

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

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
до проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни  
**«ТЕХНОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ У**  
**ПРОМИСЛОВОСТІ»**

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

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

Методичні рекомендації до проведення практичних занять із навчальної дисципліни «Технологія ефективного водокористування у промисловості» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології, освітня програма «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Т. С. Айрапетян, С. В. Лукашенко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 62 с.

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

Рецензент

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

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

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Практичне заняття № 1 Розрахунок водоспоживання основних виробництв металургійного заводу.....	5
Практичне заняття № 2 Розрахунок втрат води у системі оборотного водопостачання.....	9
Практичне заняття № 3 Водний та матеріальний (сольовий) баланс систем водопостачання підприємств.....	12
Практичне заняття № 4 Попереднє очищення води.....	18
Практичне заняття № 5 Обробка води методом іонного обміну.....	22
Практичне заняття № 6 Розрахунок споруд локальної очистки відстійного типу та напірних фільтрів.....	25
Практичне заняття № 7 Охолодження оборотної води. Розрахунок охолоджувачів.....	31
Практичне заняття № 8 Обробка води у системах оборотного водопостачання. Метод підкислення.....	36
Практичне заняття № 9 Обробка води у системах оборотного водопостачання. Методи фосфатування та рекарбонізації.....	40
Практичне заняття № 10 Визначення розрахункових залежностей під час охолодження обладнання.....	42
Практичне заняття № 11 Залежність дози кислоти для стабілізаційної обробки оборотної води від її температури.....	46
Практичне заняття № 12 Залежність дози вуглекислоти для стабілізаційної обробки оборотної води рекарбонізацією від її температури .....	49
Список рекомендованої літератури.....	54
Додатки.....	55

## 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 і утилізацію відходів, що містяться в стічних водах [1–3]. Водночас очистка стічних вод розглядається як підготовка їх до повторного використання.

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

Предметом вивчення дисципліни «Технологія ефективного водокористування у промисловості» 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, що надає викладач, або за індивідуальними даними. В кінці кожного практичного заняття студент надає 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 до екології та раціонального використання води, застосовують оборотні, послідовні та замкнені схеми водопостачання металургійних підприємств.

Під час проєктування 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 у 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 скеровують до каналізаційних очисних споруд, 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 скеровують для охолодження і потім знову подають у виробництво. Водночас 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 водо- споживання	Коефіцієнт годинної нерівно- мірності	Втрати води у виробництві, %	Необхідний вільний напір для подання у 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 % $\frac{\quad}{\text{м}^3 / \text{год}}$				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								
Газоочистка доменного цеху («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								

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

$$Q_p = \frac{n_g \cdot N \cdot K_{год}}{T}, \quad (1.1)$$

де  $n_g$  – 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.

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

Розрахункову витрату оборотної води у системі газоочисток визначають за такою формулою:

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

де  $N_2$  – кількість газу, що виділяється під час виплавки 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> (під час роботи без допалювання СО) і від 1 200 м<sup>3</sup> до 1 600 м<sup>3</sup> (з допалюванням СО);
- електросталеплавильного – 1 500 м<sup>3</sup>.

## Практичне заняття № 2

### РОЗРАХУНОК ВТРАТ ВОДИ У СИСТЕМІ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

У відкритих системах оборотного водопостачання відбуваються втрати води за рахунок випаровування її частини в охолоджувачах й через краплинне винесення вітром. Розчинені солі води, що випарилися (повністю або частково) залишаються в оборотній воді, підвищуючи їхню 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 у градирнях обчислюються за такою формулою:

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

де  $K_{\text{вип}}$  – коефіцієнт, який враховує частку тепловіддачі випаровуванням у 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 у циклі водопостачання і підтримки постійного складу води у систему оборотного водопостачання постійно надходить деяка кількість свіжої води, обробленої у тому чи іншому ступені.

Крім цього, здійснюють продувку оборотних систем, що сприяє зменшенню загального солемісту і концентрації окремих іонів. 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 у систему  $P_d$ , %, дорівнює загальній сумі втрат води у системі та обчислюється за такою формулою:

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

де  $P_1$  і  $P_2$  – безповоротні втрати оборотної води під час охолодження 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:

$$K_y = \frac{P_{\text{вип}} + P_{\text{вин}} + P_{\text{скид}}}{P_{\text{вин}} + P_{\text{скид}}} = \frac{P_{\text{дод}}}{P_{\text{дод}} - P_{\text{вип}}}; \quad (2.3)$$

– за концентруванням солей:

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

Таблиця 2.1 – 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	$\frac{0,2}{20,3}$	$\frac{1,52}{153,43}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{1,72}{173,7}$	173,7	50	30	37
Газоочистка доменного цеха («брудний» цикл)	1,3 · 10 <sup>6</sup>	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

## ВОДНИЙ ТА МАТЕРІАЛЬНИЙ (СОЛЬОВИЙ) БАЛАНС СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ

Співвідношення величин втрат води під час її використання й охолодження (випаровування, краплинного винесення вітром, втрат у виробництві, з осадом, що видаляють з очисних споруд, втрат із продувкою системи) характеризує водний баланс оборотного циклу водопостачання.

Для будь-якої системи водопостачання необхідно дотримуватись балансу води, що надходить до системи, і втраченої в системі води:

$$\sum Q_{\text{НАДХ}} = \sum Q_{\text{ВТР}} \cdot \quad (3.1)$$

Споживачів води згруповують за районами їх розташування, напором, якістю води. Потім складають схему використання води, де вказують витрати води, що надходять до споживачів та відводяться від них.

Принципи складання водного балансу:

1. Кількість води у системі промислового водопостачання підтримують постійною. Втрати води у системі компенсують за рахунок додавання свіжої води.

2. Встановлюють джерела надходження і втрати води.

3. Визначають кількісні характеристики кожного джерела.

4. Аналізують якісні характеристики води джерел, їх можливий вплив на склад і властивості оборотної води, ефективність роботи системи водопостачання.

5. Визначають групи споживачів, що потребують воду однакової якості.

6. Для зменшення кількості свіжої води, що забирають з джерела, виявляють можливість послідовного використання відпрацьованої води однієї групи споживачів для водопостачання іншої.

Окрім водного балансу систем водопостачання надзвичайно важливе значення має підтримання балансу за якістю, термостабільністю, корозійністю оборотних вод.

*Поняття коефіцієнта концентрування солей або коефіцієнта випаровування. Визначення  $K_k$  на підставі водного балансу системи*

Під час використання та охолодження води у системах оборотного водопостачання частина її витрачається на випаровування, краплинне винесення, виробництво, втрачається з осадом, що видаляється з очисних споруд, зі скидом води із системи (продувкою).

Вважають, що розчинені солі води, які випарилися (повністю або частково) залишаються в оборотній воді і підвищують їхню концентрацію. Всі втрати води у системі оборотного водопостачання компенсуються додаванням свіжої води.

Ступінь підвищення концентрації розчинених у воді речовин називають коефіцієнтом концентрування солей або коефіцієнтом випаровування. Чисельне значення цього коефіцієнта може бути виражене за випаровуванням води за такою формулою:

$$K_k = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{P_2 + P_3 + P_4} = \frac{P_{\text{доо}}}{P_{\text{доо}} - P_1}, \quad (3.2)$$

де  $P_1$  – втрати води в результаті випаровування;

$P_2$  – втрати води на краплинне винесення під час охолодження води;

$P_3$  – продувка системи;

$P_4$  – втрати води з системи, що відбуваються з інших причин (втрати води зі зневодненим шламом, втрати води під час аварій, переливи в результаті порушення режиму водопостачання тощо).

Усі величини втрат визначаються у відсотках від витрати циркулюючої в системі води.

Рівняння (3.2) можна подати у такому спрощеному вигляді:

$$K_k = 1 + \frac{P_1}{P_2 + P_3 + P_4}. \quad (3.3)$$

Таким чином, у системах оборотного водопостачання величина  $K_k$  завжди більше одиниці, і ця величина є тим більшою, чим меншими є  $P_2, P_3, P_4$ .

Коефіцієнт випаровування добре розчинних солей характеризує ступінь замкненості системи оборотного водопостачання. На сьогодні у промисловості величина  $K_k$  зазвичай не перевищує 2–4. У деяких випадках, наприклад, у

хімічній промисловості, цей коефіцієнт досягає 8-ми. Якщо припустити, що продувки у системі немає, тобто  $P_3 = 0$ , тоді маємо:

$$K_k = 1 + \frac{P_1}{P_2} = 1 + \frac{1,5}{0,5} = 4.$$

#### *Визначення коефіцієнта концентрування через сольовий баланс системи*

Коефіцієнт концентрування добре розчинних солей необхідний для визначення концентрації добре розчинних солей в оборотній воді залежно від вмісту цих солей у підживлювальній (свіжій) воді.

$$C_{об} = K_k \cdot C_{дод} \quad (3.4)$$

$$K_k = \frac{C_{об}}{C_{дод}}, \quad (3.5)$$

де  $C_{об}$  – концентрація добре розчинних солей в оборотній воді;

$C_{дод}$  – концентрація добре розчинних солей у свіжій воді, що додають для підживлення системи.

Чим вище концентрація солей в оборотній воді, тим більш складною виявляється експлуатація цих систем у зв'язку із небезпечністю утворення щільних сольових відкладень карбонатного й сульфатного характеру, а також з небезпечністю інтенсифікації корозійних процесів.

Стабілізація сольового складу відбувається за умови, якщо кількість солей, що виводяться з системи за рахунок продувки та в результаті бризковинесення води з охолоджувача буде дорівнювати кількості солей, що надходять із підживлювальною водою.

Солі, що надходять у систему водопостачання поділяють на дві групи:

1. Солі, що добре розчиняються у воді та не випадають в осад за будь-яких умов роботи системи. Це хлориди калію, натрію, кальцію і магнію, сульфати.

2. Солі, що внаслідок недостатньої розчинності під час порушення вуглекислотної рівноваги випадають в осад.

Зазвичай для контролю у системах оборотного водопостачання використовують коефіцієнт концентрування хлоридного іона  $K_{Cl}$ , величину

якого порівнюють із коефіцієнтами концентрування карбонатної жорсткості кальцію або інших іонів.

Порівнюючи величини коефіцієнтів концентрування хлоридного іона, карбонатної жорсткості або інших речовин можна отримати уявлення про надходження нових речовин та випадіння їх в осад (відкладання), тобто про термостабільність води.

Рівняння водно-сольового балансу систем можна записати у такому вигляді:

$$\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{P_2 + P_3 + P_4} = \frac{C_{об}}{C_{доо}}. \quad (3.6)$$

Співвідношення (3.6) характеризує зв'язок водного і сольового балансів системи оборотного водопостачання.

Для систем водопостачання, в яких вода не входить у безпосередній контакт з охолоджуючим продуктом (парою, повітрям, нагрітим або розплавленим металом), рівняння водно-сольового балансу має такий вигляд:

$$C_{об}(P_2 + P_3) = C_{доо}(P_1 + P_2 + P_3) \quad (3.7)$$

$$C_{об} = C_{доо} \left[ 1 + \frac{P_1}{(P_2 + P_3)} \right]. \quad (3.8)$$

Якщо концентрацію солей жорсткості в циркуляційній воді обрати максимально допустимою, то з наведеного рівняння (3.8) можна визначити мінімально необхідну витрату продукції за такою формулою:

$$P_3 = \frac{C_{доо} \cdot P_1}{C_{об} - C_{доо}} - P_2, \quad (3.9)$$

де  $C_{доо}$  – концентрація солей жорсткості у воді, що додають до системи (підживлювальній воді), мг-екв/л;

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

$P_1, P_2$  і  $P_3$  – втрати води на випаровування, винесення і продукцію, м<sup>3</sup>/год;

Загальна витрата підживлювальної води:

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (3.10)$$

Однак рівняння (3.8) неприйнятне для балансових розрахунків щодо систем оборотного водопостачання, у яких вода контактує із продуктом, що охолоджується і очищується, наприклад, газоочисток металургійних агрегатів. Для цих випадків необхідно користуватися іншою залежністю, яка відрізняється від наведеної вище тим, що вона має ще один член; він враховує технологічний приріст концентрації того або іншого компонента:

$$C_{об} = C_{дод} \left[ 1 + \frac{P_1}{(P_2 + P_3)} \right] + \frac{Q \cdot \Delta C}{P_1 + P_3}, \quad (3.11)$$

де  $\Delta C$  – збільшення солемісту в оборотній воді внаслідок випаровування (приріст солей), наприклад у газоочистці,  $\Delta C = C_{об} - C_{дод}$ , мг/л;

$Q$  – загальна витрата води, що подається споживачеві, наприклад на газоочистку металургійного агрегату, м<sup>3</sup>/год.

У разі стабільності оборотної води (відсутності інкрустації поверхонь відкладаннями CaCO<sub>3</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub> або зміни складу води за рахунок продуктів корозії труб і теплообмінної апаратури) зберігається рівність коефіцієнтів випаровування, які визначаються за поступовим підвищенням у оборотній воді концентрацій різних іонів – хлоридів, сульфатів тощо.

$$K_y = \frac{[Cl^-]_{об}}{[Cl^-]_д} = \frac{[SO_4^{2-}]_{об}}{[SO_4^{2-}]_д} = \dots = \frac{C_{об}}{C_д} = \frac{C_д + \Delta C}{C_д} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} \quad (3.12)$$

де  $P_1, P_2, P_3$  – втрати води на випаровування, винесення крапель води повітрям і стабілізаційну витрату;

$C_{об}$  – солеміст оборотної води, мг/л;

$C_{дод}$  – солеміст підживлювальної води, мг/л;

$\Delta C = C_{об} - C_{дод}$  – збільшення солемісту оборотної води внаслідок випаровування;

$[Cl^-]_{об}, [SO_4^{2-}]_{об}$  – концентрація іонів в оборотній воді, мг/л;

$[Cl^-]_{дод}, [SO_4^{2-}]_{дод}$  – концентрація іонів у підживлювальній воді, мг/л.

#### *Водно-хімічний режим оборотних систем*

Режим роботи оборотних систем дуже відрізняється від прямоточних систем. Вода багаторазово підігрівається, охолоджується, випаровується, розбризкується та виноситься потоком повітря. До того ж вода змінює свій хімічний склад внаслідок випаровування і підживлення свіжою водою.

Основними параметрами водно-хімічного режиму оборотного циклу є продувка, додавання свіжої води у систему й коефіцієнт випаровування або коефіцієнт концентрування добре розчинних солей.

Продувка системи ефективна, якщо карбонатна жорсткість підживлювальної води значно нижче за карбонатну жорсткість води у системі. Інакше необхідна настільки велика кількість підживлювальної води, що додавання її буде просто неекономічним, тому вигідніше буде застосовувати хімічну обробку води.

Головна вимога до водно-хімічного режиму систем оборотного водопостачання полягає в тому, що у системі не повинно бути карбонатних відкладень і корозії устаткування та трубопроводів.

У системах водяного охолодження теплонавантажених елементів утворюються переважно відкладення карбонату кальцію із втратою вільної вуглекислоти через нагрівання води. Водночас відбувається розкладання бікарбонатних іонів  $\text{HCO}_3^-$  з утворенням карбонатних  $\text{CO}_3^{2-}$ , які реагують з іонами  $\text{Ca}^{2+}$  і створюють малорозчинні сполуки  $\text{CaCO}_3$ , що осаджуються на стінках трубопроводів і обчислюються за такою формулою:



Якщо такого розкладання у системі немає, тоді використовуємо співвідношення:

$$L_{\text{об}} = K_{\text{К}} \cdot L_{\text{дод}}, \quad (3.13)$$

де  $L_{\text{об}}$ ,  $L_{\text{дод}}$  – лужність відповідно оборотної і підживлювальної води, мг-екв/л.

У разі співвідношення  $L_{\text{об}} > K_{\text{К}} \cdot L_{\text{дод}}$  до системи додаються або надходять лужні речовини. Співвідношення  $L_{\text{об}} < K_{\text{К}} \cdot L_{\text{дод}}$  свідчить про те, що у системі відбувається розпад  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  і утворення відкладень у такій кількості:

$$\Delta L = K_{\text{К}} \cdot L_{\text{дод}} - L_{\text{об}}. \quad (3.14)$$

## Практичне заняття № 4

### ПОПЕРЕДНЄ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

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

Для задоволення різноманітних вимог до якості води, споживаної під час вироблення електричної і теплової енергії, виникає необхідність її спеціальної фізико-хімічної обробки. Методи обробки води й можливість використання її у системах оборотного водопостачання залежать насамперед від вимог, які висуваються до якості води, яка використовується у цих системах.

Під час проектування споруд для пом'якшення води мають бути вирішені такі завдання:

1. Вибір методу пом'якшення та складу споруд.
2. Розрахунок споруд із 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 у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – 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 за показник 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

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
4. Двоступеневе Na-катіонування	Каламутність до 5–8 мг/л, забарвленість до 30 град.	0,01	не змінюється
5. Паралельне H-катіонування, видалення CO <sub>2</sub>	Каламутність до 5–8 мг/л, забарвленість до 30 град., сумарний вміст хлоридів та сульфатів до 4 мг-екв/л, натрію до 2 мг-екв/л.	0,1	0,4
6. Послідовне H-Na-катіонування	Каламутність до 5–8 мг/л, забарвленість до 30 град.	0,01	0,7
7. H-катіонування з «голодною» регенерацією, буферні катіонітові фільтри, видалення CO <sub>2</sub>	Каламутність до 5–8 мг/л, забарвленість до 30 град.	на 0,7–1,5 мг-екв/л більше за показник некарбонатної 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 здебільшого залізного купоросу  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ .

#### **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 із 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 під час реагентного пом'якшення води, застосовують освітлювачі із завислим осадом спеціальної конструкції із подальшим фільтруванням через одно- або двошарове завантаження із 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.

Якщо  $\frac{Ca^{2+}}{20} > Ж_{\text{карб}}$ , а вміст магнію у вихідній воді не більше за 15 мг/л і

перманганатна окисність не більше за 10 мг  $O_2$ /л, для пом'якшення води застосовують **вихрові реактори**. Остаточне освітлення води після вихрових реакторів здійснюють на фільтрах.

Якщо  $\frac{Ca^{2+}}{20} < Ж_{\text{карб}}$ , декарбонізацію води здійснюють в **освітлювачах** із

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 іонів  $Ca^{2+}$  і карбонатної жорсткості (табл. 4.2)

Таблиця 4.2 – Дози реагентів

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

У таблиці 4.2 подано такі позначення:

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

$(CO_2)$ ,  $(Ca^{2+})$ ,  $(Mg^{2+})$  – концентрації у воді вільної вуглекислоти, іонів 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);

Для зменшення некарбонатної жорсткості поряд із карбонатною застосовують вапняно-содовий метод пом'якшення води. Дози вапна і соди у цьому випадку визначають за співвідношеннями, наведеними у таблиці 4.2.

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

Дозу коагулянту для уточнення визначають за такою формулою:

$$D_k = 3\sqrt[3]{C}, \quad (4.1)$$

де  $C$  – кількість завислих речовин, що утворюються під час реагентного пом'якшення води (у перерахунку на суху речовину), мг/л;

$$C = M_{вих} + 50 \left( \frac{(CO_2)}{22} + 2J_k \right) + 29 \frac{(Mg^{2+})}{12} + D_e \left( \frac{100 - m}{100} \right), \quad (4.2)$$

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

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

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

$$G_B = \frac{Q \cdot D_B}{P_B \cdot 10^4} \quad (4.3)$$

$$G_C = \frac{Q \cdot D_C}{P_C \cdot 10^4} \quad (4.4)$$

$$G_{коаг} = \frac{Q \cdot D_k}{P_k \cdot 10^4} \quad (4.5)$$

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

$P_B$  – 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 такою формулою:

$$W = \frac{q \cdot n \cdot D_B}{10000 \cdot b_B \cdot \gamma_B}, \quad (4.6)$$

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 № 5**

### **ОБРОБКА ВОДИ МЕТОДОМ ІОННОГО ОБМІНУ**

#### **Катіонітне пом’якшення води**

Вибір методу катіонування визначається в кожному конкретному випадку хімічним складом води, умовами роботи системи й техніко-економічним порівнянням варіантів. Під час пом’якшення 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 такій послідовності: вибір схеми підготовки води, вибір марки катіоніту, визначення питомої витрати реагенту на регенерацію, робочої обмінної ємності, 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 обирають 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  $q_{\text{кор.}}$ , 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 пом’якшеної води  $J_{\text{зм.}}$ , мг-екв/л.

Під час визначення загального об’єму фільтруючого матеріалу обирають:

- марку катіоніту – сульфовугілля КУ-2;

– кількість регенерацій за добу  $n_p = 1 - 3$ ;

– питому витрату солі на регенерацію  $q_c = 150 - 200$  г/г-екв.

*Робоча обмінна ємність катіоніту*, г-екв/м<sup>3</sup> обчислюється за такою формулою:

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

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

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

$\beta_{Na}$  – коефіцієнт, що враховує зменшення обмінної ємності 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 ємність катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>, визначається за паспортними даними, а за їх відсутності - для сульфовугілля крупністю 0,5–1,1 мм обирають 500–550 г-екв/м<sup>3</sup>, для катіоніту КУ-2 крупністю 0,8–1,2 мм обирають 1 500–1 700 г-екв/м<sup>3</sup>;

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

Коефіцієнти  $\alpha_{Na}$  та  $\beta_{Na}$  обирають 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 такою формулою:

$$W_{\kappa} = \frac{24 \cdot Q_{кат.ф.1} \cdot J_0^{вих}}{n_p \cdot E_{роб}^{кат}}, \text{ м}^3, \quad (5.2)$$

де  $Q_{кат.ф.1}$  – 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 ємність катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>;

$n_p$  – кількість регенерацій кожного фільтра за добу, обирають від 1 до 3.

Загальна площа фільтрів I ступеня:

$$F_{кат.ф.1} = \frac{W_{\kappa}}{H_{\kappa}}, \text{ м}^2 \quad (5.3)$$

де  $H_{\kappa}$  – висота шару катіоніту, обирають 2–2,5 м (більшу висоту завантаження обирають із жорсткістю, більшою 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 зменшити жорсткість води до 0,01 мг-екв/л. Застосування такої схеми доцільне у разі жорсткості вихідної води, більшої за 10 мг-екв/л. Під час розрахунку фільтрів II ступеня жорсткість вихідної води обирають 0,1 мг-екв/л.

Під час двоступеневого Na-катіонування вода, що пом'якшується, проходить послідовно через Na-катіонітові фільтри I, а потім II ступеня. На

фільтрах I ступеня жорсткість вихідної води зменшується на 70–90 %. Ці фільтри регенерують зі зменшеною витратою солі (125–150 г/г-екв поглинених катіонів), а фільтри II ступеня – із підвищеною (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.

Під час розрахунку *Na*-катіонітових фільтрів II ступеня:

1. Загальна жорсткість вихідної води дорівнює жорсткості води після I ступеня.
2. Висоту шару катіоніту обирають 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 обирають 120–150 г/г-екв поглинених катіонітів, для регенерації фільтрів I ступеня – 300–400 г/г-екв.
6. Концентрація регенераційного розчину 8–12 %.
7. Робоча ємність 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**

## **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, м<sup>2</sup>, обирають залежно від питомого гідравлічного навантаження і обчислюють за такою формулою:

$$F = \frac{Q}{q_{уд}}. \quad (6.1)$$

Довжина відстійника обчислюється за такою формулою:

$$L = V_{cp} \cdot t, \quad (6.2)$$

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

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

$$t = \frac{H}{U_0}, \quad (6.3)$$

де  $H$  – глибина проточної частини відстійника, обирають 1,5–4 м (із відношенням довжини до глибини відстійника 8–20);

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

Ширина відстійника, м:

$$B = \frac{Q}{V_{cp} \cdot H}. \quad (6.4)$$

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

#### *Радіальні відстійники*

Найбільшого розповсюдження під час очищення стічних вод металургійних виробництв набули відстійники діаметром 30 м із 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), активовану кремнекислоту тощо.

Під час визначення площі зони осадження у цих відстійниках не враховується площа камери флокуляції.

Площа зони осадження радіальних відстійників, м<sup>2</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$F = \frac{Q}{q_{y\delta}}. \quad (6.5)$$

Площа зони осадження одного відстійника, м<sup>2</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$F_1 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (6.6)$$

де  $D$  – діаметр відстійника, 30 м;

$d$  – діаметр камери флокуляції, 10 м.

Кількість відстійників обчислюється за такою формулою:

$$n = \frac{F}{F_1}. \quad (6.7)$$

### *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.

У чорній металургії найчастіше використовуються 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 такою формулою:

$$q = 3,6 \cdot U_0, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}, \quad (6.8)$$

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

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

Ефект роботи гідроциклона значно збільшується у разі використання коагулянтів. Наприклад, щодо стічних вод газоочисток мартенівських печей і конверторів для досягнення 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 із застосуванням коагулянтів – 10–12 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год.

Площа одного гідроциклона, м<sup>2</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (6.9)$$

Продуктивність одного апарату, м<sup>3</sup>/год, обчислюється за такою формулою:

$$Q_1 = q \cdot F. \quad (6.10)$$

Кількість споруд у штуках обчислюється за такою формулою:

$$n = \frac{Q}{Q_1}. \quad (6.11)$$

*Флокулятор* – апарат, у якому поєднуються конструктивні елементи відкритого гідроциклону та радіального відстійника. Діаметр флокулятора і висота 12 м. Під час очищення стічних вод газоочисток питоме гідравлічне навантаження на апарат становить 7–8 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год, концентрація суспензії в очищеній воді – до 100 мг/л із концентрацією 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 із максимальним ступенем заповнення поперечного перерізу апарата пластинчастими тонкошаровими модулями.

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

Порядок розрахунку флокуляторів такий:

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

$$Q_1 = q_{нит} \cdot S_\phi, \quad (6.12)$$

де  $q_{нит}$  – питоме гідравлічне навантаження на один апарат, м<sup>3</sup>/год;

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

2. Визначають кількість апаратів у штуках за такою формулою:

$$n = \frac{Q}{Q_1}, \quad (6.13)$$

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

3. Об'єм камери флокуляції, м<sup>3</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$W_k = \frac{\pi}{4} (D_\phi^2 - D_k^2) \cdot H, \quad (6.14)$$

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

$D_k$  – діаметр камери, м ( $D_k = 10,6$  м);

$H$  – висота флокулятора, м ( $H = 10$  м).

Об'єм зони відстоювання, м<sup>3</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$W_{\text{відст}} = \frac{\pi \cdot D_{\kappa}^2}{4} \cdot H. \quad (6.15)$$

Для підведення води до апарата 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 такою залежністю, м<sup>2</sup>:

$$F_{\phi} = \frac{\alpha \cdot Q}{V_{\phi}}, \quad (6.16)$$

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

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

$V_{\phi}$  – швидкість фільтрування за нормального режиму роботи, м/год.

Витрата води на промивку фільтра, м<sup>3</sup>/год, обчислюється за такою формулою:

$$q_{\phi} = \frac{F_{\phi} \cdot q_{np} \cdot t \cdot n}{24}, \quad (6.17)$$

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;

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

**Практичне заняття № 7**  
**ОХОЛОДЖЕННЯ ОБОРОТНОЇ ВОДИ. РОЗРАХУНОК**  
**ОХОЛОДЖУВАЧІВ**

*Вибір типу охолоджувача*

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

Рекомендована сфера застосування різних типів охолоджувачів води (табл. 7.1) 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 зволуженим 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 проміжків між елементами. Плівкові зрошувачі застосовують у разі концентрації нафтопродуктів менше за 25 мг/л і завислих речовин до 50 мг/л. Якщо загальна концентрація в оборотній воді жирів і нафтопродуктів становить 25–125 мг/л, застосовують краплинні або краплинно-плівкові зрошувачі, а якщо концентрація цих речовин більша за 120 мг/л – бризкальні.

Таблиця 7.1 – 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 вологим 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 у таблиці надано для води, що надходить на охолоджувач із температурою < 40 °С.

Орієнтовне гідравлічне навантаження (відношення витрати охолоджуваної води до площі градирні у плані), м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год), обирають зі зрошувачем: плівкового типу – 8–12; краплинного типу – 6–10; бризкального типу – 5–6.

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

#### *Розрахунок баштових градирень*

Розрахунок баштових градирень складається із 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 із використанням ЕОМ. Для спрощення теплового розрахунку баштових градирень використовують емпіричні графіки (дод. А).

Під час використання баштових градирень для охолодження води розрахунок ведуть у такий спосіб. За графіком А у разі заданої щільності зрошення (гідравлічному навантаженні) і перепаду температур  $\Delta t$ , визначають температуру охолодженої води  $t_2$  за стандартних умов: за температури повітря  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , відносної 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 %.

Під час реконструкції баштових градирень із заміною зрошувача, модернізацією водорозподільної системи, встановленням водоуловлювача до графіка охолодження води потрібно вводити коригувальні коефіцієнти, що можна здійснити під час натурних випробувань 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 (із визначенням коефіцієнтів опору зрошувача, коефіцієнтів масовіддачі, сили тяжіння, теплових розрахунків тощо) для визначення температури охолодженої води та швидкості повітря у баштовій градирні.

#### *Розрахунок вентиляторних градирень*

Аеродинамічний розрахунок вентиляторних градирень полягає насамперед у визначенні аеродинамічного опору градирні залежно від витрати повітря, що подається до неї. 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 належний вентилятор і визначають параметри роботи, напір, продуктивність, коефіцієнт корисної дії.

Подальший розрахунок здійснюється із врахуванням обраної середньої швидкості руху повітря у зрошувачі.

Вихідні дані для розрахунку вентиляторних градирень:

1) гідравлічне навантаження  $q_{\text{макс}}$ , м<sup>3</sup>/год – максимальна годинна витрата води, що надходить до градирень;

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

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

Параметри атмосферного повітря змінюються як протягом доби, так і в межах року. Розрахунок градирень здійснюють для найменш сприятливого літнього періоду за середньодобовими температурами повітря за сухим і вологим термометрами за багаторічними спостереженнями із забезпеченістю 1–10 %. Значення параметрів атмосферного повітря (температур  $\theta$  і  $\tau$  і вологості  $\varphi$ ) для деяких міст наведені 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 зрошення вентиляторних градирень зі зрошувачем бризкального типу або краплинним зрошувачем визначають за такою формулою:

$$F_{op} = \frac{Q \cdot (t_1 - t_2) \sqrt{t_1 - t_2} \cdot 10^3}{K (V_6 \cdot \rho)^{0,625} \cdot (t_1 - \tau)^{1,95}}, \quad (7.1)$$

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 у градирні становить близько 2 м/с. Наприклад, у градирнях площею 16 м<sup>2</sup> ця швидкість становить 2,21 м/с; площею 64 м<sup>2</sup> – 2,17 м/с; площею 144 м<sup>2</sup> – 2,12 м/с; площею 192 м<sup>2</sup> – 1,9 м/с; площею 400 м<sup>2</sup> – 1,86 м/с; площею 380 м<sup>2</sup> – 1,97 м/с; площею 1 200 м<sup>2</sup> – 2,3 м/с.

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

Вказану формулу можна використовувати у разі ширини зони охолодження  $t_1 - t_2 = 3$ – $20$  °С, висоти зони охолодження  $t_2 - \tau = 3$ – $4$  °С, температури повітря за вологим термометром  $\tau = 15$ – $22$  °С, відносної вологості  $\varphi = 30$ – $70$  %.

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

## Практичне заняття № 8

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

Як показує досвід експлуатації, під час роботи 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

$$L_d \cdot K_K \geq 3, \quad (8.1)$$

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

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

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

- безперервним додаванням у систему оборотного водопостачання води із меншою карбонатною жорсткістю у разі скидання частини відпрацьованої (оборотної) води із системи (продувки);
- підкисленням (обробка кислотою);
- фосфатуванням (додаванням в оборотну воду речовин, що гальмують процес кристалізації карбонату кальцію – поліфосфату натрію, триполіфосфату натрію  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ );
- кислотно-фосфатною обробкою;
- рекарбонізацією (компенсацією втрат рівноважної вуглекислоти у системі оборотного водопостачання шляхом додавання у воду вуглекислоти, наприклад, димових газів);
- пом'якшенням підживлювальної води вапном із проясненням, натрій-катіонуванням або Н-катіонуванням із 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 такою формулою:

$$P_3 = \frac{P_1 \cdot Ж_{ДОБ}^K}{Ж_{ГРАН}^K - Ж_{ДОБ}^K} - P_2, \quad (8.2)$$

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

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

#### Метод підкислення

Під час підкислення води дозу кислоти  $Д_к$ , мг/л із розрахунку на підживлювальну воду визначають за такою формулою [8]:

$$Д_к = e \left( Л_д - \frac{Л_{об}}{К_к} \right) \frac{100}{C_к}, \quad (8.3)$$

де  $C_к$  – вміст сірчаної або соляної кислоти у відсотках (для сірчаної кислоти  $C_к = 92\%$ );

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

Лужність оборотної води, мг-екв/л, обчислюється за такою формуло

$$Л_{об} = 0,1N \sqrt{4,84N^2 (P - P_1)^2 + (100 - P)(CO_2)_{охол} + P(CO_2)_д + 44PL_д} - 0,22N^2 (P - P_1) \quad (8.4)$$

де  $P = P_1 + P_2 + P_3$  – додавання води до системи, %.

$$N = \frac{\Psi}{\sqrt{K_к (Ca^{2+})_д}}, \quad (8.5)$$

де  $\Psi$  – коефіцієнт, що визначається залежно від загального солевмісту оборотної води та температури охолодженої води (табл. 8.1);

$(CO_2)_{охол}$  – концентрація вуглекислоти в оборотній воді після охолоджувача, мг/л, що визначається залежно від лужності підживлювальної води та коефіцієнта концентрування води у системі (табл. 8.1).

Загальний солевміст оборотної води обчислюється за такою формулою:

$$S_{об} = S_{доо} K_к. \quad (8.6)$$

Таблиця 8.1 – Концентрація  $(CO_2)_{\text{охол}}$  в оборотній воді, охолодженій у градирнях

Лужність підживлювальної води, $L_d$ , мг-екв/л	Концентрація $(CO_2)_{\text{охол}}$ , мг/л, із коефіцієнтом 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

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:

$$f^2 \cdot C_{Ca} \cdot C'_{SO_4} \cdot K_y^2 \leq PP_{CaSO_4}, \quad (8.7)$$

де  $f$  – коефіцієнт активності двовалентних іонів (табл. 8.3), що визначається залежно від іонної сили розчину оборотної води.

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

$$\mu = \frac{K_y}{2} [(C'_{Cl^-} + C_{HCO_3^-} + C_{Na^+}) + 4(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}} + C'_{SO_4^{2-}})], \quad (8.8)$$

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

$C'_{Cl^-}$ ,  $C'_{SO_4^{2-}}$  – концентрації хлоридних і сульфатних іонів у підкисленій воді, г-іон/л.

У разі підкислення сірчаною кислотою

$$C'_{SO_4} = C_{SO_4 \text{ дод}} + \frac{D_k \cdot C_k}{98 \ 000 \cdot 100}, \quad (8.9)$$

$$C'_{Cl} = C_{Cl \text{ доб.}} \quad (8.10)$$

У разі підкисленні соляною кислотою

$$C'_{SO_4} = C_{SO_4 \text{ дод}}, \quad (8.11)$$

$$C'_{Cl} = C_{Cl \text{ дод}} + \frac{D_k \cdot C_k}{36 \ 500 \cdot 100}. \quad (8.12)$$

Таблиця 8.2 – Визначення коефіцієнта  $\Psi$  залежно від загального солемісту оборотної води та температури охолодженої води

Температура охолодженої води, $t_2$ °C	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

Добуток розчинності сульфату кальцію за температури 25–60 °С, обирають  $2,4 \cdot 10^{-5}$ .

Таблиця 8.3 – Коефіцієнт активності двовалентних 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 такою формулою:

$$q_k = \frac{Q \cdot D_k}{1000}, \quad (8.13)$$

де  $Q$  – загальна кількість води, що додається 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 № 9

#### ОБРОБКА ВОДИ У СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ. МЕТОДИ ФОСФАТУВАННЯ ТА РЕКАРБОНІЗАЦІЇ

Як реагенти під час фосфатування 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) обчислюється за такою формулою:

$$D_\phi = \left(3 + 0,2 \frac{E}{q_d}\right) \frac{100}{C}, \quad (9.1)$$

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

$q_d$  – кількість води, що додається 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 такою формулою:

$$G_{\phi} = \frac{D_{\phi} \cdot q_{\text{доб}}}{1\,000}, \quad (9.2)$$

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

Необхідну ємність баку для приготування робочого розчину фосфатів визначають за такою формулою:

$$V_p = \frac{0,1 \cdot D \cdot q \cdot T}{1\,000 \cdot b}, \text{ м}^3, \quad (9.3)$$

де  $b$  – міцність розчину, %;

$T$  – тривалість роботи приготовленим розчином, год.

Витрата фосфату, г/м<sup>3</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$Q = (d_{\phi} + \frac{5W}{24q_{\phi}}) \frac{100}{C_{\phi}}, \quad (9.4)$$

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 вуглекислотою застосовують для обмеженого діапазону величини лужності і коефіцієнта випаровування. На практиці метод рекарбонізації застосовують у разі лужності підживлювальної води до 3–3,5 мг-екв/л і коефіцієнтів випаровування, що не перевищують 1,5.

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

$$D_{CO_2} = \frac{L_D^2}{N} \left( \frac{P}{P - P_1} \right)^2 - \frac{100 - P}{100} (CO_2)_{\text{охл}} - \frac{P}{100} (CO_2)_D \quad (9.5)$$

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

$$N = \frac{\Psi}{\sqrt{K_{\text{вип}} \cdot Ca_D}},$$

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

## Практичне заняття № 10

### ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПІД ЧАС ОХОЛОДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ

Побудувати графіки залежності витрати оборотної води, коефіцієнта використання свіжої води та коефіцієнта використання оборотної води від перепаду температур (ширини охолодження) охолоджувальної води (у діапазоні від 5 °С до 20 °С), якщо відомі (див. табл. 10.1):

– кількість тепла, яку необхідно відводити від обладнання для його нормального функціонування,  $Q_t$ , МДж/с;

– витрати на краплевинесення у відсотках від витрати оборотної води,  $P_2$ ;

– частина тепла, яке відводиться від охолоджуючої води випаровуванням,  $Q_{t \text{ вип}}/Q_t$ ;

– співвідношення між концентрацією солей жорсткості у підживлювальній воді та допустимою концентрацією цих солей у оборотній воді,  $C_{\text{під}}/C_{\text{доп. об.}}$ .

Таблиця 10.1 – Вихідні дані для побудови розрахункових залежностей під час охолодження обладнання

Варіант	$Q_t$ , МДж/с	$P_2$ , %	$Q_{t \text{ вип}}/Q_t$	$C_{\text{під}}/C_{\text{доп. об.}}$
0	500	0,2	0,6	0,50
1	450	0,12	0,58	0,60
2	550	0,15	0,55	0,70
3	525	0,10	0,52	0,75
4	475	0,11	0,57	0,55
5	575	0,13	0,54	0,65
6	625	0,14	0,51	0,80
7	600	0,16	0,56	0,50
8	650	0,17	0,53	0,60
9	700	0,18	0,59	0,70

### Приклад розрахунку

Кількість теплоти за 1 с, що відводиться від обладнання охолоджувальною водою дорівнює

$$Q_t = c \cdot \Delta t \cdot \rho \cdot Q_{об}, \quad (10.1)$$

де  $c$  – питома теплоємність води,  $c = 4,18$  кДж/(кг·°С);

$\Delta t$  – перепад температур (ширина охолодження) охолоджувальної води, °С;

$\rho$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_{об}$  – витрата оборотної води, м<sup>3</sup>/с.

Витрата оборотної води дорівнює

$$Q_{об} = \frac{Q_t}{c \rho \Delta t}, \quad (10.2)$$

$$Q_{об} = \frac{500 \cdot 10^6}{4,18 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 5} = 23,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Коефіцієнт використання свіжої води дорівнює

$$K_{вик} = \frac{Q_{дж} - Q_{ск}}{Q_{дж}}, \quad (10.3)$$

де  $Q_{дж}$  – кількість підживлювальної води, що забирається з джерела, для компенсації втрат оборотної води;

$Q_{ск}$  – кількість води, що скидається у водоймище, дорівнює витраті води на продувку  $Q_{прод}$ ;

Підживлювальна вода необхідна для компенсації втрат на випаровування  $Q_{вип.}$ , краплевинесення  $Q_{кр.в.}$  та на продувку  $Q_{прод}$ .

$$Q_{дж} = Q_{вип.} + Q_{кр.в.} + Q_{прод}, \text{ або}$$

$$Q_{дж} = (P_1 + P_2 + P_3) Q_{об}/100, \quad (10.4)$$

де  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  – витрати, відповідно, на випаровування, краплевинесення та продувку у відсотках від  $Q_{об}$ .

Під час випаровування частини оборотної води  $Q_{вип}$  у атмосферу відводиться частина тепла  $Q_{т\text{ вип}}$ , яку оборотна вода отримала під час охолодження обладнання

$$Q_{т\text{ вип}} = \lambda \cdot \rho \cdot Q_{вип}, \quad (10.5)$$

$\lambda$  – питома теплота пароутворення,  $\lambda = 2300$  кДж/кг;

Витрата води, що випаровується, дорівнює

$$Q_{\text{вип}} = \frac{Q_{\text{т вип}}}{\lambda \rho} \quad (10.6)$$

З урахуванням коефіцієнту відведення тепла через випаровування розраховуємо витрату воду, що випаровується:

$$Q_{\text{вип}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 10^6}{2300 \cdot 10^3 \cdot 1000} = 0,13 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Знаходимо частину води, що випаровується:

$$P_1 = \frac{Q_{\text{вип}}}{Q_{\text{об}}} 100\% = \frac{0,13}{23,9} = 0,55 \text{ \%}.$$

Витрата води на продувку визначається за такими формулами:

$$P_3 = \frac{C_{\text{під}}}{C_{\text{об.доп}} - C_{\text{під}}} P_1 - P_2 \quad \text{або} \quad P_3 = \frac{1}{\frac{C_{\text{об.доп}}}{C_{\text{під}}} - 1} P_1 - P_2 \quad (10.5)$$

$$Q_{\text{прод}} = \frac{P_3 Q_{\text{об}}}{100} \quad (10.6)$$

$$P_3 = \frac{1}{(0,5)^{-1} - 1} 0,55 - 0,2 = 0,35\%$$

$$Q_{\text{прод}} = \frac{0,35 \cdot 23,9}{100} = 0,083 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Сумарна витрата підживлювальної води визначається за такою формулою:

$$Q_{\text{дж}} = (0,55 + 0,2 + 0,35) 23,9/100 = 0,261 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Коефіцієнт використання свіжої води визначається за такою формулою:

$$K_{\text{вик}} = \frac{0,261 - 0,083}{0,261} = 0,683.$$

Коефіцієнт використання оборотної води визначається за такою формулою:

$$K_{\text{об}} = \frac{Q_{\text{об}}}{Q_{\text{об}} + Q_{\text{дж}}} = \frac{23,9}{23,9 + 0,261} = 0,99.$$

Аналогічно проводимо розрахунки для значень  $\Delta t = 10$ ,  $\Delta t = 15$  та  $\Delta t = 20$  °C (див. табл.) та будуюмо графіки.

Таблиця 10.2 – Результати розрахунків витрати оборотної води, коефіцієнта використання свіжої води та коефіцієнта використання оборотної води за різного перепаду температур

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20
$Q_{\text{об}}, \text{M}^3/\text{c}$	<b>23,9</b>	<b>12,0</b>	<b>8,0</b>	<b>6,0</b>
$Q_{\text{вип}}, \text{M}^3/\text{c}$	0,130	0,130	0,130	0,130
$P_1, \%$	0,55	1,09	1,64	2,18
$P_3, \%$	0,35	0,89	1,44	1,98
$Q_{\text{пр}}, \text{M}^3/\text{c}$	0,083	0,107	0,114	0,118
$Q_{\text{дж}}, \text{M}^3/\text{c}$	0,261	0,261	0,261	0,261
$K_{\text{вик}}$	<b>0,683</b>	<b>0,592</b>	<b>0,561</b>	<b>0,546</b>
$K_{\text{об}}$	<b>0,99</b>	<b>0,979</b>	<b>0,968</b>	<b>0,958</b>

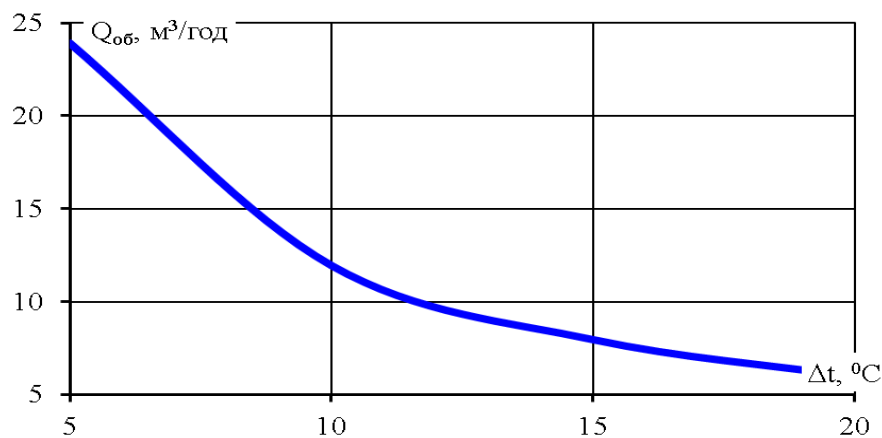


Рисунок 10.1 – Залежність  $Q_{\text{об}}$  ( $\Delta t$ )

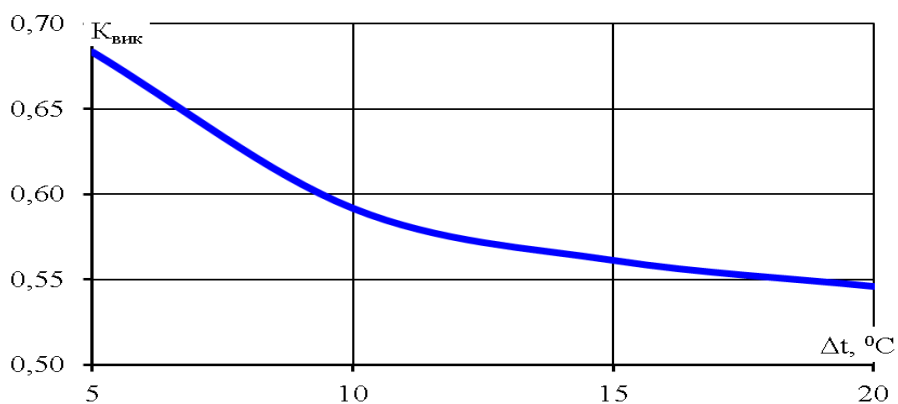


Рисунок 10.2 – Залежність  $K_{\text{вик}}$  ( $\Delta t$ )

**Практичне заняття № 11**  
**ЗАЛЕЖНІСТЬ ДОЗИ КИСЛОТИ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ**  
**ОБОРОТНОЇ ВОДИ ВІД ЇЇ ТЕМПЕРАТУРИ**

Побудувати графік залежності дози кислоти для стабілізаційної обробки оборотної води від її температури (в діапазоні від 15 °С до 30 °С із кроком 5 °С) після охолодження на градирні, якщо відомі (див. табл. 11.1):

- загальні втрати води Р;
- втрати води на випаровування Р<sub>1</sub>;
- вміст вуглекислоти у додатковій воді, (СО<sub>2</sub>)<sub>д</sub>;
- лужність додаткової води, Л<sub>д</sub>;
- вміст іонів кальцію у додатковій воді, Са<sub>д</sub>;
- загальний солевміст S;
- вид кислоти.

Таблиця 11.1 – Вихідні дані для розрахунку дози кислоти для стабілізаційної обробки оборотної води

Варіант	Р, %	Р <sub>1</sub> , %	(СО <sub>2</sub> ) <sub>д</sub> , мг/л	Л <sub>д</sub> , мг-екв/л	Са <sub>д</sub> , мг-екв/л	Солевміст S, мг/л	Кислота
0 (приклад)	1,0	0,5	5,0	4,0	3,0	700	сірчана
1	1,5	1,0	6,0	5,0	4,0	400	соляна
2	1,4	0,7	5,5	3,0	3,5	700	сірчана
3	1,5	0,9	6,5	5,0	3,0	1000	соляна

**Приклад розрахунку**

1. Дозу кислоти визначаємо за такою формулою:

$$D_k = e \left( L_d - \frac{L_{об}}{k_{к.с.}} \right) \frac{100}{C_k}, \quad (11.1)$$

де L<sub>об</sub>, L<sub>д</sub> – лужність, відповідно, оборотної та додаткової води, мг-екв/л;

k<sub>к.с.</sub> – коефіцієнт концентрування солей;

C<sub>к</sub> – вміст H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> або HCl у технічних кислотах, обираємо C<sub>к</sub> = 50 %;

e – еквівалентна маса кислоти, для сірчаної кислоти – 49, для соляної – 36,5.

2. Розраховуємо коефіцієнт концентрування солей за такою формулою:

$$k_{\text{к.с.}} = \frac{P}{P - P_1}, \quad (11.2)$$

$$k_{\text{к.с.}} = \frac{1,0}{1,0 - 0,5} = 2.$$

3. Лужність оборотної води визначаємо за такою формулою:

$$L_{\text{об}} = -0,22N^2(P - P_1) + 0,1N\sqrt{4,84N^2(P - P_1)^2 + (100 - P)(CO_2)_{\text{ох}} + P(CO_2)_{\text{д}} + 44L_{\text{д}}P}, \quad (11.3)$$

де  $(CO_2)_{\text{ох}}$  – вміст  $CO_2$  у воді, яка зазнала охолодження.

4. Для розрахунку параметру  $N$  скористаємося такою формулою:

$$N = \frac{\Phi}{(Ca_{\text{об}})^{0,5}}, \quad (11.4)$$

де  $Ca_{\text{об}}$  – концентрація іонів кальцію в оборотній воді:

$$Ca_{\text{об}} = k_{\text{к.с.}} \cdot Ca_{\text{д}}, \quad (11.5)$$

де  $Ca_{\text{д}}$  – концентрація іонів кальцію в додатковій воді.

$$Ca_{\text{об}} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ мг-екв/л.}$$

5. Користуючись таблицею 8.1, визначаємо параметр параметр  $\Phi$  залежно від температури охолодженої води  $t_2$  та солевмісту  $S$ .

Так, наприклад, для  $t_2 = 15$  °C та солевмісту  $S = 700$  мг/л (за необхідності проводимо лінійну інтерполяцію)  $\Psi = 9,17$ .

$$N = \frac{9,17}{\sqrt{6}} = 4,08.$$

6. Користуючись таблицею 11.2, визначаємо вміст  $CO_2$  у воді, яка зазнала охолодження  $(CO_2)_{\text{ох}}$  залежно від лужності додаткової води  $L_{\text{д}}$ , коефіцієнта концентрування солей  $k_{\text{к.с.}}$  та солевмісту  $S$ .

Якщо  $L_{\text{д}} = 4$  мг-екв/л,  $k_{\text{к.с.}} = 2$ , а солевміст  $S = 700$  мг/л, то вміст вуглекислоти  $(CO_2)_{\text{ох}} = 3,8$  мг/л.

7. За формулою (11.3) розраховуємо лужність оборотної води

$$\begin{aligned} L_{\text{об}} &= -0,22 \cdot 4,08^2(1,0 - 0,5) + \\ &+ 0,1 \cdot 4,08 \sqrt{4,84 \cdot 4,08^2(1,0 - 0,5)^2 + (100 - 1,0) \cdot 3,8 + 1,0 \cdot 5,0 + 44 \cdot 4 \cdot 1,0} = \\ &= 7,98 \text{ мг-екв/л.} \end{aligned}$$

8. За формулою (11.1) розраховуємо дозу сірчаної кислоти

$$D_k = 49 \left( 4,0 - \frac{L_{об}}{2} \right) \frac{100}{50} = 1,16 \text{ мг/л.}$$

Таким чином, за температури охолодженої води  $t_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  доза кислоти становить 1,16 мг/л.

Таблиця 11.2 – Визначення вмісту вуглекислоти в охолодженій воді після градирні

Метод	Л <sub>д</sub> , мг-екв/л	Вміст (CO <sub>2</sub> ) <sub>ох</sub> із коефіцієнтами концентрування солей k <sub>к.с.</sub>				
		1,2	1,5	2	2,5	3
Солевміст 1 000 мг/л						
Підкислення	3	3	2,4	2,2	2	1,9
	4	4,5	3,9	3,2	2,9	2,8
	5	7,5	5,3	4,3	3,8	3,6
Рекарбонізація	3	5	8	22	29	30
	4	10	22	30	33	36
	5	28	30	33		
Солевміст 700 мг/л						
Підкислення	3	2,6	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
Рекарбонізація	3	6	10	26	34	36
	4	12	28	36	40	43
	5	34	36	40		
Солевміст 400 мг/л						
Підкислення	3	4,4	3,6	3,2	3	2,9
	4	6,6	5,7	4,8	4,3	4,1
	5	11	7,9	6,2	5,7	5,2
Рекарбонізація	3	7	12	33	42	47
	4	14	36	44	49	54
	5	40	43	49		

Аналогічно проводимо розрахунки для температури охолодженої води 20 °C, 25 °C та 30 °C. Результати розрахунків подані у таблиці 11.3, а залежність D<sub>к</sub>(t<sub>2</sub>) наведено на рисунку 11.1.

Таблиця 11.3 – Результати розрахунку

$t_2, ^\circ\text{C}$	15	20	25	30
$\psi$	10	9,38	8,83	8,27
$(\text{CO}_2)_{\text{ох}}, \text{МГ/Л}$	3,8	3,8	3,8	3,8
$k_{\text{к.с.}}$	2	2	2	2
$\text{Ca}_{\text{об}}, \text{МГ-ЕКВ/Л}$	6	6	6	6
$N$	4,08	3,83	3,60	3,38
$\text{Л}_{\text{об}}, \text{МГ-ЕКВ/Л}$	7,98	7,57	7,20	6,81
$D_{\text{к}}, \text{МГ/Л}$	1,16	21,12	39,2	58,1

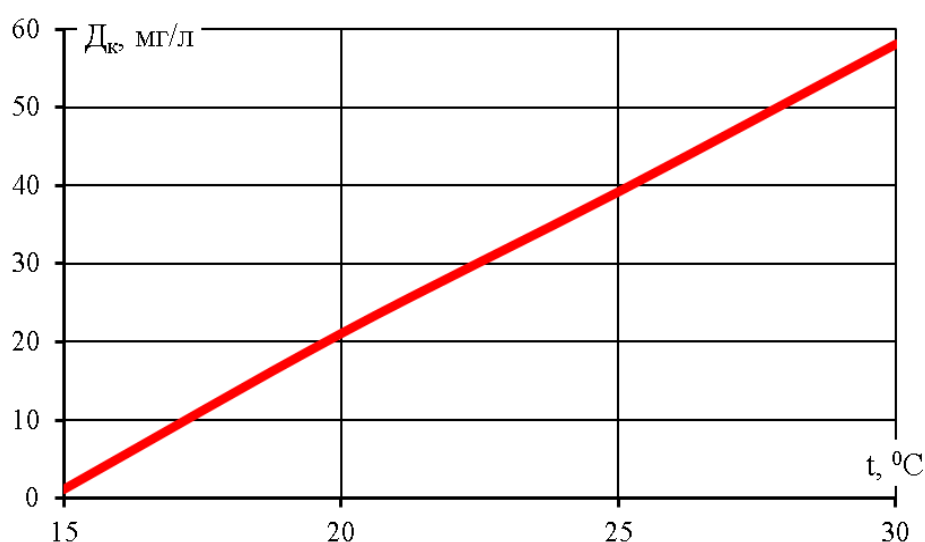


Рисунок 11.1 – Залежність дози кислоти для стабілізаційної обробки оборотної води від її температури після охолодження на градирні

## Практичне заняття № 12

### ЗАЛЕЖНІСТЬ ДОЗИ ВУГЛЕКИСЛОТИ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ОБОРОТНОЇ ВОДИ РЕКАРБОНІЗАЦІЄЮ ВІД ЇЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Побудувати графік залежності дози вуглекислоти для стабілізаційної обробки оборотної води рекарбонізацією від її температури (в діапазоні від  $25\text{ }^\circ\text{C}$  до  $40\text{ }^\circ\text{C}$  із кроком  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ) після охолодження на градирні, якщо відомі (див. табл. 12.1):

– загальні втрати води  $P$ ;

- втрати води на випаровування  $P_1$ ;
- вміст вуглекислоти у додатковій воді,  $(CO_2)_д$ ;
- лужність додаткової води,  $L_д$ ;
- вміст іонів кальцію у додатковій воді,  $Ca_д$ ;
- загальний солевміст,  $S$ ;
- тип палива;
- тип пристроїв для додавання вуглекислоти.

Для кожного значення температури охолодженої води необхідно оцінити можливість застосування методу рекарбонізації.

Таблиця 12.1 – Вихідні дані для розрахунку необхідної дози вуглекислоти

Варіант	P, %	$P_1$ , %	$(CO_2)_д$ , мг- екв/л	$L_д$ , мг- екв/л	$Ca_д$ , мг- екв/л	S, мг/л	тип палива	тип пристроїв
0	4	2	5,0	4,0	5,0	700	нафта	барботаж
1	6	4	4,0	3,0	7,0	400	вугілля	ежектор
2	5,6	2,8	4,5	3,0	7,5	800	нафта	барботаж
3	6	3,6	5,2	4,0	6,5	700	мазут	ежектор
4	6	4	4,0	4,0	6,0	400	вугілля	барботаж

### *Приклад розрахунку*

1. Визначаємо кількість вуглекислоти, що додається до оборотної воду під час рекарбонізації, за такою формулою:

$$(CO_2)_{рек} = \frac{L_д^2}{N^2} \left( \frac{P}{P - P_1} \right)^2 - \frac{100 - P}{100} (CO_2)_{ох} - \frac{P}{100} (CO_2)_д. \quad (12.1)$$

де  $L_д$  – лужність додаткової води, мг-екв/л;

$P$  – загальні втрати води;

$P_1$  – втрати води на випаровування;

$(CO_2)_д$  – вміст вуглекислоти у додатковій воді;

$(CO_2)_{ох}$  – вміст вуглекислоти у воді, яка зазнала охолодження;

$N$  – параметр.

2. Для розрахунку параметра N скористаємося такою формулою:

$$N = \frac{\Psi}{(Ca_{об})^{0,5}}, \quad (12.2)$$

де  $Ca_{об}$  – концентрація іонів кальцію в оборотній воді:

$$Ca_{об} = k_{к.с.} \cdot Ca_{д}, \quad (12.3)$$

де  $Ca_{д}$  – концентрація іонів кальцію в додатковій воді:

$$Ca_{об} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ мг-екв/л.}$$

3. Розраховуємо коефіцієнт концентрування солей за такою формулою:

$$k_{к.с.} = \frac{P}{P - P_1}, \quad (12.4)$$

$$k_{к.с.} = \frac{4}{4 - 2} = 2.$$

4. Користуючись таблицею 8.1, визначаємо параметр  $\Psi$  залежно від температури охолодженої води  $t_2$  та солевмісту води  $S$ .

Так, наприклад, для  $t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  та солевмісту  $S = 700 \text{ мг/л}$  (за необхідності проводимо лінійну інтерполяцію)  $\Psi = 8,83$ .

$$N = \frac{8,83}{(10)^{0,5}} = 2,55.$$

5. Користуючись таблицею 11.2, визначаємо вміст вуглекислоти у воді, яка зазнала охолодження  $(CO_2)_{ох}$  залежно від лужності додаткової води  $L_{д}$ , коефіцієнта концентрування солей  $k_{к.с.}$  та солевмісту  $S$ .

Якщо  $L_{д} = 4 \text{ мг-екв/л}$ ,  $k_{к.с.} = 2$ , а солевміст води  $S = 700 \text{ мг/л}$ , то вміст  $(CO_2)_{ох} = 3,6 \text{ мг/л}$  (за необхідності проводимо лінійну інтерполяцію).

6. За формулою (12.1) розраховуємо кількість вуглекислоти, що додається до оборотної води під час рекарбонізації:

$$(CO_2)_{рек} = \frac{4,0^2}{2,55^2} \left( \frac{4}{4 - 2} \right)^2 - \frac{100 - 4}{100} 3,6 - \frac{4}{100} 5,0 = 6,6 \text{ мг/л.}$$

7. Визначаємо максимальну кількість вуглекислоти, яку можна розчинити в охолоджувальній воді, за формулою

$$i = \frac{M \cdot n \cdot \beta}{10\,000}, \quad (12.5)$$

де  $M$  – розчинність вуглекислоти у воді за даної температури і парціального тиску;

$n$  – вміст  $\text{CO}_2$  у димових газах (під час спалювання вугілля 5–8 %, нафти та мазуту – 8–12 %), обираємо  $n = 8$  %;

$\beta$  – ступінь використання вуглекислоти (для водострумних ежекторів – 40–50 %; для барботажних пристроїв – 20–30 %), обираємо  $\beta = 20$  %.

8. Користуючись таблицею 12.1, визначаємо розчинність вуглекислоти у воді за даної температури.

Таблиця 12.1 – Розчинність  $\text{CO}_2$

	Температура води, $^{\circ}\text{C}$							
	0	10	20	30	40	60	80	100
Розчинність $\text{CO}_2$ М, мг/л	3371	2 360	1 723	1 324	1 055	719	552	-

Якщо  $t_2 = 25$   $^{\circ}\text{C}$ , розчинність вуглекислоти  $M = 1524$  мг/л (за необхідності проводимо лінійну інтерполяцію).

9. За формулою (12.5) розраховуємо максимальну кількість вуглекислоти, яку можна розчинити у охолоджувальній воді:

$$i = \frac{1524 \cdot 8 \cdot 20}{10000} = 24,4 \text{ мг/л.}$$

Таким чином, за температури охолодженої води  $t_2 = 25$   $^{\circ}\text{C}$  необхідна доза вуглекислоти становить 6,6 мг/л, а максимальна доза вуглекислоти, яку можна розчинити у воді, – 24,4 мг/л.

Аналогічно проводимо розрахунки для температури охолодженої води 30  $^{\circ}\text{C}$ , 35  $^{\circ}\text{C}$  та 40  $^{\circ}\text{C}$ . Результати розрахунків максимальної дози вуглекислоти, яку можна розчинити у воді та дози вуглекислоти, необхідної для

стабілізаційної обробки, подані у таблиці 12.2, а залежності  $(CO_2)_{рек}$  ( $t_2$ ) і  $i$  ( $t_2$ ) наведено рисунку 12.1.

Таблиця 12.2 – Результати розрахунку дози кислоти за різної температури охолодженої води

$t_2, ^\circ C$	25	30	35	40
Коефіцієнт $\Psi$	8,83	8,27	7,73	7,22
$(CO_2)_{ох},$ МГ/Л	3,6	3,6	3,6	3,6
Розчинність $CO_2$ M, МГ/Л	1 524	1 324	1 190	1 055
$k_{к.с.}$	2	2	2	2
$Ca_{об},$ МГ-ЕКВ/Л	12	12	12	12
N	2,55	2,39	2,23	2,08
$(CO_2)_{рек},$ МГ/Л	6,6	8,0	9,6	11,5
$i,$ МГ/Л	24,4	21,2	19,0	16,9

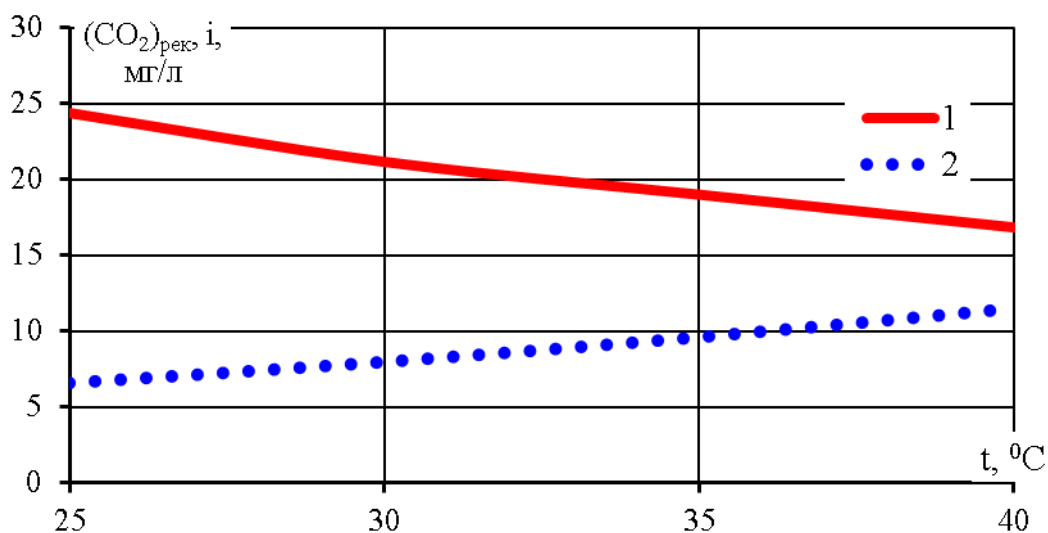


Рисунок 12.1 – Залежність максимальної дози вуглекислоти, яку можна розчинити у воді (1), та дози вуглекислоти необхідної для стабілізаційної обробки (2) оборотної води від її температури після охолодження на градирні

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств : навч. посіб. / Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 280 с.
4. Тугай А. М. Водопостачання : підручник / А. М. Тугай, В. О. Орлов. – 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.
7. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води : підручник / А. К. Запольський. – Київ : Вища школа, 2005. – 671 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, $t$ °С							
	15	16	17	18	19	20	21	22
$\Delta t = 5$ °С								
4,5	442/3954	461/408	485/422	506/436	528/450	549/466	570/485	592/505
3,5	20/380	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 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 із площею зрошення	
< 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 зрошення, м <sup>2</sup>	
До 150	0,5–1,0
Більше за 150	0,5
Більше за 150 (з краплевловлювачами)	0,05
Вентилятори градирні з краплевловлювачами	0,2–0,5

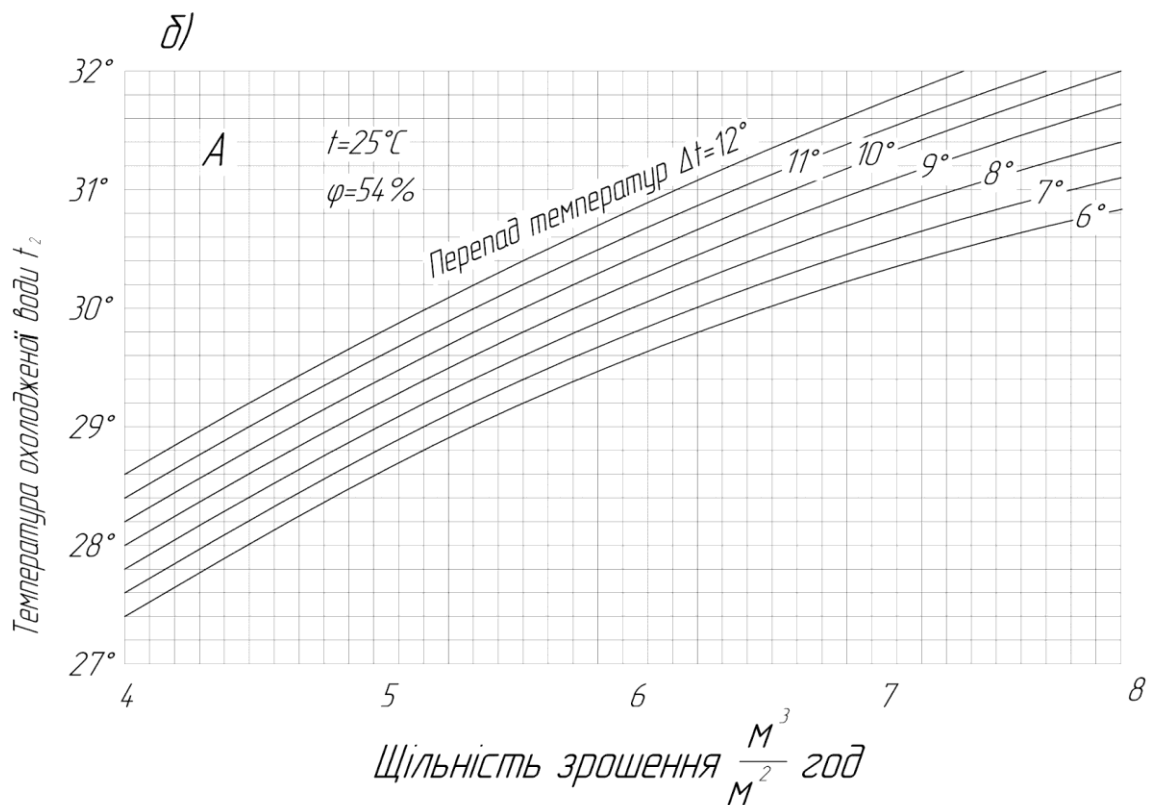
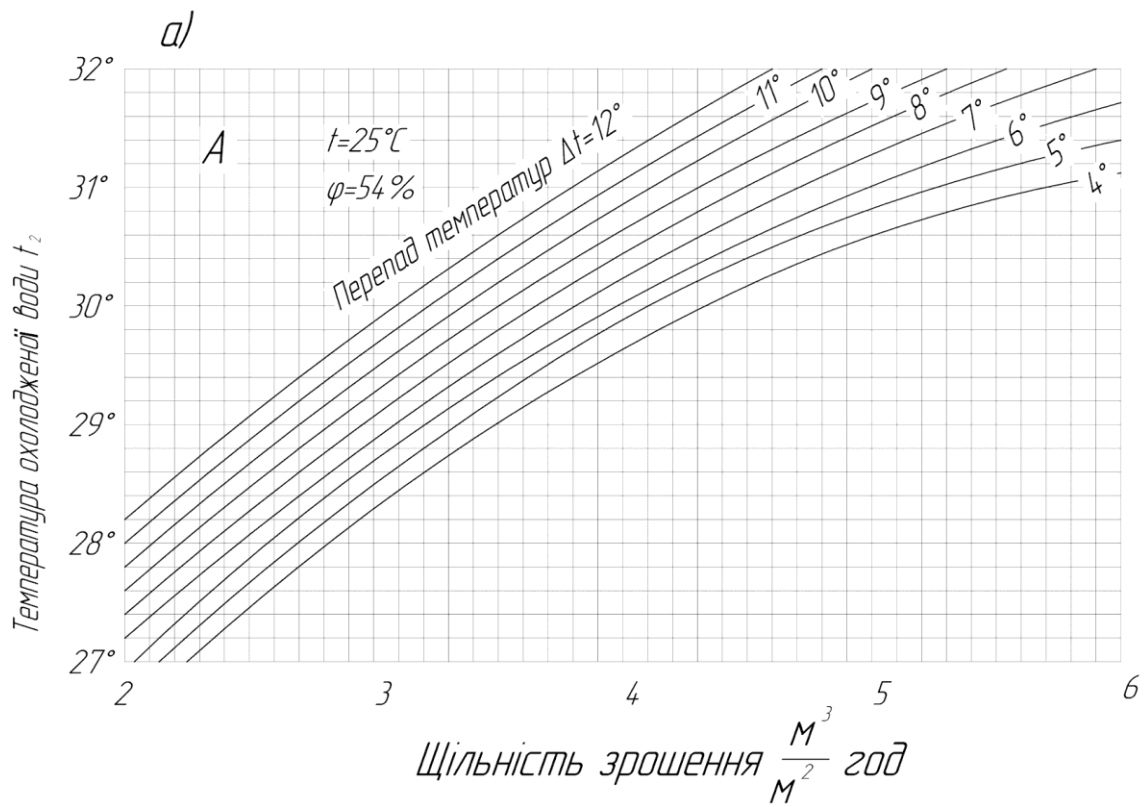


Рисунок А.1 – Номограма для розрахунку баштових градирень:  
а – краплинні градирні; б – плівкові градирні

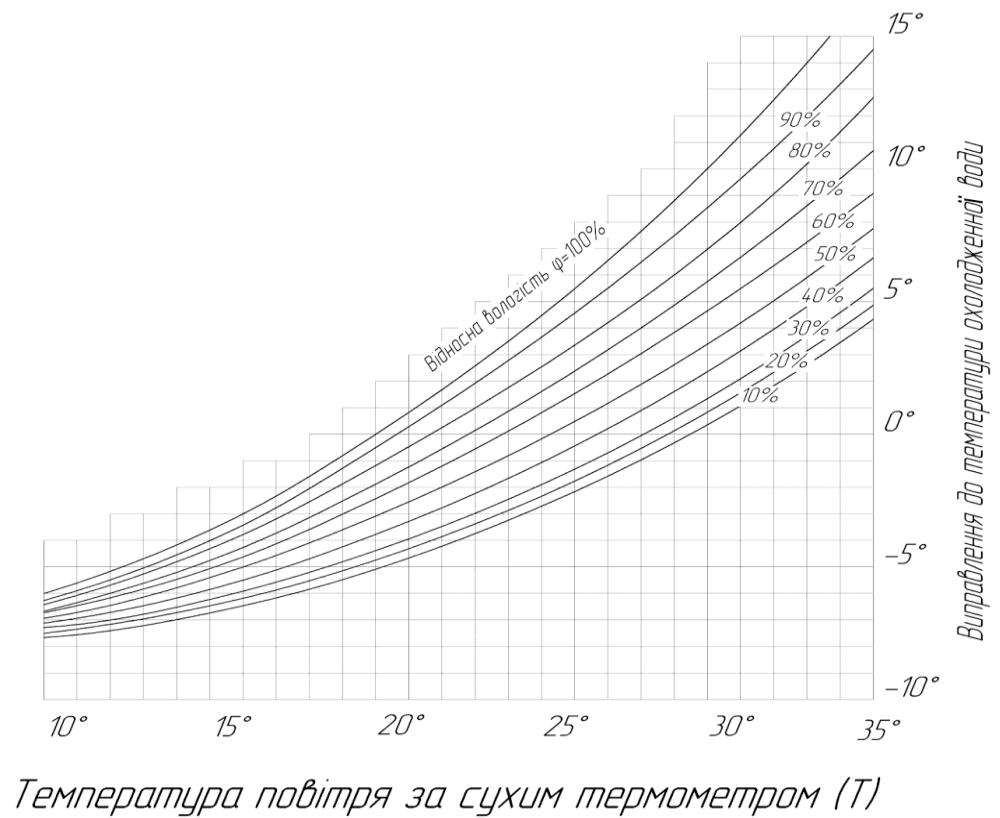
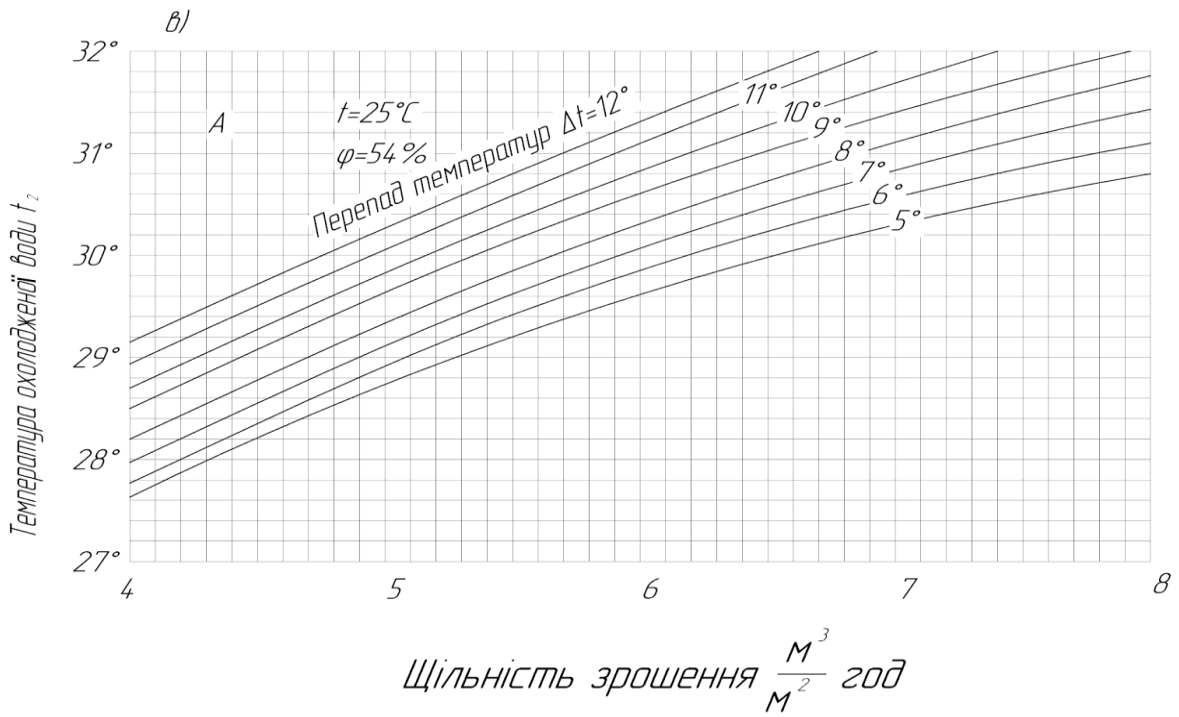


Рисунок А.2 – Номограма для розрахунку баштових градирень:  
в – краплинно-плівкові градирні

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
			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: –газоочисток доменних печей; –газоочисток конверторів Після очищення стічних вод прокатних станів: – вміст завислих речовин; – вміст 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 – у випадку очищення стічних вод газоочисток; 300–350 м <sup>3</sup> /год – у випадку очищення стічних вод МБЛЗ та сортопрокатних станів
Вміст завислих речовин	до 150 мг/л – в очищеній воді газоочисток доменних печей; до 300 мг/л – в очищеній воді газоочисток конвертерів; 50–100 мг/л – в очищеній стічній воді сортопрокатних станів та МБЛЗ
Вміст масел	20–30 мг/л – в очищеній воді 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 В.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 їхні 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 електросталеплавильних 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 проведення практичних занять

із навчальної дисципліни

**«ТЕХНОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ У  
ПРОМИСЛОВОСТІ»**

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

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

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*  
Редактор *Б. О. Хільська*  
Комп'ютерне верстання *Т. С. Айрапетян*

План 2025, поз. 110М

---

Підп. до друку 23.07.2025. Формат 60 × 84/16.  
Ум. друк. арк. 3,6.

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