

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

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до проведення практичних занять, виконання  
розрахунково-графічної роботи та самостійного вивчення  
з навчальної дисципліни

**«СПЕЦКУРС З ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ  
ПРОМІСПРИЄМСТВ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти  
всіх форм навчання галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво  
зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія,  
освітня програма «Цивільна інженерія»)*

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

Методичні рекомендації до проведення практичних занять, виконання розрахунково-графічної роботи та самостійного вивчення з навчальної дисципліни «Спецкурс з водопостачання та водовідведення промпідприємств» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти всіх форм навчання галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія, освітня програма «Цивільна інженерія») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : С. М. Епоян, Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 58 с.

Укладачі: д-р техн. наук, проф. С. М. Епоян,

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

#### Рецензент

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

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

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ.....	5
1.1 Системи зворотного водопостачання.....	5
1.2 Стабілізація іонного складу води у зворотних і повністю замкнених системах промислового водопостачання.....	12
1.3 Системи охолодження конденсаторів на ТЕС.....	15
1.4 Розрахунок споруд для очищення виробничих стічних вод з метою їх повторного використання у зворотних циклах.....	18
1.5 Очищення стічних вод гальванічних виробництв.....	23
1.6 Розрахунок флотаційних установок.....	27
1.7 Очищення промислових стічних вод методами електрокоагуляції та електрофлотокоагуляції.....	29
1.8 Біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод.....	32
2 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ .....	34
2.1 Структура й оформлення розрахунково-графічного завдання .....	34
2.2 Рекомендації до виконання основних розділів розрахунково-графічного завдання.....	35
2.2.1 Джерела утворення стічних вод на підприємстві.....	36
2.2.2 Кількість і склад промислових стічних вод.....	35
2.3 Способи очищення промислових стічних вод.....	36
2.4 Вибір і обґрунтування методу й складу споруд для очищення виробничих стічних вод.....	39
2.4 Розрахункова частина.....	40
2.5.1 Визначення розрахункової витрати виробничих стічних вод.....	40
2.5.2 Розрахунок установки для електрофлотокоагуляції.....	41
2.5.3 Розрахунок відстійника.....	44
2.5.4 Фільтрування проясненої води.....	48
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТКИ.....	52

## ВСТУП

Промислове водопостачання призначено для надійного забезпечення водою необхідної якості виробничих процесів на підприємствах різних галузей промисловості і є частиною всієї системи водного господарства, що містить також його систему водовідведення.

Основні завдання у сфері промислового водопостачання нерозривно пов'язані з раціональним використанням водних ресурсів, підвищенням ефективності функціонування систем водного господарства промислових підприємств та їхньою екологічною безпекою. Вони спрямовані на:

- впровадження безводних и маловодних технологічних схем;
- широке застосування зворотних і замкнених систем водопостачання з відповідним очищенням або охолодженням води;
- повторне використання очищених виробничих та міських стічних вод.

Мета викладання навчальної дисципліни «Спецкурс з водопостачання та водовідведення промпідприємств» – підготовка фахівця, який володітиме знаннями та вміннями, пов'язаними з вирішенням питань водопостачання, водовідведення та очищення виробничих стічних вод, розробкою раціональних схем водокористування, створенням зворотних і безстічних систем водопостачання.

У результаті вивчення дисципліни здобувачі повинні знати:

- основні методи та технології підготовки води для промислових потреб та очищення висококонцентрованих стічних вод;
- основні апарати та обладнання, що застосовують у схемах підготовки води для потреб промислового водопостачання та очищення стічних вод, принцип роботи споруд, їхні конструктивні особливості;
- як раціонально підходити до вибору технологічних, конструкційних та проєктних рішень з водопостачання та водовідведення промислових підприємств;
- як здійснювати вибір сучасного обладнання, що застосовується для очищення висококонцентрованих стічних вод;
- як виконувати розрахунки та обґрунтування споруд систем водопостачання та водовідведення промислових підприємств.

# 1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

## 1.1 Системи зворотного водопостачання

### *Водний і тепловий режими систем зворотного водопостачання*

Найбільшого поширення у практиці промислового водопостачання набули відкриті системи зворотного водопостачання з охолодженням води у випарних охолоджувачах. Водний режим зворотних систем характеризується балансом води. Частина зворотної води випаровується і втрачається у вигляді крапельного винесення в охолоджувачах, інша частина води витрачається на скидання із системи (продувку), технологічні та інші потреби.

У результаті випаровування частини води в охолоджувачі втрачається у середньому 0,15 % охолоджуючої води зі зниженням її температури на 1 °С, виноситься повітрям у градирнях 0,2–0,3 % охолоджуючої води.

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

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

Тому під час експлуатації зворотних систем водопостачання промислових підприємств дуже важливо знати динаміку зміни у воді концентрації окремих іонів і загального солемісту. Вважається, що розчинені солі води, яка випарувалася (повністю або частково) залишаються у зворотній воді, підвищуючи їхню концентрацію.

Підвищення концентрації солей може викликати процеси корозії теплообмінних систем і комунікацій або призвести до інкрустації теплообмінних поверхонь трубопроводів і арматури.

Усі втрати води в системі зворотного водопостачання компенсуються додаванням до системи свіжої води з джерела.

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (1.1)$$

де  $P$  – кількість води, що додається, % від витрати зворотної води;

$P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  – безповоротні втрати води на випаровування, крапельне винесення, продувку та технологічні потреби, %.

Крім водного режиму системи зворотного охолодження характеризуються параметрами теплового режиму охолоджувачів води: температурою нагрітої  $t_1$  та охолодженої води  $t_2$ , перепадом температур  $\Delta t = t_1 - t_2$ , питомим тепловим

навантаженням, глибиною охолодження  $\Delta t' = t_2 - \tau$ , де  $\tau$  – температура повітря за змоченим термометром.

Водний режим істотно впливає на концентрацію тих чи інших солей у зворотній системі водопостачання. Якість і кількість додаткової води визначають характер і величину концентрації тієї чи іншої солі у зворотній воді, яка також залежить від розчинності цієї солі, її вмісту до введення додаткової (підживлювальної) води та фізико-хімічних процесів, що відбуваються з нею в системі.

За встановленого режиму гранична концентрація солей у системі залежить від параметрів водного режиму  $P_1$ ,  $P_2$  та  $P_3$ . Величини  $P_1$  та  $P_2$  змінюються в умовах кожної системи незначно, а отже, зміна граничної концентрації солей у зворотній воді може дорівнювати величині продувки  $P_3$ . Чим більша величина продувки, тим меншою буде гранична концентрація солей. Коефіцієнт концентрування солей, що не випадають в осад, дорівнює відношенню концентрацій їх у зворотній і в додатковій воді.

Гранична величина коефіцієнта концентрування, що досягається у разі режиму, що встановився

$$K_{\text{вин}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3}. \quad (1.2)$$

Рівняння (1.2) можна подати у спрощеному вигляді:

$$K_{\text{вин}} = 1 + \frac{P_1}{P_2 + P_3}. \quad (1.3)$$

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

$$C_{\text{ц}} = K_{\text{к}} \cdot C_{\text{д}}. \quad (1.4)$$

Продувка системи ефективна тільки в тому випадку, якщо карбонатна жорсткість доданої води значно нижче за карбонатну жорсткість води у системі. Інакше необхідна настільки велика витрата підживлюючої води, що додавання її буде просто неекономічним, тому вигідніше буде застосувати хімічну обробку води.

Величина коефіцієнта упарювання  $K_{\text{у}}$  обмежена також величиною допустимого солевмісту зворотної води через небезпеку корозії обладнання, що охолоджується, і трубопроводів ( $S_{\text{доп}} \leq 2000\text{--}2500$  мг/л).

Таким чином, водний і тепловий режими зворотної системи водопостачання за інших рівних умов мають визначальне значення для її надійного функціонування.

Отже, основні питання, що характеризують роботу систем зворотного водопостачання, це:

- водний і сольовий баланси;
- оцінка небезпечності та інтенсивності утворення щільних сольових відкладень у обладнанні та трубопроводах;
- оцінка небезпечності корозійного зносу;
- методи стабілізаційної обробки води.

Втрати води на випаровування відбувається під час охолодження, якщо циркулююча вода використовується як теплоносій (для відведення тепла). Точну величину цієї втрати можна визначити з теплового розрахунку охолоджувача, а за відсутності розрахунку – з достатнім наближенням за такою формулою, м<sup>3</sup>/год:

$$Q_1 = K_B \cdot \Delta t \cdot Q_o, \quad (1.5)$$

де  $\Delta t$  – перепад температур води, який визначається як різниця температур відпрацьованої води  $t_2$ , що надходить на охолоджувач (ставок, бризкальний басейн або градирню), та води охолодженої  $t_1$ , °C.

$Q_o$  – кількість води, що відводиться від виробництва на охолодження, м<sup>3</sup>/год.

$K_B$  – коефіцієнт, що враховує частку тепловіддачі випаровуванням у загальній тепловіддачі.

Коефіцієнт втрати води на випаровування обирається для бризкальних басейнів та градирень залежно від температури повітря (за сухим термометром), а для ставків-охолоджувачів та ставків-освітлювачів оборотної води – залежно від природної температури води у водоймі. Значення коефіцієнта  $K_{вин}$  під час охолодження води у бризкальних басейнах і градирнях можна обрати за додатком А (табл. А.1)

Значення коефіцієнта під час охолодження води у ставках-охолоджувачах та ставках-освітлювачах наведено у додатку А (табл. А.2).

Для проміжних значень температури повітря та природної температури води значення коефіцієнта  $K_{вин}$  визначається інтерполяцією.

Втрати води на винесення її із системи вітром  $Q_2$  у вигляді крапель залежать від конструкції та розмірів охолоджувача, а для відкритих охолоджувачів – від швидкості вітру.

Втрати води на винесення  $Q_2$  з охолоджувача оборотної води, м<sup>3</sup>/год:

$$Q_2 = K \cdot Q_0, \quad (1.6)$$

де  $K$  – коефіцієнт втрати води на винесення вітром.

Коефіцієнт втрати води на винесення для бризкальних басейнів дорівнює 0,015–0,02; для бризкальних градирень та відкритих градирень із жалюзі – 0,01–0,015; для відкритих крапельних градирень з решітками та для баштових градирень – 0,005–0,01; для вентиляторних градирень із водовловлювачами – 0,002–0,003 (менші значення для охолоджувачів більшої продуктивності).

Величина втрат води на водоочисних спорудах (якщо вода використовується як середовище, що поглинає і транспортує механічні домішки) осадом, що видаляється, затримуваним цими спорудами, визначається вимірюванням об'єму осаду, що видаляється,  $V$  (м<sup>3</sup>) за час  $T$  з урахуванням його вологості. Ці втрати невеликі, і в більшості випадків ними можна знехтувати.

Отже, кількість підживлювальної (додаткової) води дорівнює

$$Q_{\text{підж}} = Q_{\text{ск}} + Q_{\text{ун}} + Q_{\text{вин}} + Q_{\text{ос}} + Q_{\text{вир}} \quad (1.7)$$

Допустимий вміст солей або окремих іонів у підживлювальній воді визначається за умовою зберігання постійної якості зворотної води, що циркулює у системі

$$C_{\text{підж}} = \frac{C_{\text{об}} \cdot (Q_{\text{ск}} + Q_{\text{ун}} + Q_{\text{ос}} + Q_{\text{вир}})}{Q_{\text{підж}}}, \quad (1.8)$$

де  $C_{\text{об}}$  – концентрація цього елемента у зворотній воді;

$C_{\text{підж}}$  – концентрація цього елемента у підживлювальній воді.

#### *Баланс води і солей у зворотних циклах водопостачання*

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

а) за випаровуванням води

$$K_{\text{вин}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{д}} - P_1}, \quad (1.9)$$

б) за концентруванням солей

$$K_K = \frac{C_{зв}}{C_D} \quad \text{або} \quad K_{Cl} = \frac{Cl_{зв}^-}{Cl_D^-}, \quad (1.10)$$

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

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

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

$C_{зв}$ ,  $C_D$  – концентрації розчинених солей відповідно у зворотній і підживлювальній воді;

$Cl_{зв}^-$ ,  $Cl_D^-$  – концентрації іонів хлору відповідно у зворотній і підживлювальній воді.

Коефіцієнт випаровування або концентрування солей  $K_K$  показує, у скільки разів концентрація розчинених речовин у циркуляційній воді більше ніж у підживлювальній воді.

У разі стабільності зворотної води (браку інкрустації поверхонь відкладеннями  $CaCO_3$ ,  $Mg(OH)_2$  або змін складу води за рахунок продуктів корозії труб і теплообмінної апаратури) зберігається рівність коефіцієнтів випаровування. Вони визначаються за поступовим підвищенням у зворотній воді концентрацій різних іонів, – хлоридів, сульфатів тощо, – і обчислюються за такою формулою:

$$K_{\text{вип}} = \frac{[Cl^-]_{зв}}{[Cl^-]_D} = \frac{[SO_4^{2-}]_{зв}}{[SO_4^{2-}]_D} = \dots = \frac{C_{зв}}{C_D} = \frac{C_D + \Delta C}{C_D} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3}, \quad (1.11)$$

де  $P_1, P_2, P_3$  – втрати води внаслідок випаровування, винесення крапель вітром та стабілізаційна витрат;

$C_{зв}$  – заданий за умовами забезпечення корозійної стійкості матеріалів солевміст зворотної води, мг/л;

$\Delta C = C_{зв} - C_D$  – збільшення солевмісту зворотної води внаслідок випаровування;

$C_D$  – солевміст підживлювальної води, мг/л;

$[Cl^-]_{зв}$  – концентрація іонів хлору у зворотній воді, мг/л;

$[Cl^-]_D$  – концентрація іонів хлору в підживлювальній воді, мг/л;

$[SO_4^{2-}]_{зв}$  та  $[SO_4^{2+}]_D$  – концентрація іонів сульфату у зворотній та підживлювальній воді, мг/л.

Зміна концентрації іонів у зворотній воді залежить від умов експлуатації системи, тобто від величини продувки й методу обробки підживлювальної води, а також якості води в охолоджувачі.

Якщо концентрацію солей жорсткості в циркуляційній воді обрати максимально допустимою, то з рівняння водно-сольового балансу можна визначити мінімально необхідну витрату продувки у такий спосіб:

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

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

$$P_3 = \frac{C_D \cdot P_1}{C_{об} - C_D} - P_2, \quad (1.12)$$

де  $C_D$  – концентрація солей жорсткості у підживлювальній воді, мг-екв/л;

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

$$P_3 = \frac{Ж_{ДОБ}^K \cdot P_1}{Ж_{ГРАН}^K - Ж_D^K} - P_2. \quad (1.13)$$

де  $C_D$  – концентрація солей жорсткості у підживлювальній воді, мг-екв/л;

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

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

У системах водяного охолодження теплонавантажених елементів утворюються переважно відкладення карбонату кальцію у разі втрати вільної вуглекислоти через нагрівання води. Відбувається розкладення бікарбонатних іонів  $\text{HCO}_3^-$  з утворенням карбонатних іонів  $\text{CO}_3^{2-}$ , які реагують з іонами  $\text{Ca}^{2+}$  і утворюють малорозчинні сполуки  $\text{CaCO}_3$ , що осаджуються на стінках трубопроводів:



Якщо такого розкладання в системі немає, то наявне таке співвідношення:

$$L_{зв} = K_K \cdot L_D, \quad (1.14)$$

де  $L_{зв}$ ,  $L_D$  – лужність відповідно циркуляційної і підживлювальної води, мг-екв/л.

За співвідношенням  $L_{зв} > K_{вип} \cdot L_d$  до системи додаються або надходять лужні речовини. Співвідношення  $L_{зв} < K_{вип} \cdot L_d$  свідчить про те, що в системі відбуваються розпад  $Ca(HCO_3)_2$  і утворення відкладень у такій кількості:

$$\Delta L = K_{вип} \cdot L_d - L_{зв}. \quad (1.15)$$

### ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

1. Визначити максимальне значення коефіцієнта випаровування для бризкальних басейнів середньої продуктивності, що працюють з крапельним винесенням води  $P_2 = 2\%$ , за умови роботи системи без продувки, на випаровування втрачається  $P_1 = 1,6\%$ .

2. Продувка зворотного циклу становить  $3,5\%$ . Визначити розмір додавання до системи свіжої води, якщо  $P_1 = 0,95\%$ .

3. Додавання води в оборотну систему водопостачання електростанції дорівнює  $3\%$ . Визначити коефіцієнт випаровування, якщо на випаровування втрачається  $P_1 = 1,2\%$ .

4. Карбонатна жорсткість додаткової води дорівнює  $1,5$  мг-екв/л, а циркуляційної води –  $2,25$  мг-екв/л. Чи буде відбуватися розпад  $Ca(HCO_3)_2$ , якщо  $P_{дод} = 2,4\%$  і втрати  $P_1 = 0,008$ ?

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

Визначаємо втрати на випаровування за такою формулою:

$$P_1 = 0,16 \cdot X \cdot \Delta t,$$

де  $X$  – частка теплоти, що віддається повітрю через випаровування;

$X = 0,75$  – для осінньо-весняного періоду, для літнього періоду  $X = 1$ , для зимового періоду  $X = -0,5$ ;

$\Delta t$  – різниця температур циркуляційної води до та після її охолодження.

$$P_1 = 0,16 X \cdot \Delta t = 0,16 \cdot 0,75 \cdot 12 = 1,44, \%$$

де  $X = 0,75$  – весна, осінь;

$X = 1$  – літній період;

$X = 0,5$  – зимовий період.

Величину продувки системи зворотного охолодження визначаємо за такою формулою (1.13):

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

$$P_{\text{доб}} = P_1 + P_2 + P_3 = 1,44 + 0,5 + 1,26 = 3,2, \%, \text{ Qоб.}$$

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

Із формули для визначення коефіцієнту концентрування добре розчинних солей або коефіцієнта випаровування через водний баланс знайдемо додавання свіжої (підживлювальної) води  $P_{\text{д}}$ , що додається до оборотної системи, за такою формулою:

$$K_{\text{вип}} = \frac{P_1 + P_3}{P_3} = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{д}} - P_1},$$

$$P_{\text{д}} = \frac{K_{\text{вип}}}{K_{\text{вип}} - 1} \cdot P_1 = \frac{1,5}{1,5 - 1} \cdot 1,5 = 4,5 \%, \text{ Qоб.}$$

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

Далі знаходимо кількість води, що необхідно виводити з оборотного циклу, тобто продувку системи ( $P_3$ ):  $P_3 = P_{\text{доб}} - P_1$ ,

$$P_3 = 4,5 - 1,5 = 3, \%, \text{ Qоб.}$$

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

## **1.2 Стабілізація іонного складу води у зворотних і повністю замкнених системах промислового водопостачання**

У звичайних системах зворотного водопостачання, де циркулююча вода не забруднюється технологічними продуктами, підвищенню мінералізації запобігають продувкою (скиданням частини зворотної води) й поповненням системи свіжою водою. Однак таке скидання і додавання доцільні лише тоді, коли карбонатна жорсткість (або загальний солевміст) води, що додають до системи зворотного водопостачання, менше за карбонатну жорсткість (солевміст) води, що знаходиться у системі зворотного водопостачання, а також, якщо дозволяє потужність.

Кількість зворотної води, яку необхідно скинути для підтримки гранично допустимої (максимальної) величини карбонатної жорсткості оборотної води, визначають за формулою (1.13), а кількість води, що необхідно при цьому додавати до системи, за такою формулою:

$$P_d = \frac{Ж_d^K \cdot P_1}{Ж_{ГРАН}^K - Ж_d^K}, \quad (1.16)$$

де  $Ж_d^K$  – карбонатна жорсткість води, що додається до системи, у мг-екв/л.

У деяких випадках у системах зворотного водопостачання з'являється необхідність відкоригувати рН зворотної води. Найбільш простий спосіб регулювання рН циркуляційної води – це підкислення або часткове  $H$ -катіонування, а також здійснення заходів, що зменшують інтенсивність зростання солевмісту.

Вибір способу зменшення рН залежить від допустимого вмісту в ній сульфат-іонів. За можливості продувки системи застосовують порівняно-дешевий метод – підкислення води сірчаною кислотою. У випадках, коли продувка обмежена – часткове  $H$ -катіонування або комбінацію його з підкисленням. За відсутності продувки – тільки часткове  $H$ -катіонування.

Необхідну кількість води, що зазнає  $H$ -катіонування для зменшення рН, визначають за такою формулою:

$$\alpha = \frac{44L_H \cdot 10^{(pK_1 - pH_c)} - CO_2^H}{CO_2^K - CO_2^H + 44K + 44(L_H + K) \cdot 10^{pK_1 - pH_c}}, \quad (1.17)$$

де  $\alpha$  – кількість  $H$ -катіонованої води у частках від загальної витрати зворотної води;

$L_H$  – лужність води у водосховищі-охолоджувачі, мг-екв/л;

$pK_1$  – негативний логарифм константи першого ступеня дисоціації вуглекислоти (табл. 1.1);

$pH_c$  – величина рН загальної витрати зворотної води після змішування з  $H$ -катіонованою водою;

$CO_2^H$  – концентрація вільної вуглекислоти у воді водосховища-охолоджувача, мг/л;

$CO_2^K$  – концентрація вільної вуглекислоти у  $H$ -катіонованій воді, що виділилася в результаті розпаду бікарбонатів у процесі  $H$ -катіонування, мг/л;

$CO_2^K = 44 L_H$ ;

$K$  – кислотність Н-катіонованої води, що визначається за концентрацією аніонів сильних кислот.

$$K = \frac{SO_4^{2-}}{48,03} + \frac{Cl^-}{35,36} + \frac{NO_3^-}{62,01}, \text{ мг-екв/ л,} \quad (1.18)$$

де  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  – відповідні концентрації вказаних аніонів.

Таблиця 1.1 – Значення показників рК<sub>1</sub> залежно від температури води

Значення показника	Температура води, ° С									
	0	10	20	25	30	40	50	60	70	80
рК <sub>1</sub>	6,58	6,48	6,39	6,37	6,34	6,31	6,30	6,29	6,30	6,31

Підживлювальна вода у разі замкненого зворотного водопостачання – це суміш свіжої (зазвичай освітленої і пом’якшеної) води і стабілізаційної витрати.

Іонний склад її визначається складом і об’ємним співвідношенням обох компонентів суміші:

$$C_{д.} = \frac{C_{зм} (P_1 + P_2) + C_{стаб.в.} P_1}{P_1 + P_2 + P_3}, \quad (1.19)$$

де  $C_{стаб.в.}$  – іонний склад води стабілізаційної витрати (після іонообмінного коректування мінерального складу й освітлення);

$C_{зм}$  – іонний склад води стабілізаційної витрати для пом’якшеної свіжої підживлювальної води.

Для попередніх розрахунків величину  $P_3$  обирають 0,2–0,5 % і потім уточнюють за такою формулою:

$$P_3 = \frac{C_{д.} K \cdot \Delta t - \Delta C \cdot P_2}{\Delta C}, \quad (1.20)$$

де  $C_{д.}$  – солевміст у підживлювальній воді, мг/л;

$\Delta C = C_{зв} - C_{д.}$  – збільшення солевмісту у зворотній воді внаслідок випаровування.

Якщо зворотна вода стабільна і не забруднюється солями, що потрапляють із технологічних розчинів через різні нещільності у теплообмінній апаратурі, то загальний солевміст у ній знаходять, враховуючи коефіцієнт випаровування або концентрування за рівнянням сольового балансу системи.

*Прояснення підживлювальної води й стабілізаційної витрати  
зворотного циклу*

Необхідний ступінь прояснення підживлювальної води оцінюють величиною підживлення і балансом завислих речовин

$$B_1 = \frac{Q_1 \cdot B_{зв} - P_1 \cdot B_{зв} - \sum Q_{вент} \cdot B_2}{P_1 + P_2 + P_3}, \quad (1.21)$$

де  $B_1$  – кількість зависі, що видаляється під час прояснення підживлювальної води, мг/м<sup>3</sup>;

$Q_1$  – продуктивність системи зворотного водопостачання, м<sup>3</sup>/год;

$\sum Q_{вент}$  – продуктивність вентиляторів градирень (за повітрям), м<sup>3</sup>/год;

$B_{зв}$  – допустима концентрація завислих речовин у системі зворотного водопостачання (обирають 40–50 г/м<sup>3</sup>, іноді 12–15 г/м<sup>3</sup>);

$B_2$  – концентрація пилу й піску в повітрі (звичайно 103,5 мг/м<sup>3</sup>);

$P_1, P_2$  – втрати води з системи зворотного водопостачання, м<sup>3</sup>/год;

$P_3$  – стабілізаційна витрата, що визначається за умовами збереження допустимої концентрації завислих речовин.

### 1.3 Системи охолодження конденсаторів на ТЕС

На рисунку 1.2 подано схему зворотного циклу водопостачання.

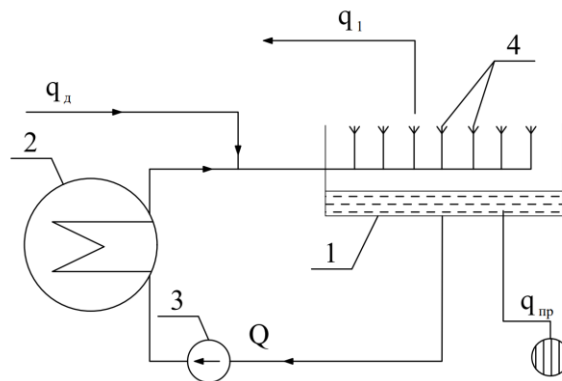


Рисунок 1.2 – Схема циклу зворотного водопостачання

У теплообмінник (конденсатор) насосом (2) подається охолоджувальна вода з початковою температурою  $t_1$ . Нагріта вода з температурою  $t_2 > t_1$  подається для охолодження у бризкальний басейн (або градирню) (1), у якій відбувається розбризування води за допомогою сопел (4). Зменшення температури відбувається за рахунок конвективного охолодження та

випаровування. Внаслідок цього у системі відбувається накопичення солей та збільшення їхньої концентрації.

$C_d$  – концентрація речовин, що не випадають в осад (наприклад, хлоридів) у додатковій воді.

$C_x$  – концентрація речовин, що не випадають в осад (наприклад, хлоридів) в охолоджувальній (циркуляційній) воді у момент часу  $\tau$ .

$W$  – об'єм води в оборотній системі, м<sup>3</sup>.

Рівняння балансу речовин, що не випадають в осад у момент часу  $\tau$

$$q_{\text{доб}} C_{\text{доб}} d\tau = q_{\text{пр}} C_x d\tau + W dC_x. \quad (1.22)$$

Розв'яжемо це рівняння відносно  $C_x$ :

$$C_x = \frac{C_{\text{доб}}}{a} (1 - e^{-B\tau}) + C_m e^{-B\tau}, \quad (1.23)$$

де  $B = \frac{q_{\text{пр}}}{W}. \quad (1.24)$

У разі довготривалої роботи системи  $\tau \rightarrow \infty$  значення  $C_x$  прагне до межі

$$C_x = \frac{q_{\text{доб}}}{q_{\text{доб}} - q_1} C_u = C_u, \quad (1.25)$$

де  $q_1$  – кількість води, що випарувалася, м<sup>3</sup>/год;

$C_u$  – концентрація у циркуляційній воді, мг/л.

$$K_y = \frac{C_u}{C_{\text{доб}}} = \frac{q_{\text{доб}}}{q_{\text{доб}} - q_1} = \frac{1}{a}. \quad (1.26)$$

Відношення (1.26) називається коефіцієнтом випаровування, яке показує у скільки разів концентрація розчинених речовин у циркуляційній воді більше, ніж у додатковій воді.

Позначимо кількість води, що знаходиться в обороті  $Q_{\text{об}}$ , тоді

$$q_{\text{доб}} = \frac{P_{\text{доб}} \cdot Q_{\text{об}}}{100}, \quad q_{\text{gh}} = \frac{P_3 \cdot Q_{\text{об}}}{100}, \quad q_1 = \frac{P_1 \cdot Q_{\text{об}}}{100}. \quad (1.27)$$

Підставимо ці величини у рівняння (1.23) та отримаємо:

$$K_y = \frac{P_d}{P_d - P_1} = \frac{P_{\text{доб}}}{P_3}. \quad (1.28)$$

$$P_{\text{дод}} = P_3 + P_1.$$

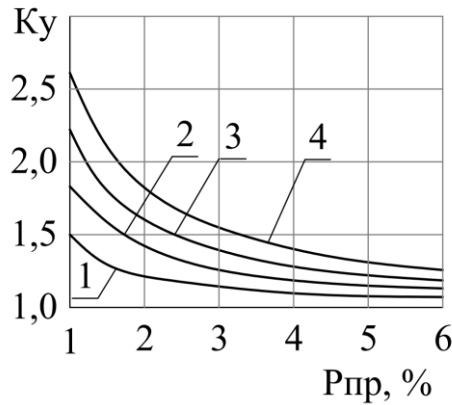


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта випаровування від продуктивки системи при значеннях  $P_1$ , %: 1 – 0,5; 2 – 0,8; 3 – 1,2; 4 – 1,6

### Визначення швидкості наростання концентрації

Для визначення часу наростання концентрації необхідно розв'язати рівняння (1.26) відносно  $\tau$

$$C_x = \frac{C_{\text{доб}}}{a} (1 - e^{-B\tau}) + C_m e^{-B\tau} \quad (1.29)$$

де  $B = \frac{q_{\text{пр}}}{W}$ .

Тоді 
$$\tau = -\frac{\lg A}{B \cdot \lg e}, \quad (1.30)$$

де  $A = \frac{C_{\text{доб}} - aC_x}{C_{\text{доб}} - aC_{\text{нач}}}$ ,  $B = \frac{q_{\text{пр}}}{W} = \frac{P_3 \cdot Q_{\text{об}}}{W \cdot 100}$ .

Або, якщо врахувати співвідношення

$$K_{\text{вип}} = \frac{P_{\text{доб}}}{P_{\text{доб}} - P_1} = \frac{P_{\text{доб}}}{P_3},$$

$$A = \frac{K_{\text{вип}} C_{\text{доб}} - C_x}{K_{\text{вип}} C_{\text{доб}} - C_{\text{нач}}} = \frac{C_{\text{об}} - C_x}{C_{\text{об}} - C_{\text{нач}}}. \quad (1.31)$$

Отже, час збільшення  $\tau$  залежить від співвідношення  $\frac{Q_{\text{об}}}{W}$ : чим воно менше, тим повільніше змінюється концентрація розчинених речовин в оборотній (циркуляційній) воді.

Гранична концентрація  $C_{\text{об}} = K_{\text{вип}} C_{\text{доб}}$ .

Визначення швидкості збільшення концентрації речовин у воді зворотного циклу здійснюється за такою формулою:

$$v_k = \frac{P_3}{100} \cdot \frac{Q_{об}}{W} e^{-\frac{P_3 \cdot Q_{об}}{100 \cdot W} \cdot \tau} (C_{об} - C_{поч}) = B \cdot e^{-B \cdot \tau} (C_{об} - C_{поч}). \quad (1.32)$$

### ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

1. Водопостачання виробничих споживачів металургійного заводу здійснюється за замкненою на ставку схемою. Визначити величину коефіцієнта упарювання, яка буде досягнута через 5 000 год роботи оборотного циклу. Продувки і винесення вітром (з моменту  $C_{об} = C_{поч}$ ) немає, але вода, що випарувалася, заповнюється. Кількість оборотної води становить 55 000 м<sup>3</sup>/год, втрати на випаровування  $P_1 = 1,2 \%$ , кількість води у ставку  $V = 4 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>.

2. Об'єм води в басейні оборотного циклу електростанції дорівнює  $V = 2,3 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>, а кількість води в обороті  $Q_{об} = 5 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup>/год. Визначити, через скільки годин роботи оборотного циклу з моменту його пуску концентрація розчинених в оборотній воді речовин збільшиться порівняно з початковою у 1,2 рази за умови, що  $C_{поч} = C_{дод}$ , втрати на випаровування  $P_1 = 1,2 \%$ , а система працює без продувки.

### 1.4 Розрахунок споруд для очищення виробничих стічних вод з метою їх повторного використання у зворотних циклах

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

#### *Горизонтальні відстійники*

Площу зони осадження, м<sup>2</sup>, обирають залежно від питомого гідравлічного навантаження

$$F = \frac{Q}{q_{уд}}. \quad (1.33)$$

Довжина відстійника

$$L = V_{cp} \cdot t, \quad (1.34)$$

де  $V_{cp}$  – середня швидкість руху води, м/с (у проточній частині відстійника обирають  $V_{cp} = 5-10$  мм/с);

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

$$t = \frac{H}{U_0}, \quad (1.35)$$

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

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

Ширина відстійника, м, обчислюється за такою формулою:

$$B = \frac{Q}{V_{cp} \cdot H}. \quad (1.36)$$

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

### *Радіальні відстійники*

Найбільше поширення під час очищення стічних вод металургійних виробництв отримали 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 у 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 зі 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 тощо.

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

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

$$F = \frac{Q}{q_{уд}}. \quad (1.37)$$

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

$$F_1 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (1.38)$$

де  $D$  – діаметр відстійника, 30 м;

$d$  – діаметр камери флокуляції, 10 м.

Кількість відстійників обчислюється за такою формулою:

$$n = \frac{F}{F_1}. \quad (1.39)$$

### *Відкриті безнапірні гідроциклони і флокулятори*

Розрахунок всіх відкритих гідроциклонів здійснюється за величиною питомого гідравлічного навантаження.

1. Питоме гідравлічне навантаження на відкритий гідроциклон  $q_{hc}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> · год визначають за такою формулою:

$$q_{hc} = 3,6 \cdot K_{hc} \cdot U_0, \quad (1.40)$$

де  $U_0$  – гідравлічна крупність частинок, які необхідно видалити для забезпечення потрібного ефекту освітлення, мм/с;

$K_{hc}$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу гідроциклону та дорівнює для гідроциклонів: без внутрішніх пристроїв – 0,61; із конічною діафрагмою та внутрішнім циліндром – 1,98.

Загальна площа дзеркала води у гідроциклонах  $F_{hc}$ , м<sup>2</sup>, обчислюється за такою формулою:

$$F_{hc} = \frac{Q_w}{q_{hc}}, \quad (1.41)$$

де  $Q_w$  – витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/год.

Продуктивність одного гідроциклону  $Q_{hc}$ , м<sup>3</sup>/год:

$$Q_{hc} = 0,785 \cdot q_{hc} \cdot D_{hc}^2, \quad (1.42)$$

де  $D_{hc}$  – діаметр гідроциклону, м.

Кількість гідроциклонів  $N$ , шт:

$$N = \frac{Q_w}{Q_{hc}} \quad (1.43)$$

Висота циліндричної частини гідроциклону  $H_{ц}$ , м обчислюється за такою формулою:

$$H_{ц} = D_{hc} + 0,5. \quad (1.44)$$

Повна висота гідроциклону  $H_{hc}$ , м, обчислюється за такою формулою:

$$H_{hc} = H_{ц} + H_{к} = H_{ц} + \frac{D_{hc}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (1.45)$$

де  $H_{к}$  – висота конічної частини гідроциклону, м;

$\alpha = 60^\circ$  – кут конічної частини.

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

Ефект роботи гідроциклону значно збільшується під час використання коагулянтів. Так, 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.

#### *Розрахунок багатоярусного гідроциклону*

1. Розраховується питоме гідравлічне навантаження, що доводиться на один ярус гідроциклону  $q_{hc}$ , м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год) за формулою (1.40).

Коефіцієнт пропорційності  $K_{hc}$  визначається за такою формулою:

$$K_{hc} = \frac{0.75 \cdot n_{ti} \cdot (D_{hc}^2 - d_{en}^2)}{D_{hc}^2}, \quad (1.46)$$

де  $n_{ti}$  – кількість ярусів обирається від 4-х до 20-ти;

$D_{hc}$  – діаметр гідроциклону, що обирається від 2-х до 6-ти м;

$d_{en}$  – діаметр кола, на якому розташовуються розтруби випусків 0,6–1,4 м.

Для багатоярусного гідроциклону з периферійним відбором освітленої води коефіцієнт пропорційності визначається за такою формулою:

$$K_{hc} = \frac{1,5 \cdot n_{ti}^1 \cdot (D_{hc}^2 - d_d^2)}{D_{hc}^2} \quad (1.47)$$

де  $n_{ti}^1$  – кількість пар ярусів (за один ярус обирається прямоточна та протиточна частини) 4–20;  $d_d$  – діаметр отвору середньої діафрагми пари ярусів від 0,9 м до 1,6 м.

2. Продуктивність одного апарату багатоярусного гідроциклону (витрата води, що може подаватися на один ярус), м<sup>3</sup>/год:

$$Q_{hc} = 0.785 \cdot q_{hc} \cdot D_{hc}^2, \quad (1.48)$$

3. Кількість ярусів обирається не менше двох:

$$n = \frac{Q_w}{Q_{hc}} \quad (1.49)$$

де  $Q_w$  – витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/год.

4. Кількість робочих апаратів  $N$ , шт:

$$N = \frac{n}{n_{gr}} \quad (1.50)$$

5. Продуктивність одного апарату  $Q_{hc}$ , м<sup>3</sup>/год:

$$Q_{hc} = Q_{hc}^1 \cdot n_{ti} \quad (1.51)$$

*Флокулятор* – апарат, в якому суміщені 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 вихідною 3–4 г/л; концентрація масел в очищеній воді не перевищує 40 мг/л із вихідною 100 мг/л.

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

Порядок розрахунку флокуляторів такий:

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

$$Q_1 = q_{num} \cdot S_{\phi}, \quad (1.52)$$

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

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

2. Визначають кількість апаратів, шт., за такою формулою:

$$n = \frac{Q}{Q_1}, \quad (1.53)$$

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

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

$$W_{\kappa} = \frac{\pi}{4} (D_{\phi}^2 - D_{\kappa}^2) \cdot H, \quad (1.54)$$

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

$D_{\kappa}$  – діаметр камери, м ( $D_{\kappa} = 10,6$  м);

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

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

$$W_{\text{відст}} = \frac{\pi \cdot D_{\kappa}^2}{4} \cdot H. \quad (1.55)$$

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 такою залежністю, м<sup>2</sup>:

$$F_{\phi} = \frac{\alpha \cdot Q}{V_{\phi}}, \quad (1.56)$$

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 фільтру, м<sup>3</sup>/год, визначається за такою формулою:

$$q_{\phi} = \frac{F_{\phi} \cdot q_{\text{пр}} \cdot t \cdot n}{24}, \quad (1.57)$$

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 ( $n = 1-2$ ).

### 1.5 Очищення стічних вод гальванічних виробництв

Очищення ціано- і хромовмістких рідких відходів здійснюється на установках періодичної і безперервної дії. Під час очищення за схемою періодичної дії стоки надходять до накопичувача, звідки подаються в реактор із безперервним перемішуванням, що обладнаний приладами автоматичного регулювання подачі реагентів до необхідного рН-середовища. Після знешкодження вода відводиться для нейтралізації і відстоювання.

Під час очищення за схемою безперервної дії рідкі відходи безперервним потоком через накопичувач надходять у камеру реактора, куди за допомогою автоматичного пристрою подаються необхідні реагенти до оптимального значення рН-середовища. Далі знешкоджена вода змішується з кислотно-лужними стоками і скеровується для нейтралізації і відстоювання.

#### *Метод нейтралізації*

Дозу реагентів для обробки стічних вод належить визначати із умов повної нейтралізації кислот або лугів, які в них містяться (табл. 1.2), а також виділення в осад сполук важких металів, якщо вони утворюються у стічній воді. Надлишок реагенту повинен складати не менше 10 % від розрахункової кількості.

Таблиця 1.2 – Витрата реагентів для нейтралізації 100 % кислот або лугів, кг/кг

Луги	Кислоти			
	сірчана	соляна	азотна	оцтова
Вапно негашене CaO	0,56/1,79	0,77/1,3	0,46/2,2	0,47/2,15
Вапно гашене Ca(OH) <sub>2</sub>	0,76/1,32	1,01/0,99	0,59/1,7	0,62/1,62
Сода кальцинов.	1,08/0,93	1,45/0,69	0,84/1,19	0,88/1,14
Їдкий натр NaOH	0,82/1,22	1,1/0,91	0,64/1,57	0,67/1,5
Примітка. В чисельнику показана витрата лугу на 1 г кислоти, в знаменнику – витрата кислоти на 1 г лугу.				

Оскільки в кислих та лужних виробничих стічних водах завжди наявні іони важких металів, то дозу реагенту необхідно визначати також із врахуванням їхнього виділення в осад (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Кількість реагентів, що необхідно для видалення металів

Метали, г-іон	Реагенти			
	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaOH
Цинк	0,85	1,13	1,6	1,22
Нікель	0,95	1,26	1,8	1,36
Мідь	0,88	1,16	1,66	1,26
Залізо	1,0	1,32	1,9	1,43
Свинець	0,27	0,36	0,51	0,38

Кількість реагентів, кг, для нейтралізації стічних вод визначається за формулою

$$G = K \frac{100}{B} Q \alpha A, \quad (1.58)$$

де  $K$  – коефіцієнт запасу витрати реагенту порівняно з теоретичним (для вапняного молока дорівнює 1,1, для сухого вапна – 1,5);

$B$  – кількість активної частини у товарному продукті, %;

$Q$  – кількість стічних вод для нейтралізації, м<sup>3</sup>;

$A$  – витрата реагенту для нейтралізації, кг/кг (табл. 1.2);

$A$  – концентрація кислоти або лугу, кг/м<sup>3</sup>.

Під час нейтралізації кислих стоків, що містять солі важких металів, кількість реагенту визначається за такою формулою:

$$G = K \frac{100}{B} Q \cdot (\alpha A + b_1 C_1 + b_2 C_2 + \dots + b_n C_n), \quad (1.59)$$

де  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – концентрація металів у стічних водах, кг/м<sup>3</sup>;

$b_1, b_2, \dots, b_n$  – кількість реагенту, що потрібний для переведення металів із розчиненого стану в осад (табл. 1.3).

У загальному випадку витрата реагенту  $\alpha$  розраховується за такими формулами:

1. У разі нейтралізації кислоти лугом

$$\alpha = 10^{-pH} \frac{E_L}{E_K}, \quad (1.60)$$

де  $pH$  – водневий показник розчину до нейтралізації;

$E_L$  – еквівалентна маса лугу, г/моль.

$E_K$  – еквівалент кислоти;

$$E_K = \frac{M_L}{K}, \quad (1.61)$$

де  $M_L$  – молярна маса лугу, г/моль;

$K$  – кислотність лугу (кількість гідроксильних груп у молекулі);

$$E_K = \frac{M_K}{O_c}, \quad (1.62)$$

де  $M_K$  – молярна маса кислоти, г/моль;

$O_c$  – основність кислоти (кількість рухливих атомів водню в молекулі);

2. У разі нейтралізації лугу кислотою

$$\alpha = 10^{pH-14} \frac{E_K}{E_L}. \quad (1.63)$$

Кількість сухого осаду, що утворюється під час нейтралізації 1 м<sup>3</sup> стічної води, визначається за формулою

$$M = \frac{100A}{B}(\alpha + 1 - ab), \quad (1.64)$$

де  $b$  – стехіометрична кількість води, що утворюється в реакціях нейтралізації, кг/кг нейтралізуючого агенту.

Величина  $b$  складає: для гашеного вапна 0,486; негашеного – 0,321; кальцинованої соди – 0,585 (з урахуванням виділення CO<sub>2</sub>); каустичної – 0,45; амоніаку – 0.

Об'єм осаду, що утворюється під час нейтралізації 1 м<sup>3</sup> стічної води сполуками кальцію, визначається за формулою

$$V_{oc} = \frac{100M}{(100 - W_{oc}) \cdot \rho}, \quad (1.65)$$

де  $V_{oc}$  – об'єм осаду, що утворився під час нейтралізації 1 м<sup>3</sup> стічної води;

$W_{oc}$  – вологість осаду, %;

$\rho$  – щільність осаду, кг/м<sup>3</sup>.

## 1.6 Розрахунок флотаційних установок

Для здійснення процесу розділу фаз застосовують прямокутні (з горизонтальним або вертикальним рухом води) і круглі флотокамери. Об'єм флотокамер складається з об'ємів робочої зони (глибина 1–3 м), зони формування і накопичування піни (глибина 0,2–1 м) і зони осаду (глибина 0,5–1 м). Гідравлічне навантаження – 3–6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год). Кількість флотокамер повинна бути не менше 2-х, причому всі робочі.

Під час проєктування імPELLерних, пневматичних і установок з диспергуванням повітря через поруваті матеріали необхідно обирати: тривалість флотації 20–30 хв; кругову швидкість імPELLера 12–15 м/с, його діаметр 200–700 мм; глибину води в камері флотації 1,5–2 м; квадратну в плані камеру зі стороною, що дорівнює  $6d$ .

Об'єм флотаційної камери визначається за формулою

$$W_{к.ф} = Q \cdot t, \quad (1.66)$$

де  $Q$  – витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/год;

$t$  – тривалість флотації, год.

### *Розрахунок установок напірної флотації*

Під час розрахунку напірного флотатора необхідні такі вихідні дані: витрата стічних вод ( $Q_{\phi}$ ), час перебування у флотаторі ( $t_0$ ), висота флотатора ( $H_0$ ), час робочого стану флотатора ( $t_p$ ).

Діаметр флотаційної камери  $D_k$  визначається за формулою

$$D_k = 0,6 \sqrt{\frac{Q_{\phi}}{\nu}}, \quad (1.67)$$

де  $\nu$  – швидкість висхідного потоку, дорівнює 6 мм/с;

$Q_{\phi}$  – витрата стічних вод, що надходять у флотатор, м<sup>3</sup>/год.

Діаметр флотатора визначається за формулою

$$D_{\phi} = \sqrt{\frac{4Q_{\phi} \cdot t_0}{\pi \cdot H_0}}, \quad (1.68)$$

де  $t_0$  – час перебування у флотаторі, хв;

$H_0$  – висота флотатора, м.

Витрата стічних вод, що надходять на очистку, м<sup>3</sup>/добу, визначається за формулою

$$Q = Q_{\phi} \cdot t_p \quad (1.69)$$

де  $t_p$  – час робочого стану одного флотатора, год/добу, дорівнює тривалості робочої зміни – 8 год.

Об'єм флотокамери,  $m^3$ , визначається за формулою

$$W = Q \cdot t_0 \quad (1.70)$$

Площа поперечного перетину флотокамери,  $m^2$ , визначається за формулою

$$F_2 = \frac{Q}{v} \quad (1.71)$$

Робоча глибина рідини, м, визначається за формулою

$$h_2 = \frac{W}{F_2} \quad (1.72)$$

#### *Розрахунок імпелерної флотаційної установки*

Витрата стічних вод  $Q$ ,  $m^3/год$ , тривалість флотації  $t$ , год, розміри флотатора (корисна місткість,  $m^3$ , корисна глибина,  $h_{фл}$ , вважаються заданими).

У таблиці 1.4 наведено рекомендований порядок розрахунку.

Таблиця 1.4 – Порядок розрахунку імпелерних флотаторів

Величина та розмірність	Формула або значення
1	2
1 Продуктивність одного флотатора, $m^3/год$	$q_{фл} = W_{ф.к.} \cdot \frac{1-\alpha}{t}$
1.1 Корисна місткість флотаційної камери, $m^3$	$W_{ф.к.}$ – за паспортом флотатора
1.2 Коефіцієнт аерації (частка повітря у водоповітряній суміші)	$\alpha = 0,30 - 0,35$ (обирається)
1.3 Тривалість флотації, год.	$t = 0,20 - 0,30$ , год
2 Статичний напір, що створюється мішалкою, м	$H_{ст} = h_{фл}$ , $h_{фл}$ – за паспортом флотатора
3 Глибина води під час заповнення флотаційної камери (максимальна), м	$h_{max} = \frac{H_{ст}}{\gamma_{см}}$
3.1 Питома вага водоповітряної суміші, $кг/дц^2$	$\gamma_{см} = \gamma_в(1-\alpha)$ $\gamma_в = 1,0$ – питома вага води

Продовження таблиці 1.4

1	2
4 Швидкість обертання мішалки, м/с	$U = \sqrt{\frac{H_{ст} 2g}{\varphi}}$
4.1 Коефіцієнт напору	$\varphi = 0,20 - 0,30$ , (обирається)
5 Потужність двигуна, кВт	$N = \frac{\gamma_{см} q_{фл} H_{ст}}{3,6 \cdot 102 \eta}$
5.1 КПД мішалки	$\eta = 0,2 - 0,3$ , (обирається)
6. Кількість флотаторів, шт	$n = \frac{Q_{расч}}{q_{фл}}$

### 1.7 Очищення промислових стічних вод методами електрокоагуляції та електрофлотокоагуляції

#### *Розрахунок установок електрокоагуляції*

Під час проектування електрокоагуляційних установок необхідно враховувати такі рекомендації:

- рН вихідної рідини повинне перебувати в межах 3–6;
- товщина електродів дорівнює 6–10 мм;
- відстань між електродами – 10–30 мм;
- як матеріал електродів необхідно вибирати листи низькосортної сталі або алюмінію;
- тривалість обробки вибирається залежно від виду оброблюваної рідини й не повинна перевищувати 10–15 хв;
- кількість робочих ванн визначається розрахунком і обирається не менш двох (у разі загальної кількості три електрокоагулятори обирається один резервний апарат; якщо є більше 3-х робочих апаратів, обираються два резервні;
- величина анодної щільності струму – у межах 50–200 А/м<sup>2</sup>;
- швидкість руху рідини через електродний простір для запобігання засміченню повинна підтримуватися 0,03 м/с.

Розрахунок електрокоагуляційних установок полягає у визначенні їхніх розмірів й електротехнічних параметрів.

1. Об'єм електролізера, м<sup>3</sup>, визначається за формулою

$$V_{эл} = \frac{q \cdot \tau}{n}, \quad (1.73)$$

де  $q$  – витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/с;

$\tau$  – тривалість обробки, с;

$n$  – кількість електролізерів.

2. Питомі витрати електроенергії, кВт·год/м<sup>3</sup>, визначається за формулою

$$W_{нум} = \frac{I \cdot U \cdot \tau}{1000 \cdot Q}, \quad (1.74)$$

де  $I$  – величина струму, А;

$U$  – напруга в електролізері, В;

$\tau$  – тривалість обробки, год;

$Q$  – витрата стічної рідини, м<sup>3</sup>/год.

3. Сила струму, А, визначається за формулою

$$I = \frac{D \cdot Q \cdot F}{\eta \cdot M_{эк}}, \quad (1.75)$$

де  $D$  – доза металу, г/м<sup>3</sup> (визначається експериментально або за довідковою літературою);

$F$  – число Фарадея, 26,8 А·год;

$Q$  – витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/год;

$\eta$  – вихід по струму, що визначається експериментально (орієнтовно за довідковою літературою);

$M_{эк}$  – еквівалентна маса використовуваного електрода, г/моль.

4. Площа анодних пластин в одному електролізері, м<sup>2</sup>:

$$S_a = \frac{I}{2 \cdot 100 \cdot n \cdot i_a}, \quad (1.76)$$

де  $i_a$  – анодна щільність струму, А/мм<sup>2</sup>;

2 – коефіцієнт, що враховує роботу обох сторін анода.

5. Загальна кількість електродних пластин визначається за формулою

$$n_{пл} = \frac{v - 2 \cdot v_2}{\delta + v_1}, \quad (1.77)$$

де  $v$  – ширина електролізера, м (обирається конструктивно);

$v_1$  – відстань між пластинами, м;

$v_2$  – відстань між крайніми пластинами та стінками електролізера, м;

$\delta$  – товщина електродів, м.

6. Довжина електролізера, м, визначається за формулою

$$l = l_{nl} + 2e_l. \quad (1.78)$$

Таблиця 1.5 – Питомий опір і щільність струму, що допускається у деяких видах струмопроводів

Найменування матеріалу	Питомий опір, Ом·м	Щільність струму, що допускається, А/мм <sup>2</sup>
Алюміній	0,026–0,0029	2,0
Мідь	0,0175–0,018	3,0
Сталь	0,103–0,14	1,5

7. Висота пластини, м, визначається за формулою

$$h_{nl} = \frac{S_a}{n_a \cdot l_{nl}}, \quad (1.79)$$

де  $n_a$  – кількість анодних пластин, дорівнює  $n_{пл} / 2$ .

8. Висота електрокоагулятора, м, визначається за формулою

$$h = h_{nl} + h_n + h_{cmp}, \quad (1.80)$$

де  $h_n$  – висота нейтрального шару, дорівнює 0,3 м;  $h_{cmp}$  – висота будівельного борта, дорівнює  $\sim 0,2$  м.

9. Фактична тривалість перебування рідини в робочій камері електролізера, год, визначається за формулою

$$\tau_\phi = \frac{V'}{q'_p}, \quad (1.81)$$

де  $q'_p$  – розрахункова витрата одного електролізера, м<sup>3</sup>/с;  $V'$  – робочий об'єм одного електролізера з урахуванням обсягу, який займають електроди, м<sup>3</sup>.

$$V' = V - n_{nl} h_{nl} \cdot \delta. \quad (1.82)$$

10. Швидкість руху води між електродними пластинами, м/с, визначається за формулою

$$v = \frac{q'_p}{W}, \quad (1.83)$$

де  $W$  – робочий перетин електролізера, м.

$$W = e \cdot l - l_{nl} \cdot \delta \cdot n_{nl}. \quad (1.84)$$

## 1.8 Біологічне очищення висококонцентрованих стічних вод

Стічні води підприємств харчової промисловості (молоко-, сир- і винзаводів, кондитерських фабрик, м'ясокомбінатів тощо) характеризуються високою концентрацією забруднень й значно відрізняються за складом, умовами утворення, об'ємом та фізико-хімічними властивостями.

Біологічні методи очищення стічних вод поділяють на дві групи за типами мікроорганізмів, що беруть участь у переробці забруднювачів стоків:

1. Аеробні біологічні методи очищення суміші промислових і побутових стічних вод (мікроорганізмам для їхньої життєдіяльності необхідний кисень).
2. Очищення стоків анаеробними мікроорганізмами.

Очищення висококонцентрованих за органічними речовинами стічних вод підприємств харчової промисловості за допомогою традиційних технологій (з аеротенками, біофільтрами) має недостатню ефективність. Використання багатоступневих технологій, наприклад технології з двоступневими аеротенками, характеризуються значними витратами електроенергії на аерацію, рециркуляцію активного мулу, обробку та утилізацію значних обсягів осадів, що утворюються під час очищення стічних вод при тому, що очищена вода зазвичай не задовольняє вимог скиду у природні водойми, зокрема за сполуками азоту та фосфору.

У таблиці 1.6 подана порівняльна характеристика анаеробного й аеробного оброблення.

Таблиця 1.6 – Порівняльний аналіз ефективності роботи аеробних та анаеробних реакторів

№з/п	Анаеробний реактор	Аеробний реактор
1	2	3
1	Стійкість до високих концентрацій органічних речовин (задовільно працюють за БСК більше ніж 1 000 мг/л)	Стійкість до високих концентрацій органічних речовин (працюють за БСК до 100 мг/л)
2	Стійкість до непостійної подачі та складу стічних вод	Чутливість до непостійної подачі та складу стічних вод
3	Стійкість до нестачі біогенних елементів у стічній воді	Чутливість до нестачі біогенних елементів у стічній воді

Продовження таблиці 1.6

1	2	3
4	Низький приріст мулу порівняно з аеробними реакторами (менший у 10 разів)	Проблема утилізації утвореного надлишкового мулу
5	Невисокі експлуатаційні витрати (економія електричної енергії на мішалках)	Високі експлуатаційні витрати (необхідність аерації)
6	Одержання біогазу	Немає
7	Висока стійкість до токсикантів та здатність до відновлення працездатності	Невисока стійкість до токсикантів і низька здатність до відновлення працездатності
8	Високий енергетичний рівень кінцевого продукту	Низький енергетичний рівень кінцевого продукту
9	Невисока швидкість проходження процесів	Висока швидкість проходження процесів
10	Низький приріст біомаси (під час першого запуску)	Високий приріст біомаси (під час першого запуску)
11	Середній ступінь очищення за БСК (60–90 %)	Високий ступінь очищення за БСК (95 %)
12	Не вилучають азот і фосфор	Вилучаються азот і фосфор
13	Витрати на герметизацію, підігрівання	Немає
14	Вибухонебезпечний	Немає

## 2 РЕКОМЕНДАЦІ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ

### 2.1 Структура й оформлення розрахунково-графічного завдання

Розрахунково-графічне завдання (РГЗ) виконують на тему «Очистка стічних вод механічних цехів машинобудівного заводу» на основі завдання, яке видає викладач (вихідні дані за варіантами наведено у дод. А).

Метою РГЗ є вивчення особливостей цього промислового підприємства, умов утворення стічних вод, розробка схеми очистки стічних вод з метою їх повторного використання у виробництві, розрахунок очисних споруд.

У процесі виконання РГЗ студенти закріплюють теоретичні знання, які дозволяють обґрунтувати вибір методу й схеми очистки промислових стічних вод, підібрати набір очисних споруд; опановують навички роботи з науково-дослідною і довідковою літературою.

У результаті виконання індивідуального завдання здобувачі повинні вміти:

- виконати теоретичне обґрунтування вибору електрохімічного апарату і технологічної схеми очищення виробничих стічних вод;
- дати оцінку якісних і кількісних показників води, що обробляється з метою вибору методу очищення та матеріалу електродів;
- написати реакції, що відбуваються у процесі електрохімічного очищення на електродах та в електроліті;
- визначити фактори та діапазон їх варіювання, що забезпечують оптимальний режим очищення;
- виконати розрахунок питомої витрати електрики, величини струмового навантаження на електроди, кількість електродів у блоці, об'єм електродного блока, габарити електроапарата, витрату металу електродів на об'єм оброблюваної рідини, тривалість роботи електродної системи тощо;
- зобразити принципову технологічну схему у вигляді рисунку;
- оцінити можливість повторного використання очищеної води.

Розрахунково-графічна робота складається з таких елементів:

- титульний аркуш;
- завдання на спеціальному бланку;
- зміст;
- основна частина, що містить короткий опис характеристики підприємства, його основних цехів, джерел утворення стічних вод,

обґрунтування методу й технологічної схеми очистки відповідно до плану розрахунково-пояснювальної записки;

– розрахункова частина, що містить розрахунок параметрів і схеми очисних споруд;

– список джерел.

Обсяг розрахунково-пояснювальної записки становить 10–12 сторінок рукописного або друкованого тексту з рисунками і схемами.

Вихідні дані для виконання завдання за варіантами наведені в додатку А.

Зразок завдання на виконання РГЗ подано у додатку Б.

Відповідно до завдання необхідно розробити схему та запропонувати споруди для очищення вказаної категорії стічних вод машинобудівного підприємства, виконати розрахунок очисних споруд, описати принцип їх роботи та основні технічні параметри.

Основна частина роботи повинна містити не менше трьох розділів:

1) теоретичне обґрунтування вибору методу та складу споруд технологічної схеми очищення стічних вод;

2) розрахунок апаратів для очистки стічних води;

3) розробку технологічної схеми очищення.

## **2.2 Рекомендації до виконання основних розділів розрахунково-графічного завдання**

### **2.2.1 Джерела утворення стічних вод на підприємстві**

Під час використання води для виробничих потреб, вона забруднюється або нагрівається, змінює свої первинні властивості, що робить її непридатною для подальшого використання.

Для своєчасного й організованого відведення промстоків, очищення й знешкодження їх до необхідного ступеня з метою подальшого використання або випуску у водойми (міську каналізацію), а також для обробки й утилізації осадів на промпідприємствах влаштовують водовідвідні системи.

На підприємствах утворюються три основні категорії стічних вод:

1) виробничі (промстоки) використовуються у технологічному процесі виробництва і відрізняються великою різноманітністю залежно від умов утворення, кількості й особливо видів окремих забруднень та їх концентрацій;

2) побутові утворюються від санітарних вузлів виробничих будинків, душових установок, наявних на території промпідприємств;

3) поверхнево-зливовий стік – дощові води, кількість яких залежить від клімату району розташування і площі промислового майданчика, виду покриттів.

Для вирішення конкретних завдань стосовно водовідведення та очищення виробничих стічних вод необхідно знати обсяги промстоків, види забруднень, їх концентрацію, динаміку та місця їх утворення, використання, необхідний ступінь очищення.

До машинобудівної галузі належать автомобільні, тракторні заводи, заводи комбайнобудування, сільськогосподарських машин, електроапаратури, підшипникові заводи, верстатобудівні, інструментальні тощо.

Основними споживачами води й відповідно джерелами утворення стічних вод на машинобудівних підприємствах є металургійний комплекс, механічні цехи, складально-випробувальні цехи, відділення з обробки поверхні металу, гальванічне виробництво й допоміжні виробництва (енергетичне господарство, ремонтні цехи тощо).

Характеристика машинобудівельних підприємств, класифікація стічних вод від основних цехів, основні види забруднень та методи очистки детально висвітлені в літературі [2, с. 355, 356].

### 2.2.2 Кількість і склад промислових стічних вод

Вихідними даними під час проєктування систем водовідведення промпідприємств або під час аналізу діючих є якісно-кількісна характеристика стічних вод.

#### *Визначення розрахункових витрат*

Розрахункові витрати промислових стічних вод, що надходять на очисні споруди визначаються за такими формулами:

– добова витрата, м<sup>3</sup>/доб.

$$Q_{доб} = N \cdot M, \quad (2.1)$$

де  $N$  – норма водовідведення на одиницю продукції або сировини, що переробляється, м<sup>3</sup>/од. продукції;

$M$  – добова продуктивність цеху, установок по сировині або продукції, одиниць продукції за добу;

– секундна витрата, л/с

$$q_{c \max} = \frac{N \cdot M_{зм} \cdot K_{год}}{T \cdot 3,6}, \quad (2.2)$$

де  $M_{зм}$  – змінна продуктивність цеху, установки по сировині або продукції, од. прод./зм.;

$K_{год}$  – коефіцієнт годинної нерівномірності утворення промстоків;

$T$  – тривалість роботи цеху в зміну, год.

На практиці кількість промстоків від окремих установок або цехів може коливатися в широких межах: від декількох до десятків тисяч м<sup>3</sup>/год. Необхідно розуміти й враховувати нерівномірність утворення промстоків і для цієї мети передбачати акумулювальні ємкості необхідного об'єму під час проєктування.

У РГР вивчається одна з категорій стічних вод машинобудівної промисловості. Це стічні води, що утворюються переважно в механоскладальному виробництві від спеціальних миючих машин у процесі підготовки (мийки) деталей перед фарбуванням.

Стічні води механічних цехів містять переважно дрібнодисперсні завислі речовини, нафтопродукти, які змиваються з поверхні металу, й різні миючі, поверхнево-активні речовини. Гідралічна крупність завислих речовин коливається у межах 0,1–0,2 мм/с. Становлять ці стічні води приблизно 10–15 % загальної кількості використовуваних вод. Вони близькі за складом до дощових і талих вод, стоків від поливу території.

Стічні води зазначеної категорії після очищення до концентрації механічних домішок 10–15 мг/л, масел – 5–20 мг/л доцільно повертати на технологічні потреби до тих виробництв, де вони були отримані, а також використовувати для підживлення систем оборотного водопостачання і поливу території. У разі повернення води для підживлення очищена вода має пройти стабілізаційну обробку.

### 2.3 Способи очищення промислових стічних вод

Вибір оптимальних і ефективних методів і споруд залежить від якісної характеристики промстоків, їхньої кількості, необхідного ступеня очистки, місцевих умов і можливостей.

Для очищення стічних вод машинобудівних підприємств застосовують переважно механічні методи (проціджування, відстоювання, фільтрування), хімічні (нейтралізація, коагуляція, флокуляція), фізико-хімічні (флотація, електрохімічні методи), а також комбіновані.

Очищення та доочищення стічних вод вказаної категорії, що забруднені механічними домішками і маслами, можна здійснювати за схемою, поданою на рисунку 2.1. Водночас можна обрати варіант використання електрокоагуляції, напірної флотації або реагентної коагуляції.

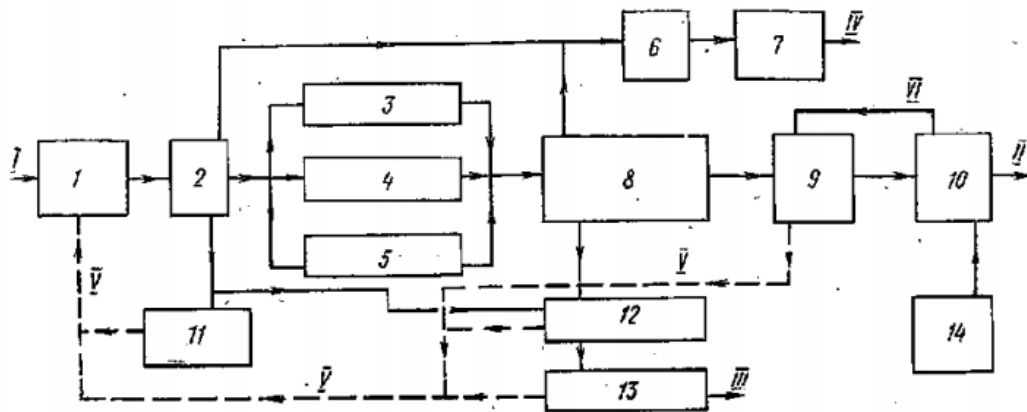


Рисунок 2.1 – Схема очищення стічних вод, забруднених механічними домішками і маслами:

I – стічні води; II – очищена вода; III – осад; IV – масла; V – фільтрат;  
VI – регенерація фільтрів;

1 – усереднювач; 2 – пісковловлювачі; 3 – установка електрокоагуляції;  
4 – установка реагентної напірної флотації; 5 – установка реагентної коагуляції; 6 – маслозбірник; 7 – установка зневоднення масел; 8 – відстійники;  
9 – фільтри доочищення; 10 – резервуари очищеної води; 11 – піскові майданчики, 12 – ущільнювачі осаду; 13 – установка зневоднення осаду,  
14 – установка стабілізаційної обробки води

Для варіанту очищення з використанням методу електрокоагуляції обирають такі розрахункові параметри:

Очищення з використанням методу електрокоагуляції

Електроди.....	сталеві
Щільність струму, А на 1 м <sup>2</sup> анодів.....	50–100
Напруга електродної системи, В.....	до 12
Тривалість перебування стічних вод в електричному полі, с.....	15–30
Витрата металу, г на 1 м <sup>3</sup> стічних вод.....	10–20
Товщина електродів, мм.....	7–9
Відстань між електродами, мм.....	6–8
pH оброблюваних стічних вод.....	5,5–7,5

У разі застосування реагентної напірної флотації використовують сірчаноокислий алюміній дозою 20–30 мг/л за активною речовиною.

У разі варіанту реагентної коагуляції можна застосовувати сірчаноокислий алюміній дозою 30–60 мг/л та вапняне молоко для підтримання рН оброблюваних стічних вод у межах 7,5–8,4. Тривалість змішування стічних вод із реагентами 10–15 хв.

## **2.4 Вибір і обґрунтування методу й складу споруд для очищення виробничих стічних вод**

Вибір методів очистки залежить від виду домішок у промислових стічних водах, розрахункової витрати, необхідного ступеня очистки з урахуванням повторного використання або випуску, а також умов і можливостей конкретного промислового підприємства, техніко-економічного порівняння варіантів.

Основною метою очищення промислових стічних вод є зменшення концентрації домішок до припустимих меж перед їх повторним використанням або випуском у водойми чи міську каналізацію.

Серед альтернативних електрохімічному методу необхідно розглянути реагентні, іонообмінні, сорбційні методи, а також сполучення декількох методів. У разі оцінки методів очищення та визначення складу споруд (апаратів, обладнання) треба враховувати такі фактори: продуктивність споруд, концентрацію забруднення, вимоги до очищеної води, можливість утилізації корисних компонентів і повторного використання стічних вод, необхідну площу під очисні споруди, можливість механізації та автоматизації процесу очищення, питомі показники витрат енергоресурсів, економічні показники тощо.

Після вибору та обґрунтування електрохімічного методу необхідно розглянути типи електроапаратів (електролізерів, електрокоагуляторів, електрофлотаторів, електрофлотокоагуляторів) і конструкції, зокрема комбіновані, що забезпечують потрібну ефективність очищення. Потім виконують розрахунок апарата, що найбільш відповідає умовам завдання. Водночас необхідно написати можливі реакції, що відбуваються на катодах, анодах та в електроліті у процесі очищення, викласти теоретичні засади електрохімічної обробки води, вплив різних факторів (рН-середовища, температури, концентрації забруднення, густини струму, тривалості електролізу) та визначити оптимальні умови. Після визначення типу апарата, його габаритів, оптимальних технологічних параметрів процесу очищення починають компонувати технологічну схему. Для порівняння необхідно

розглянути за літературними джерелами схеми електрохімічного очищення такої або близької за складом категорії стічних вод.

У процесі теоретичного обґрунтування застосування електрохімічного методу і типу апарату треба визначити особливості технологічного процесу, умови його здійснення. Необхідно показати переваги й недоліки альтернативних методів, що розглядаються здобувачами.

Для цієї категорії стічних вод машинобудівного підприємства (стічних вод механічних цехів, забруднених завислими речовинами, маслами й нафтопродуктами) з урахуванням якісного складу цих вод, а також аналізу досвіду досліджень, проектування та експлуатації нових типів очисних споруд, під час виконання розрахунково-графічної роботи здобувачам рекомендується обирати метод електрофлотації або електрокоагуляції з подальшим відстоюванням і фільтруванням. Горизонтальний відстійник рекомендується обладнати тонкошаровими блоками, а фільтрування здійснювати через шар пінополіуретану з регенерацією завантаження механічним способом.

## 2.5 Розрахункова частина

### 2.5.1 Визначення розрахункової витрати виробничих стічних вод

Розрахункові витрати виробничих стічних вод, що надходять на очисні споруди визначаються за такими формулами:

– добова витрата, м<sup>3</sup>/добу

$$Q_{доб} = n \cdot N_{доб}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – норма водовідведення на одиницю продукції або сировини, що переробляється, м<sup>3</sup>/од. продукції;

$N_{доб}$  – добова продуктивність цеху, установок по сировині або продукції, одиниць продукції за добу;

– секундна витрата, л/с

$$q_{с\max} = \frac{n \cdot N_{зм} \cdot K_{год}}{T \cdot 3,6}, \quad (2.4)$$

де  $N_{зм}$  – змінна продуктивність цеху, установки по сировині або продукції, од. прод./зм;

$K_{год}$  – коефіцієнт годинної нерівномірності утворення промстоків;

$T$  – тривалість роботи цеху в зміну, год.

Норми водовідведення визначають за довідниковими даними, продуктивність і режим роботи задаються технологами. У розрахунково-графічній роботі норма водовідведення задається у вихідних даних.

На практиці кількість промстоків від окремих установок або цехів може коливатися в широких межах: від декількох до десятків тисяч м<sup>3</sup>/год. Необхідно розуміти й враховувати нерівномірність утворення стічних вод і тому передбачати акумулювальні ємкості необхідного обсягу під час проектування.

У розрахунково-графічній роботі розрахункову витрату стічних вод можна визначити за такою формулою:

$$Q = \frac{n \cdot N \cdot k_{200}}{T}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (2.5)$$

де  $n$  – норма водовідведення цього виробництва;

$N$  – продуктивність, од. прод. /рік;

$K_{200}$  – коефіцієнт годинної нерівномірності;

$T$  – тривалість роботи за рік,  $T = 2032$  год.

## 2.5.2 Розрахунок установки для електрофлотокоагуляції

### *Розрахунок електродного відділення*

Обсяг електродного відділення визначається з можливості розміщення в ньому електродної системи. Так, ширина секції установки  $A$  обирається залежно від продуктивності  $Q$ :  $A = 2$  м, якщо  $Q < 90$  м<sup>3</sup>/год, і  $A = 2,5\text{--}3$  м, якщо  $Q = 90\text{--}180$  м<sup>3</sup>/год.

1. Кількість електродів, розташовуваних у камері визначається за такою формулою:

$$n = (A - 2a + C) / (\delta + C), \quad (2.6)$$

де  $a = 100$  мм – величина проміжку між крайніми пластиками й стінками камери;

$C$  – величина проміжку між пластинами (15–20 мм);

$\delta$  – товщина пластин (6–10 мм).

2. Площа активної поверхні електродів, м<sup>2</sup>, визначається за формулою

$$f_{a.e} = \frac{E \cdot Q}{i}, \quad (2.7)$$

де  $E$  – питома кількість електричного струму, А·год/м<sup>3</sup>;

$Q$  – розрахункова витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/год;

$i$  – щільність струму на електродах, А/м<sup>2</sup> ( $i = 50\text{--}100$  А/м<sup>2</sup>).

$$E = \frac{C_{заг}}{0,01 \cdot C_{заг} + 15}, \text{ А} \cdot \text{год} / \text{м}^3, \quad (2.8)$$

де  $C_{заг}$  – загальна концентрація забруднень у стічній воді, мг/л;

$$C_{заг} = C_{зав.p} + C_{нафтопр} \text{ (за завданням).}$$

3. Площа однієї пластини електрода,  $\text{м}^2$ , визначається за формулою

$$f_e' = \frac{f_{a.e}}{n_e}. \quad (2.9)$$

Пластини рекомендується обирати квадратної форми. Тоді

довжина пластин дорівнює висоті  $l_e = h_e = \sqrt{f_e'}$ , м.

4. Довжина електродної камери, м, визначається за формулою

$$L_e = l_e + 2 \cdot a. \quad (2.10)$$

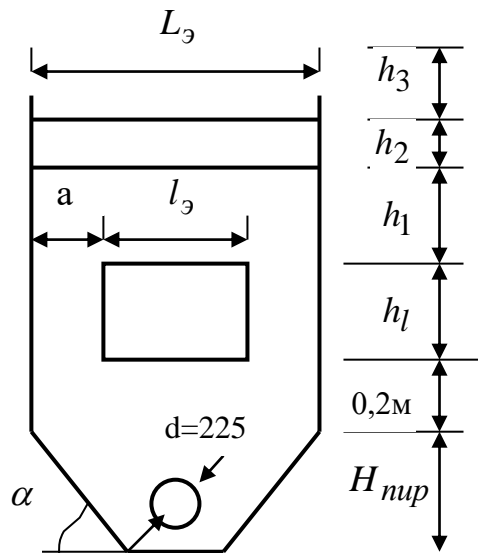


Рисунок 2.1 – Схема електродної камери

5. Об'єм електродної камери визначається за формулою

$$W_{e.к.} = A \cdot h_e \cdot L_e, \text{ м}^3. \quad (2.11)$$

6. Об'єм, який займають електроди в камері визначається за формулою

$$W_e' = l_e \cdot h_e \cdot \delta \cdot n_e. \quad (2.12)$$

7. Об'єм проточної частини визначається за формулою

$$W_{нр} = W_e - W_e'. \quad (2.13)$$

8. Час перебування стоків в електродній камері, с, визначається за формулою

$$t = \frac{W_{np}}{Q}. \quad (2.14)$$

Для розподілу води по площі електродного відділення передбачений розподільчий трубопровід, виготовлений із пластмаси, що розташовується на дні відділення. Під час вибору діаметра необхідно враховувати, що швидкість руху води повинна бути економічною. Для більш рівномірного розподілу рекомендується обирати отвори в розподільчому трубопроводі діаметром  $d_{омв} = 15-20$  мм.

Висота пірамідальної частини електродного відділення, м, визначається за формулою

$$H_{nir} = \frac{(L_e - (d_{mp} + 0,2)) \cdot tg\alpha}{2}, \text{ м}, \quad (2.15)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу стінок камери,  $\alpha = 45-60^\circ$ .

Кількість отворів у розподільчій трубі визначається за формулою

$$n_{омв} = \frac{f_{омв}}{f'_{омв}}, \text{ шт}, \quad (2.16)$$

де  $f_{омв}$  – загальна площа отворів, що визначається з умови, що швидкість руху води в отворі 1 м/с

$$f_{омв} = \frac{Q}{v_{омв}}. \quad (2.17)$$

Площа одного отвору, м<sup>2</sup>, визначається за формулою

$$f'_{омв} = \frac{\pi \cdot d_{омв}^2}{4}. \quad (2.18)$$

Крок отворів визначається за формулою

$$S = \frac{A}{2(n_{омв} - 1)}, \text{ м}. \quad (2.19)$$

Загальна висота електродного відділення, м, визначається за формулою

$$H_{e.к.} = H_{nir} + 0,2 + h_e + h_1 + h_2 + h_3, \quad (2.20)$$

де  $h_1 = 0,3-0,5$  м – висота захисного шару;

$h_2 = 0,1-0,15$  м – шар піни (шламу);

$h_3 = 0,15-0,2$  м – висота запасу.

Під час здійснення процесу електрофлотокоагуляції треба визначити кількість металу, що переходить у розчин, а також термін служб електродної системи.

Кількість металу, що переходить у розчин під час електрофлотокоагуляції визначається за формулою

$$m = k \cdot \mathcal{E} \cdot E, \text{ г/м}^3, \quad (2.21)$$

де  $k = 0,5-0,95$  – коефіцієнт виходу за струмом;

$\mathcal{E}$  – електрохімічний еквівалент, г/(А год), який дорівнює для  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  – відповідно 1,042; 0,695; 0,336.

Термін служби електродної системи визначається за формулою

$$T = \frac{M \cdot 1000}{m \cdot Q_{\text{доб}}}, \text{ діб}, \quad (2.22)$$

де  $M = \gamma \cdot \kappa_e \cdot f_e \cdot \delta \cdot n_e$  – маса електродів, що розчиняється під час електролізу, кг;

$\gamma$  – щільність металу електродів,  $\gamma = 7,87 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

$\kappa_e = 0,8-0,9$  – коефіцієнт використання матеріалу електродів;

$Q_{\text{доб}}$  – добова витрата стічних вод, м<sup>3</sup>/добу.

Очисна установка працює 8 год на добу.

### 2.5.3 Розрахунок відстійника

Для осадження завислих речовин і ефективності видалення утворених пінопродуктів передбачається горизонтальний відстійник, поєднаний із електродною камерою.

Для інтенсифікації процесу очистки, зменшення площі, яку займає установка, передбачається встановлення у горизонтальний відстійник тонкошарових елементів.

Технологічний розрахунок відстійника полягає у визначенні параметрів тонкошарових елементів (блоків) та розмірів самого тонкошарового відстійника, що забезпечують необхідний ефект освітлення.

Для забезпечення надійної роботи й стабільності якості проясненої води необхідно дотримуватися ламінарного режиму течії рідини у тонкошарових елементах.

1. Глибина відстійника, м, визначається за формулою

$$H = U_0 \cdot T. \quad (2.23)$$

2. Довжина зони відстоювання, м, визначається за формулою

$$L_{ел} = v_{\max} \cdot T, \quad (2.24)$$

де  $T$  – час відстоювання;  $T = \frac{H_{ел}}{\cos \alpha \cdot U_0}$ , с, (2.25)

$\alpha$  – кут нахилу тонкошарових елементів, дорівнює від  $30^\circ$  до  $75^\circ$ ;

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

$$U_0 = 0,121 + 0,179 \cdot C_{общ}^2 \cdot 10^{-6}. \quad (2.26)$$

3. Максимальна швидкість у тонкошарових елементах відстійника, мм/с, визначається за формулою

$$v_{\max} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu \cdot 1000}{4R}. \quad (2.27)$$

де  $Re_{кр}$  – критичне значення числа Рейнольдса під час руху рідини в елементах тонкошарового відстійника.

Тонкошарові відстійники розраховують на ламінарний рух рідин в елементах,  $Re_{кр} = 500-800$ , за такою формулою:

$$\nu = (25,04 - 5 \ln t) \cdot 10^{-7} \quad (2.28)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість стічних вод,  $m^2/s$  :

$t$  – температура стічних вод,  $^\circ C$ ;

$R$  – гідравлічний радіус елемента, м.

$$R = \frac{\omega_{ел}}{\chi_{ел}} = \frac{A \cdot H_{ел}}{2 \cdot (A + H_{ел})}, \quad (2.29)$$

де  $\omega_{ел}$  – площа поперечного перерізу елемента,  $m^2$ ;

$A$  – ширина установки;

$H_{ел} = 25-100$  мм;

$\chi$  – змочений периметр.

Здобувачам рекомендується обирати тонкошарові елементи із протитечієм напрямком руху рідини, тобто напрямком руху рідини протилежний напрямку руху осаду.

3. Перевірка умови стабільності потоку за критерієм Фруда визначається за формулою

$$\frac{v_{max}^2}{g \cdot R} = Fr_{кр} \geq 10^{-5}. \quad (2.30)$$

4. Питоме навантаження на тонкошаровий елемент визначається за формулою

$$q = \frac{v_{max}}{K} \cdot A \cdot H_{ел}, \text{ м}^3/\text{год на один елемент}, \quad (2.31)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що показує, у скільки разів максимальна швидкість більша зі середню.

$$K = 1,167 \cdot C_{заг}^{0,062}. \quad (2.32)$$

4. Кількість тонкошарових елементів визначається за формулою

$$n_{ел} = \frac{Q}{q}, \text{ шт.} \quad (2.33)$$

5. Горизонтальна відстань між пластинами визначається за формулою

$$S = \frac{H_{ел}}{\cos \alpha}. \quad (2.34)$$

6. Довжина тонкошарового блоку, м, визначається за формулою

$$L_{бл} = n_{ел} \cdot (S + \delta) + L_{ел} \cdot \cos \alpha, \quad (2.35)$$

де  $\delta$  – товщина стінки елемента, що дорівнює 3–4 мм.

8. Висота блоку, м, визначається за формулою

$$H_{бл} = L_{ел} \cdot \sin \alpha. \quad (2.36)$$

Матеріал елементів – склопластик.

9. Об'єм осаду, що утвориться у відстійнику за добу визначається за формулою

$$W_{ос} = \frac{T \cdot (C_1 - C_2) \cdot Q}{(100 - P) \cdot \gamma \cdot 10^6} \cdot 100, \text{ м}^3, \quad (2.37)$$

де  $T$  – тривалість накопичення осаду,  $T = 8$  год;

$C_1$  – концентрація завислих речовин на вході в установку, мг/л;

$C_2$  – концентрація завислих речовин на виході з відстійника;

$P$  – вологість осаду, що дорівнює 98–98,5 %;

$\gamma$  – об’ємна маса осаду, що дорівнює 2,65 т/м<sup>3</sup>.

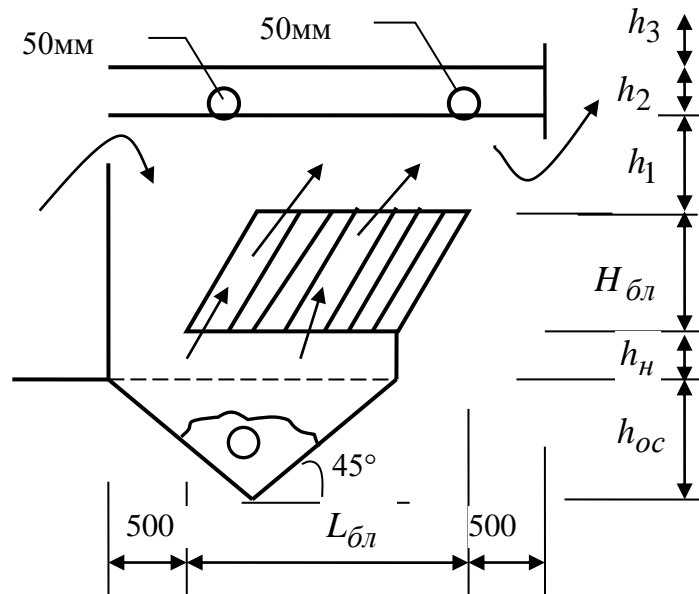


Рисунок 2.2 – Схема відстійного відділення

10. Об’єм осадової частини визначається за залежністю, м<sup>3</sup>, визначається за формулою

$$W'_{oc} = \frac{(\delta + S) \cdot n_{ел} + 0,5}{2} \cdot h_{oc} \cdot A, \quad (2.38)$$

де  $h_{oc}$  – висота осадового приямка.

$$h_{oc} = \frac{(\delta + S) \cdot n_{ел} + 0,5}{2}, \text{ м.} \quad (2.39)$$

11. Періодичність скидання осаду визначається за формулою

$$N_{oc} = \frac{W_{oc}}{W'_{oc}}. \quad (2.40)$$

12. Загальна довжина відстійної камери визначається за формулою

$$L_{відст.к} = L_{бл} + 0,5 + 0,5, \text{ м.} \quad (2.41)$$

13. Загальна висота відстійника визначається за формулою

$$H_{відст} = h_{oc} + h_n + H_{бл} + h_1 + h_2 + h_3, \text{ м,} \quad (2.42)$$

де  $h_n$  – відстань між осадовим приямком і тонкошаровим блоком,  $h_n = 0,5$  м.

14. Загальна кількість уловлених нафтопродуктів у вигляді піни визначається за формулою

$$W_n = \frac{T \cdot Q \cdot (C_n^{en} - C_n^{ex})}{0,95 \cdot (100 - P_n) \cdot 10^4}, \quad (2.43)$$

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

$C_n^{en}; C_n^{ex}$  – концентрація нафтопродуктів у вихідній і очищеній воді;

$C_n^{ex} = 20\text{--}30$  мг/л;

$P_n$  – вологість нафтопіни, 90–92 %.

Нафтопродукти, що виділяються у вигляді піни виводяться з установки за допомогою двох труб, які розміщені у верхній частині й мають діаметр 50 мм. На трубах передбачені щілинні отвори шириною 10–15 мм.

Зібрана нафтопіна надходить до бункера, що конструктивно входить до складу установки.

Об'єм бункера визначається за формулою

$$W_{\bar{o}}^H = l_{\bar{o}} \cdot h_{\bar{o}} \cdot 0,5. \quad (2.44)$$

Довжину бункера визначають за формулою

$$l_{\bar{o}} = L_{\bar{o}} + 0,5. \quad (2.45)$$

Висота бункера дорівнює 1,5 м.

Термін зберігання піни в бункері визначається за формулою

$$T_n = \frac{W_{\bar{o}}^H}{W_n}, \text{ діб.} \quad (2.46)$$

Уловлені нафтопродукти утилізують в котельні заводу. Уловлений осад подають до збірної резервуара, що розраховується на 30-добове зберігання осаду, після чого вивозять на утилізацію на підприємствах будівельної індустрії.

#### 2.5.4 Фільтрування проясненої води

Для можливості використання стічних вод у системі оборотного водопостачання студентам рекомендується обирати фільтруючі установки з використанням пінополіуретанового завантаження.

Швидкість завантаження обирають в межах 5–10 м/год.

Площу завантаження визначають за формулою

$$F_{\phi} = \frac{Q}{v}, \text{ м}^2. \quad (2.47)$$

Розміри фільтрувальної камери в плані вибираються з умови блокування елементів очищення в одну конструкцію. Тоді ширина камери  $B_{\phi} = A$ .

$$\text{Довжина камери, м, дорівнює} \quad L_{\phi} = \frac{F_{\phi}}{A}. \quad (2.48)$$

Пінополіуретан завантажують у зйомну касету з металевою сіткою. Товщина шару завантаження становить 0,5 м. Регенерацію завантаження здійснюють механічним способом, тобто віджимом на установці, що регенерує.

Маса забруднень, що затримується фільтром за годину, визначається за формулою

$$M_3 = ((C_{\text{нафт.}}^{\text{en}} - C_{\text{нафт.}}^{\text{ex}}) + (C_{\text{зав.р.}}^{\text{en}} - C_{\text{зав.р.}}^{\text{ex}})) \cdot Q \cdot 10^{-3}, \quad (2.49)$$

де  $C_{\text{нафт.}}^{\text{en}}; C_{\text{нафт.}}^{\text{ex}}$  – концентрація нафтопродуктів у вихідній і очищеній воді, (5–7) мг/л;

$C_{\text{зав.р.}}^{\text{en}}; C_{\text{зав.р.}}^{\text{ex}}$  – концентрація завислих речовин на вході й виході з фільтра, мг/л.

Маса фільтруючого завантаження, кг, визначається за формулою

$$M_{\phi.з.} = W_{\phi.з.} \cdot \rho_{\phi.з.}, \quad (2.50)$$

де  $W_{\phi.з.}$  – об'єм фільтруючого завантаження, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\phi.з.}$  – щільність фільтруючого завантаження,  $\rho_{\phi.з.} = 50$  кг/м<sup>3</sup>.

Об'єм фільтруючого завантаження визначають за формулою

$$W_{\phi.з.} = F_{\phi} \cdot 0,5. \quad (2.51)$$

Маса вловлених забруднень за весь фільтроцикл

$$M_3' = M_{\phi.з.} \cdot G, \quad (2.52)$$

де  $G$  – брудоемність,  $G = 1,5$  кг/кг.

Тривалість фільтрування фільтруючого завантаження визначається за формулою

$$T = \frac{M_3'}{M_3}. \quad (2.53)$$

## ВИСНОВКИ

Наведена методика розрахунку може бути також використана в дипломному й реальному проєктуванні пристроїв для електрохімічного очищення води, що містять забруднення природного та техногенного походження.

У висновках індивідуального завдання здобувачі повинні відобразити:

- виконання мети та поставлених завдань;
- результати теоретичного обґрунтування та вибору методу електрохімічного очищення, типу електроапарата;
- особливості системи водовідведення різних категорій стічних вод;
- характеристику якості води за основними показниками до (після) очищення та вимоги до очищеної води;
- можливість повторного використання очищених стічних вод у технічному водопостачанні;
- основні технологічні параметри процесу очищення;
- дані про габарити апарата, питомі витрати електроенергії та металу, строк використання електродної системи.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств : навч. посіб. / Т. С. Айрапетян. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 280 с.
2. Гіроль М. М. Технології водовідведення промислових підприємств: навч. посіб. / М. М. Гіроль, А. М. Гіроль, А. М. Гіроль. – Рівне : НУВГП, 2013. – 625 с.
3. Мацнев А. І. Водовідведення на промислових підприємствах : навч. посіб. / А. І. Мацнев, Л. А. Саблій. – Рівне: УДАВГ, 1998. – 219 с.
4. ДБН В.2.5-74: 2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування. – Чинний від 01.01.2014. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 172 с.
5. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування. – Чинний від 01.01.2014. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 214 с.
6. Пляцук Л. Д. Екологічна біотехнологія: принципи створення біотехнологічних виробництв : навч. посіб. / Л. Д. Пляцук, Є. Ю. Черниш. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 293 с.
7. Олов В. О. Водопостачання та водовідведення : підручник / В. О. Орлов, Я. А. Тугай, А. М. Орлова. – Київ : Знання, 2011. – 359 с.
8. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод : підручник / А. К. Запольський, Н. А. Мішкова-Клименко, І. М. Астрелін [та ін.]. – Київ : Лібра, 2000. – 551 с.
9. Нестер А. А. Стічні води підприємств та їх очищення : монографія / А. А. Нестер, Н. М. Корчик, Б. А. Баран. – Хмельницький : ХНУ, 2008. – 171 с.
10. Пляцук Л. Д. Аналіз технологій очистки гальванічних стоків в країні / Л. Д. Пляцук, О. С. Мельник // Вісник СумДУ. – № 2. – 2008. – С. 116–120.
11. Большаніна С. Б. Очищення стічних вод гальванічних виробництв сорбційними методами / С. Б. Большаніна, Г. М. Гурець, Д. С. Балабуха, Д. В. Міляєва // Екологічна безпека. – 2014. – Вип. 1. – С. 114–118.
12. Босюк А. С. Аналіз сучасних технологій та методів очистки гальванічних стоків машинобудівних підприємств / А. С. Босюк, О. В. Шестопапов // Екологічні науки: науково-практичний журнал. – № 4 (43). – 2022. – С. 74–78.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Значення коефіцієнта  $K_{вин}$  у випадку охолодження води у бризкальних басейнах і градирнях

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

Таблиця А.2 – Значення коефіцієнта  $K_{вин}$  у випадку охолодження води у ставках-охолоджувачах та ставках-освітлювачах

Природна температура води у водоймі, °С	0	10	20	30
$K_{вин}$	0,0007	0,0009	0,0011	0,0013

Таблиця А.3 – Втрати води з краплинним винесенням вітром у процесі охолодження

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

Таблиця А.4 – Значення коефіцієнта К для вентиляторних градирень краплинним зрошувачем або зрошувачем бризкального типу

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

Таблиця А.5 – 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.6 – Типи вентиляторних градирень

Площа секції, м <sup>2</sup>	Розмір однієї секції, м <sup>2</sup>	Вид зрошувача	Висота зрошувача, м	Тип вентилятора	Подача повітря вентилятором	Номер проекту
16	4 × 4	плівковий	3,81	2ВГ-25	140	901-6-56
		краплинний	3,86		110	
		бризкальний	2,50		140	
16	4 × 4	плівковий	3,42	2ВГ-25	140	901-6-59
		краплинний	3,60		110	
		бризкальний	3,40		135	
24	4 × 6	бризкальний	1,76	3ВГ-25	180	901-6-67.83
64	8 × 8	плівковий	3,36	ИВГ-50	585	901-6-51
		краплинний	3,48		490	
		бризкальний	3,00		570	
64	8 × 8	плівковий	3,68	ИВГ-50	580	901-6-29
		краплинний	3,68		465	
		бризкальний	3,80		550	
144	12 × 12	плівковий	3,36	2ВГ-70	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 – Вихідні дані для виконання РГЗ за варіантами

№ з/п	Параметри	Варіант											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Продуктивність цеху, тис. од./рік	4,5	6,0	8,0	4,7	5,2	4,9	5,8	6,1	4,6	5,0	7,0	7,7
2	Норма водовідведення цеху, м <sup>3</sup> /од. прод.	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
3	Коефіцієнт годинної нерівномірності	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
4	Якісний склад стічної води:												
	– завислі речовини, мг/л;	450	510	600	470	630	565	490	460	500	610	585	600
	– нафтопродукти, мг/л;	300	285	310	275	300	270	310	275	280	300	270	300
	– загальний солевміст, мг/л;	1 000	1 500	1 320	1 430	1 600	1 210	1 300	1 170	1 300	1 410	1 020	1 370
	– рН;	7,0	7,5	8,0	7,3	8	7,5	7,1	7,4	8,0	7,3	7,5	7,7
	– температура, °С	21	22	21	27	27	21	22	22	27	27	21	21

Продовження таблиці Б.1

№ з/п	Параметри	Варіант											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Продуктивність цеху, тис. од./рік	7,7	6,0	8,0	4,7	5,4	4,6	5,1	5,51	7,6	5,0	6,0	5,7
2	Норма водовідведення цеху, м <sup>3</sup> /од. прод.	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
3	Коефіцієнт годинної нерівномірності	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
4	Якісний склад стічної води:												
	Завислі речовини, мг/л	480	510	570	500	530	565	460	5200	590	620	470	450
	Нафтопродукти, мг/л	300	285	310	275	300	270	310	275	280	300	270	300
	Загальний солевміст, мг/л	1 270	1 400	1 380	1 450	1 300	1 510	1 200	1 470	1 500	1 210	1 020	1 430
	рН	7,1	7,4	7,0	7,3	8,0	7,6	7,8	7,4	8,0	7,0	7,2	7,5
	Температура, °С	21	22	21	21	21	27	22	27	21	22	21	27

## ДОДАТОК В

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

Кафедра водопостачання, водовідведення і очищення вод

#### ЗАВДАННЯ

на виконання розрахунково-графічної роботи

#### «Спецкурс з водопостачання та водовідведення пром підприємств»

Видано здобувачу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_

#### ВИХІДНІ ДАНІ

2 Тема «Очистка стічних вод механічних цехів машинобудівного заводу»

3 Річна продуктивність \_\_\_\_\_, тис. одиниць у рік

4 Норма водовідведення \_\_\_\_\_, м<sup>3</sup>/од. продукції

5 Коефіцієнт годинної нерівномірності \_\_\_\_\_

6 Якісна характеристика стічної води:

– завислі речовини – \_\_\_\_\_ мг/л;

– нафтопродукти – \_\_\_\_\_ мг/л

– загальний солевміст – \_\_\_\_\_ мг/л

– рН – \_\_\_\_\_

– температура стічних вод – \_\_\_\_\_ °С

#### ЗМІСТ РОБОТИ

1 Навести характеристику підприємства, його основних цехів.

2 Визначити розрахункову витрату стічних вод цього виробництва.

3 Проаналізувати умови утворення основних категорій стічних вод цього підприємства, дати їх якісну й кількісну характеристику. Вибрати й обґрунтувати методи й схему очищення.

4 Зробити розрахунок очисних споруд.

5 Навести схему очистки, описати конструкції і принцип роботи споруд для очистки стічних вод.

Завдання видане \_\_\_\_\_ Строк здачі роботи \_\_\_\_\_

Викладач: доц. каф. ВВ і ОВ Т. С. Айрапетян \_\_\_\_\_

*Електронне виробничо-практичне видання*

## МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичних занять, виконання  
розрахунково-графічної роботи та самостійного вивчення  
з навчальної дисципліни

### **«СПЕЦКУРС З ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ ПРОМПІДПРИЄМСТВ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти  
всіх форм навчання галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво  
зі спеціальності G19 – Будівництво та цивільна інженерія,  
освітня програма «Цивільна інженерія»)*

Укладачі: **ЕПОЯН** Степан Михайлович,  
**АЙРАПЕТЯН** Тамара Степанівна

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

План 2023, поз. 62М

---

Підп. до друку 09.09.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 3,4.

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.