруднень, мг/дм <sup>3</sup> : 1) у вихідній воді: – твердих завислих речовин; – масел; 2) у фільтраті: – твердих завислих речовин; – масел	до 150 до 100  до 10 до 10
Габаритні розміри, м – діаметр; – висота	1,0–3,4 2,5–6,0

Таблиця Б.5 – Технічні характеристики відкритих (безнапірних) гідроциклонів

Види стічних вод	Діаметр апарата, м	Питоме гідравлічне навантаження, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ×год	Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	Вміст завислих речовин мг/л		Реагенти, що застосовуються, і їх дози
				у вихідній воді	у проясненій воді	
Стічні води газоочисток мартенівських печей	6	8–10	240–300	3 000–5 000	150–300	вапно, флокулянт (ПАА) до 1 мг/л
Стічні води газоочисток електростале-плавильних печей	6	3,0–5,0	90–120	2 000–3 000	150–300	Вапно, флокулянт (ПАА) до 1 мг/л
Стічні води дрібносортих прокатних станів	6	2,5–4,0	75–120	100–200	50–80	Катіон-активні флокулянти

*Електронне навчальне видання*

Методичні рекомендації  
до практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«ПРОМИСЛОВА ВОДОПІДГОТОВКА»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти  
зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,  
освітня програма «Цивільна інженерія»)*

Укладачі: **АЙРАПЕТЯН** Тамара Степанівна,  
**ЛУКАШЕНКО** Сергій Вікторович

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*

Редактор *М. О. Гаман*

Комп'ютерне верстання *Є. Г. Панова*

План 2024, поз. 94М

---

Підп. до друку 30.09.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,5.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Черноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.