

Міністерство освіти і науки України  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"  
Інститут хімічних технологій та фармацевтики

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до практичних занять та самостійної роботи з курсу  
**"Хімія та технологія води"**  
для здобувачів вищої освіти за спеціальністю  
161 – Хімічні технології та інженерія

Затверджено на засіданні кафедри ХТ  
Протокол № 1 від 04.01.2022 р.

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з курсу "Хімія та технологія води" для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Уклад.: Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, В.В. Брем, Національний ун-т "Одеська політехніка". – Одеса, 2022. – 45 с.

Укладачі: Іванченко Л.В., к.т.н, доцент,  
Кожухар В.Я., д.т.н., професор,  
Брем В.В., к.х.н., доцент

*Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, В.В. Брем. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з курсу "Хімія та технологія води".* В методичних вказівках наведено розрахунків технологічних параметрів процесів очищення природних та стічних вод та конструкційних параметрів головних апаратів; наведено контрольні запитання та варіанти індивідуальних завдань для самостійної роботи. Методичні вказівки призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія

## ЗМІСТ

1 СКЛАД ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНИХ ВОД.....	3
1.1 Іонний склад природних вод.....	3
1.2 Якість води.....	4
1.3 Приклади розв'язування задач.....	5
1.4. Завдання для самостійної роботи .....	7
2 ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ФІЛЬТРУВАННЯМ.....	11
2.1 Теоретичні положення.....	11
2.2 Методика розрахунку механічного фільтра .....	13
2.3 Алгоритм розрахунку механічного фільтра .....	14
2.4 Завдання для самостійної роботи .....	15
3 ОЧИЩЕННЯ ВОДИ КОАГУЛЯЦІЄЮ ТА ОСВІТЛЕННЯМ.....	17
3.1 Теоретичні положення.....	17
3.2 Методика розрахунку .....	19
3.3 Алгоритм розрахунку освітлювача.....	22
3.4 Завдання для самостійної роботи .....	25
4 ЗМ'ЯГШЕННЯ ВОДИ Na-КАТІОНУВАННЯМ.....	26
4.1 Теоретичні положення.....	26
4.2 Методика розрахунку .....	27
4.2.1 Розрахунок Na-катіонітових фільтрів першого ступеня .....	27
4.2.2 Розрахунок Na-катіонітових фільтрів другого ступеня.....	30
4.2.3 Розрахунок стоків, що скидаються від Na-катіонітових фільтрів.....	30
4.3 Алгоритм розрахунку Na-катіонітового фільтру .....	32
4.4 Завдання для самостійної роботи .....	35
5 ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ВОДИ.....	37
5.1 Теоретичні положення.....	37
5.1.1 Видалення розчиненого карбону(IV) оксиду .....	38
5.2 Методика розрахунку .....	39
5.3 Алгоритм розрахунку декарбонізатора.....	42
5.4 Завдання для самостійної роботи .....	44
ЛІТЕРАТУРА .....	45

# 1 СКЛАД ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНИХ ВОД

Природна вода є багатокомпонентною динамічною системою до складу якої входять: гази, мінеральні та органічні речовини, що перебувають в істинно розчиненому, колоїдному, завислому стані, а також мікроорганізми.

У вигляді іонів, недисоційованих молекул, колоїдних і завислих часточок у природних водах міститься понад п'ятдесят елементів, однак тільки деякі з них зустрічаються у значній кількості.

З розчинених газів у природних водах найважливішими для оцінювання якості води є: карбону(IV) оксид, кисень, сірководень, азот та метан.

З речовин, дисоційованих у водних розчинах на іони, у воді розчиняється більшість мінеральних кислот і гідроксидів. Найчастіше в природних водах зустрічаються: гідрогенкарбонати, хлориди, сульфати лужноземельних і лужних металів, нітрати, нітрити, силікати, фториди, фосфати та ін.

Наявність у воді завислих речовин свідчить про її забруднення твердими домішками (часточками глини, піску, мулу, водоростями та іншими речовинами мінерального та органічного походження).

Значним постачальником органічних речовин у природну воду є гумус, продукти життєдіяльності і розкладання рослинних і тваринних організмів, стічні води.

Забруднення води мікроорганізмами залежить від походження і характеру джерела. Найчистішими в цьому відношенні є артезіанські води. Особливо піддаються забрудненню мікроорганізмами поверхневі води, тому використання їх у неочищеному вигляді становить велику небезпеку в зв'язку з можливістю виникнення і поширення інфекційних захворювань.

## 1.1 Іонний склад природних вод

За вмістом іонів (солей) у воді *загальний ступінь мінералізації* (М) визначають за формулою:

$$M = \sum \text{катіонів} + \sum \text{аніонів}, \text{ мг/дм}^3. \quad (1.1)$$

Для перевірки правильності обчислення ступеня мінералізації, результати перераховують у мг-екв/дм<sup>3</sup>. При цьому сума концентрацій катіонів повинна дорівнювати сумі концентрацій аніонів:

$$\frac{\text{Ca}^{2+}}{20,04} + \frac{\text{Mg}^{2+}}{12,16} + \frac{\text{Na}^+}{23,0} + \frac{\text{K}^+}{39,0} + \dots = \frac{\text{SO}_4^{2-}}{48,03} + \frac{\text{Cl}^-}{35,46} + \frac{\text{HCO}_3^-}{61,03} + \frac{\text{SiO}_3^{2-}}{38,03} + \dots \quad (1.2)$$

Про вміст у природній воді солей судять за кількістю таких показників: сухого залишку, втрати маси в процесі прожарювання.

Основними хімічними домішками річкових вод (з кількістю розчинених солей 500...600 мг/дм<sup>3</sup>) є катіони  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  і аніони  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Маломінералізовані води річок містять переважно іони  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

Підземні води різноманітні за хімічним складом. Ступінь мінералізації залежить від умов залягання водоносного шару, коливається від 100...200 мг/дм<sup>3</sup> до декількох міліграм у літрі.

У прісних артезіанських водах переважають іони  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . У міру підвищення ступеня мінералізації зростає відносний вміст іонів натрію, сульфатів, хлоридів.

Вміст солей у водах океанів і морів досягає 50 г/дм<sup>3</sup> і більше. Основними домішками є  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , що складають у сумі близько 30 мг/дм<sup>3</sup>. Вміст солей у водах внутрішніх морів значно менший.

У природних водах знаходяться іони, а не молекули солей. Проте в деяких випадках технологів більше цікавить визначення передбачуваного складу солей, що допомагає виявити певні властивості води, які мають значення для процесу водопідготовки. В основу визначення складу солей можуть бути покладено різні принципи. Для процесу очищення води

доцільно одержати склад солей, які послідовно утворюють малорозчинні з'єднання зі збільшенням рН води. Цей прийом використовують в багатьох процесах водопідготовки (пом'якшення вапном або вапном із содою, знеферумнення аерацією або вапнуванням та ін.).

Діаграму передбачуваного складу солей будують у вигляді трьох рівних смуг, що примикають одна до одної (рис. 1.1). На верхній смузі відкладають зліва на право в масштабі вміст катіонів у воді в порядку зростання основних властивостей. На нижній смузі в тому ж масштабі зліва праворуч відкладають аніони в порядку зростання кислотних властивостей. На середній смузі за сполученням катіонів і аніонів визначають передбачуваний склад солей. Слід пам'ятати, що масштаб на середній смузі в два рази менше, ніж на верхній і нижній смугах.

Концентрації катіонів і аніонів виражають в мг-екв/дм<sup>3</sup>. Ця діаграма враховує, що за рН=5...6 відбувається виділення осаду Fe(OH)<sub>3</sub>, за величини рН≈8,5 осаджується феруму гідроксид, за рН=8,5...9 – кальцію карбонат, а за рН>10...10,3 – магнію гідроксид.

Fe <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>
Fe(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
			NaCl + KCl
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			Cl <sup>-</sup>

Рис. 1.1 – Діаграма передбачуваного складу солей

## 1.2 Якість води

Якість води – це сукупність фізичних, хімічних, біологічних і бактеріологічних показників, що обумовлюють придатність води для використання в побуті, промисловості та інших сферах.

Мета визначення якості природних вод – вибір методу оброблення води і відповідно до цього технологічної схеми; визначення джерел забруднення.

Показники якості води підрозділяються на фізичні, хімічні та санітарно-бактеріологічні.

До *фізичних показників* відносяться температура, вміст завислих речовин, кольоровість, запахи і присмаки.

*Хімічний склад* води зазвичай характеризують іонним складом, твердістю, лужністю, окисненням, рН, сухим і прожареним залишком, загальним солемістом і т.п.

*Санітарно-бактеріологічні показники* – це загальний вміст бактерій у 1 дм<sup>3</sup>, кількість бактерій групи кишкової палички, число термостабільних кишкових паличок, патогенних мікроорганізмів, коліфагів, число патогенних кишкових найпростіших і число кишкових гельмінтів.

**Жорсткість** води обумовлюється наявністю у воді іонів кальцію (Ca<sup>2+</sup>), магнію (Mg<sup>2+</sup>), стронцію (Sr<sup>2+</sup>), барію (Ba<sup>2+</sup>), феруму (Fe<sup>3+</sup>), мангану (Mn<sup>2+</sup>). Але загальний вміст в природних водах іонів кальцію і магнію незрівнянно більший вмісту всіх інших згаданих іонів – і навіть їх суми. Тому під жорсткістю розуміють суму кількостей іонів кальцію і магнію – загальна жорсткість, що складається зі значень карбонатної (тимчасової, усувають кип'ятінням) і некарбонатної (сталого) жорсткості. Перша обґрунтована присутністю у воді кальцію і магнію гідрогенкарбонатів, друга – наявністю сульфатів, хлоридів, силікатів, нітратів і фосфатів цих металів.

Жорсткість води (ступінь жорсткості прийнято виражати в мілімоль іонів Ca<sup>2+</sup> або Mg<sup>2+</sup> (або обох іонів) в 1 дм<sup>3</sup> або 1 кг води – ммоль/дм<sup>3</sup> або ммоль/кг. У технічній літературі зустрічається одиниця виміру ступеня жорсткості води – мг-екв/дм<sup>3</sup> або мг-екв/кг. Знаючи, що

молярні маси еквівалентів іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  відповідно дорівнюють 20,04 і 12,16 мг/дм<sup>3</sup>, можна розрахувати загальну жорсткість води (в ммоль/дм<sup>3</sup>):

$$J_{\text{заг}} = \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{20,04} + \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{12,16}. \quad (1.3)$$

Стосовно між величиною жорсткості води  $J_{\text{заг}}$  і концентрацією в ній іонів  $[\text{HCO}_3^-]$  природні води можна розділити на дві групи: для однієї  $J_{\text{заг}} > [\text{HCO}_3^-]$ , для іншого  $J_{\text{заг}} < [\text{HCO}_3^-]$ . У водах першої групи розрізняють жорсткість загальну  $J_{\text{заг}}$ , карбонатну  $J_{\text{к}} = [\text{HCO}_3^-]$ , некарбонатну  $J_{\text{нк}}$ , кальцієву  $J_{\text{Ca}}$  і магнієву  $J_{\text{Mg}}$ . Між ними існує така залежність:

$$J_{\text{заг}} = J_{\text{к}} + J_{\text{нк}} = J_{\text{Ca}} + J_{\text{Mg}}. \quad (1.4)$$

Для вод другої групи, які називають лужними, поняття карбонатної і некарбонатної жорсткості втрачає сенс, оскільки  $[\text{HCO}_3^-] > J_{\text{заг}}$ . Для цих вод слід розрізнити жорсткість загальну, кальцієву і магнієву, а також лужність. Під час розрахунків процесів у водообробленні для лужних вод слід умовно приймати  $J_{\text{к}} = J_{\text{заг}}$ ,  $J_{\text{нк}} = 0$ , з огляду на надмірну концентрацію іонів  $[\text{HCO}_3^-]$ . На практиці часто доводиться визначати жорсткість суміші двох або декількох потоків води. Рішення подібного роду завдань ґрунтується на таких очевидних рівностях:

$$J_{\text{заг}}^{\text{сум}} = J_{\text{заг}}^1 \cdot a + J_{\text{заг}}^2 \cdot b, \quad (1.5)$$

де  $J_{\text{заг}}^{\text{сум}}$  – жорсткість суміші;

$J_{\text{заг}}^1$ ,  $J_{\text{заг}}^2$  – жорсткість першого та другого потоків відповідно;

a, b – відповідно величини першого та другого потоків, виражених в частках одиниці.

### 1.3 Приклади розв'язування задач

#### Приклад 1.1.

Відповідно принципу електронейтральності розрахувати вміст іону  $\text{Na}^+$  у природній воді та визначити загальний ступінь мінералізації води, якщо іонний склад води такий, мг/дм<sup>3</sup>:  $\text{Ca}^{2+} = 88$ ,  $\text{Mg}^{2+} = 17$ ,  $\text{K}^+ = 18$ ,  $\text{Cl}^- = 350$ ,  $\text{SO}_4^{2-} = 120$ ,  $\text{HCO}_3^- = 108$ .

*Розв'язок.* Розраховуємо кількість еквівалентів кожного іону як відношення його концентрації до молярної маси його еквіваленту.

$$\text{Ca}^{2+} = \frac{88}{20,04} = 4,3912;$$

$$\text{Mg}^{2+} = \frac{17}{12,16} = 1,3980;$$

$$\text{K}^+ = \frac{18}{39,0} = 0,4615;$$

$$\text{Cl}^- = \frac{350}{35,46} = 9,8703;$$

$$\text{SO}_4^{2-} = \frac{120}{48,03} = 2,4984$$

$$\text{HCO}_3^- = \frac{108}{61,03} = 1,7696$$

Розраховуємо загальну кількість еквівалентів катіонів та аніонів у воді:

$$\sum \text{катіонів} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ = 4,3912 + 1,3980 + 0,4615 = 6,2504;$$

$$\sum \text{аніонів} = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- = 9,8703 + 2,4984 + 1,7696 = 14,1383.$$

За різницею між еквівалентами катіонів та аніонів визначаємо кількість еквівалентів іону натрію:

$$\text{Na}^+ = \sum \text{аніонів} - \sum \text{катіонів} = 14,1383 - 6,2504 = 7,8879.$$

Розраховуємо вміст іону натрію у воді як добуток кількості еквівалентів та молекулярної маси еквівалента.

$$\text{Na}^+ = 7,8879 \cdot 23 = 181,42 \approx 181 \text{ мг/дм}^3.$$

Розраховуємо загальну мінералізацію природної води, як суму всіх іонів:

$$M = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-;$$

$$M = 88 + 17 + 18 + 181 + 350 + 120 + 108 = 882 \text{ мг/дм}^3.$$

Отже, природна вода зазначеного складу має підвищену мінералізацію.

### Приклад 1.2.

Розрахувати тимчасову жорсткість води, якщо 500 л її містить 202,5 г  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

*Розв'язок.* Тимчасова (некарбонатна) жорсткість води зумовлена наявністю солі кальцію гідрогенкарбонату і визначається за такою формулою:

$$J_{\text{нк}} = \frac{m_{\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2}}{M_{\text{e}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (1.6)$$

де  $M_{\text{e}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)}$  – молярна маса еквівалента кальцію гідрогенкарбонату;

$$M_{\text{e}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)} = \frac{M_{\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2}}{2} = \frac{162}{2} = 81 \text{ г/моль}.$$

Отже, тимчасова жорсткість води становить:

$$J_{\text{нк}} = \frac{202,5}{81 \cdot 500} \cdot 1000 = 5 \text{ ммоль/дм}^3.$$

### Приклад 1.3.

Скільки грамів  $\text{CaSO}_4$  містить 1 м<sup>3</sup> води, якщо її жорсткість, яка обумовлена наявністю цієї солі, становить 4 ммоль/дм<sup>3</sup>.

*Розв'язок.* Молярна маса  $\text{CaSO}_4$  дорівнює 136 г/моль, молярна маса еквівалента  $\text{CaSO}_4$  становить  $M_{\text{e}(\text{CaSO}_4)} = \frac{M_{\text{CaSO}_4}}{2} = \frac{136}{2} = 68$  г/моль. З формули (1.6) знаходимо, скільки грамів кальцію сульфату міститься в 1 м<sup>3</sup> (1 м<sup>3</sup> = 1000 дм<sup>3</sup>) води:

$$m_{\text{CaSO}_4} = \frac{J \cdot M_{\text{e}(\text{CaSO}_4)} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}}{1000};$$

$$m_{\text{CaSO}_4} = \frac{4 \cdot 68 \cdot 1000}{1000} = 272 \text{ г}.$$

### Приклад 1.4.

Яку масу соди необхідно додати до 500 л води, щоб усунути її жорсткість, яка становить 5 ммоль/дм<sup>3</sup>.

*Розв'язок.*

Визначаємо кількість моль еквівалентів солей, якими зумовлена жорсткість води за такою формулою:

$$n_{\text{солей}} = \frac{J \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}}{1000}; \quad (1.7)$$

$$n_{\text{солей}} = \frac{5 \cdot 500}{1000} = 2,5 \text{ моль.}$$

Відповідно до закону еквівалентів  $n_{\text{солей}} = n_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 2,5$ . Молярна маса еквівалента соди

$$\text{становить } M_{e(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = \frac{M_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{2} = \frac{106}{2} = 53 \text{ г/моль.}$$

Отже, маса соди становить:

$$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = n_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \cdot M_{e(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = 2,5 \cdot 53 = 132,5 \text{ г.}$$

#### 1.4. Завдання для самостійної роботи

##### Завдання 1.1.

Відповідно принципу електронейтральності розрахувати вміст невизначеного іону у природній воді (табл. 1.1), визначити загальний ступінь мінералізації води та побудувати діаграму передбачуваного сольового складу солей.

Таблиця 1.1 – Завдання для самостійної роботи

№ вар.	<i>Вміст катіонів, мг/дм<sup>3</sup></i>							
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
1	88	22		19	0,3	0,2	0,002	0,05
2	43	21	126	15	0,4	0,5	0,03	0,01
3	74	31	86	15	0,2	0,6	0,04	0,005
4	93	19	78	8	0,55	0,3	0,01	0,023
5		24	31	12	0,46	0,4	0,003	0,041
6	76	18	32	15	0,32	0,5	0,008	0,009
7	445	63	1021	60	0,26	1,14	0,001	0,005
8	149,3	55,9		9,9	6,63	0,01	0,002	0,003
9	362,2	84,6	117,1	13,3	1,28	0,79	0,001	0,002
10		42,2	551,8	33,8	4,93	0,79	0,003	0,001
11	121,2	50,3	1,533	35,7	2,94	1,98	0,01	0,02
12	119,4	19,8		14	1,7	0,01	0,001	0,003
13	52,4	7,4	2,6	0,8	0,2	0,3	0,004	0,05
14	42	11	8	3	0,1	0,2	0,003	0,002
15	3,5	1,5	15	0,2	0,1	0,01	0,002	0,001
16	120	48		54	1,46	0,68	0,05	0,002
17		36	29	12	0,2	0,6	0,004	0,05
18	64		27	17	0,22	0,54	0,007	0,0004
19	85	44	21	11	0,46	0,4	0,003	0,041
20	45	24	26		0,4	0,5	0,001	0,003
№ вар.	<i>Вміст аніонів, мг/дм<sup>3</sup></i>							
	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HSiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	
1	350	120	108	0,07	0,002	0,45	0,02	
2	330		260	0,8	0,05	0,64	0,01	
3		327	240	0,5	0,003	0,45	0,02	
4	320	520		0,3	0,005	0,62	0,02	
5	320	190	180	0,4	0,004	0,54	0,02	
6		410	140	0,2	0,007	0,73	0,02	
7	1056		1614	55,9	0,001	0,05	0,089	
8	1687	5,4	4427	12,7	0,003	0,02	0,01	
9		451,7	1074	10,1	0,002	0,01	0,163	

10	250,6	748,5	1241	33,1	0,004	0,015	0,01
11		0,92	4072	22,2	0,003	0,002	0,16
12	541	0,01	7528	16	0,001	0,002	0,001
13	1,8	13,6		0,6	0,003	0,45	0,04
14	5,1	17		0,3	0,01	0,52	0,01
15	10		9,5	0,5	0,03	16	0,01
16	163	410	214	8	0,02	124	0,01
17	550	420	186	0,3	0,05	0,62	0,02
18	340	390	180	0,2	0,007	0,73	0,015
19	425	350		0,4	0,004	0,54	0,03
20	290	465	230	0,7	0,002	0,24	0,025

### Завдання 1.2.

№ вар.	Завдання	
1	1	Яку масу $\text{Na}_3\text{PO}_4$ треба додати до 500 л води, щоб усунути її карбонатну жорсткість, яка становить 5 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Чому дорівнює жорсткість води, в 100 л якої міститься 14,632 г магнію гідрогенкарбонату?
	3	В 1 л води міститься іонів магнію 36,47 мг і іонів кальцію 50,1 мг. Чому дорівнює жорсткість цієї води?
2	1	Яку масу натрію карбонату треба додати до 400 л води, щоб усунути жорсткість, рівну 3 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Вода, що містить тільки магнію сульфат, має жорсткість 7 ммоль/дм <sup>3</sup> . Яка маса магнію сульфату міститься в 300 л цієї води?
	3	Обчисліть жорсткість води, знаючи, що в 600 л її міститься 65,7 г магнію гідрогенкарбонату і 61,2 г кальцію сульфату.
3	1	У 220 л води міститься 11 г магнію сульфату. Чому дорівнює жорсткість цієї води?
	2	До 1м <sup>3</sup> жорсткої води додали 132,5 г натрію карбонату. Наскільки знизилася жорсткість?
	3	Яка маса $\text{CaSO}_4$ міститься в 200 л води, якщо жорсткість, що обумовлена цією сіллю, становить 8 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
4	1	1 м <sup>3</sup> води містить 140 г магнію сульфату. Обчисліть жорсткість цієї води.
	2	Вода, що містить тільки магнію гідрогенкарбонат, має жорсткість 3,5 ммоль/дм <sup>3</sup> . Яка маса магнію гідрогенкарбонату міститься в 200 дм <sup>3</sup> цієї води?
	3	Чому дорівнює жорсткість води, якщо для її усунення до 50 л води потрібно додати 21,2 г натрію карбонату?
5	1	Вода, що містить тільки кальцію гідрогенкарбонат, має жорсткість 9 ммоль/дм <sup>3</sup> . Яка маса кальцію гідрогенкарбонату міститься в 500 л води?
	2	Яку масу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ треба додати до 2,5 л води, щоб усунути її жорсткість, яка становить 4,43 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	3	До 100 л жорсткої води додали 12,95 г кальцію гідроксиду. Наскільки знизилася карбонатна жорсткість?
6	1	Яку масу натрію карбонату треба додати до 0,1 м <sup>3</sup> води, щоб усунути жорсткість, яка становить 4 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Чому дорівнює карбонатна жорсткість води, якщо в 1 л її води міститься 0,292 г магнію гідрогенкарбонату і 0,2025 г кальцію гідрогенкарбонату?
	3	Яку масу кальцію гідроксиду треба додати до 275 л води, щоб усунути її



		карбонатну жорсткість, яка становить 5,5 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
7	1	Скільки грамів Ca(OH) <sub>2</sub> необхідно додати до 1000 л води, щоб видалити тимчасову жорсткість, яка становить 2,86 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Чому дорівнює тимчасова жорсткість води, в 1 л якої міститься 0,146 г магнію гідрогенкарбонату?
	3	Жорсткість води, яка містить тільки кальцію гідрогенкарбонат, становить 1,785 ммоль/дм <sup>3</sup> . Визначити масу гідрогенкарбонату в 1 л води.
8	1	Скільки натрію карбонату треба додати до 5 л води, щоб усунути загальну жорсткість, яка становить 4,60 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Під час кип'ятіння 250 мл води, що містить кальцію гідрогенкарбонат, випав осад масою 3,5 мг. Чому дорівнює жорсткість води?
	3	У 100 л води міститься 8,5 г кальцію хлориду. Обчисліть жорсткість води.
9	1	Некарбонатна жорсткість води дорівнює 5,3 ммоль/дм <sup>3</sup> . Розрахуйте, скільки Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> слід взяти, щоб пом'якшити 100 л такої води.
	2	Розрахуйте карбонатну жорсткість води, якщо в 5 л її міститься 2,5 г магнію гідрогенкарбонату та 1,3 г кальцію гідрогенкарбонату.
	3	Під час оброблення 0,5 л зразка води натрію карбонатом в осад випало 70 мг CaCO <sub>3</sub> . Чому дорівнює жорсткість води, якщо вона обумовлена тільки кальцію сульфатом?
10	1	Яку масу натрію карбонату треба додати до 600 л води, щоб усунути жорсткість, рівну 5 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Вода, що містить тільки магнію хлорид, має жорсткість 8 ммоль/дм <sup>3</sup> . Яка маса магнію хлориду міститься в 400 л цієї води?
	3	Обчисліть жорсткість води, знаючи, що в 500 л її міститься 54,3 г магнію гідрогенкарбонату і 51,5 г кальцію сульфату.
11	1	1 м <sup>3</sup> води містить 120 г магнію нітрату. Обчисліть жорсткість цієї води.
	2	Вода, що містить тільки магнію гідрогенкарбонат, має жорсткість 4,2 ммоль/дм <sup>3</sup> . Яка маса магнію гідрогенкарбонату міститься в 300 дм <sup>3</sup> цієї води?
	3	Чому дорівнює жорсткість води, якщо для її усунення до 70 л води потрібно додати 30,5 г натрію карбонату?
12	1	Яку масу натрію карбонату треба додати до 0,1 м <sup>3</sup> води, щоб усунути жорсткість, яка становить 7 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Чому дорівнює карбонатна жорсткість води, якщо в 1 л її води міститься 0,34 г магнію сульфату і 0,32 г кальцію гідрогенкарбонату?
	3	Яку масу кальцію гідроксиду треба додати до 325 л води, щоб усунути її карбонатну жорсткість, яка становить 4,5 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
13	1	Скільки натрію карбонату треба додати до 7 л води, щоб усунути загальну жорсткість, яка становить 5,3 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Під час кип'ятіння 300 мл води, що містить кальцію гідрогенкарбонат, випав осад масою 4,2 мг. Чому дорівнює жорсткість води?
	3	У 120 л води міститься 10,3 г кальцію хлориду. Обчисліть жорсткість води.
14	1	Яку масу Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> треба додати до 300 л води, щоб усунути її карбонатну жорсткість, яка становить 3,5 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Чому дорівнює жорсткість води, в 200 л якої міститься 30 г магнію гідрогенкарбонату?
	3	В 1 л води міститься іонів магнію 28 мг і іонів кальцію 52 мг. Чому дорівнює жорсткість цієї води?
15	1	У 300 л води міститься 18 г магнію сульфату. Чому дорівнює жорсткість цієї води?
	2	До 1 м <sup>3</sup> жорсткої води додали 132,5 г натрію карбонату. Наскільки знизилася

		жорсткість?
	3	Яка маса $\text{CaSO}_4$ міститься в 240 л води, якщо жорсткість, що обумовлена цією сіллю, становить 6 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
16	1	Вода, що містить тільки кальцію гідрогенкарбонат, має жорсткість 8 ммоль/дм <sup>3</sup> . Яка маса кальцію гідрогенкарбонату міститься в 300 л води?
	2	Яку масу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ треба додати до 20 л води, щоб усунути її жорсткість, яка становить 5,2 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	3	До 120 л жорсткої води додали 15,25 г кальцію гідроксиду. Наскільки знизилася карбонатна жорсткість?
17	1	Скільки грамів $\text{Ca}(\text{OH})_2$ необхідно додати до 600 л води, щоб видалити тимчасову жорсткість, яка становить 3,42 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Чому дорівнює тимчасова жорсткість води, в 1 л якої міститься 0,292 г магнію гідрогенкарбонату?
	3	Жорсткість води, яка містить тільки кальцію гідрогенкарбонат, становить 2,3 ммоль/дм <sup>3</sup> . Визначити масу гідрогенкарбонату в 1 л води.
18	1	Некарбонатна жорсткість води становить 6,2 ммоль/дм <sup>3</sup> . Розрахуйте, скільки $\text{Na}_3\text{PO}_4$ слід взяти, щоб пом'якшити 120 л такої води.
	2	Розрахуйте карбонатну жорсткість води, якщо в 7 л її міститься 5,1 г магнію гідрогенкарбонату та 2,4 г кальцію гідрогенкарбонату.
	3	Під час оброблення 0,5 л зразка води натрію карбонатом в осад випало 60 мг $\text{CaCO}_3$ . Чому дорівнює жорсткість води, якщо вона обумовлена тільки кальцію сульфатом?
19	1	У 350 л води міститься 26,4 г магнію сульфату. Чому дорівнює жорсткість цієї води?
	2	Яку масу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ треба додати до 130 л води, щоб усунути її жорсткість, яка становить 6,25 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	3	Жорсткість води, яка містить тільки кальцію гідрогенкарбонат, становить 3,14 ммоль/дм <sup>3</sup> . Визначити масу гідрогенкарбонату в 5 л води.
20	1	Яку масу натрію карбонату треба додати до 0,2 м <sup>3</sup> води, щоб усунути жорсткість, яка становить 3,8 ммоль/дм <sup>3</sup> ?
	2	Під час кип'ятіння 150 мл води, що містить кальцію гідрогенкарбонат, випав осад масою 2,1 мг. Чому дорівнює жорсткість води?
	3	Жорсткість води, яка містить тільки кальцію гідрогенкарбонат, становить 3,5 ммоль/дм <sup>3</sup> . Визначити масу гідрогенкарбонату в 3,5 л води.

## 2 ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ФІЛЬТРУВАННЯМ

### 2.1 Теоретичні положення

Сутність методу фільтрування полягає в пропусненні води, що містить нерозчинні домішки, через фільтруючий матеріал, проникний для рідини і не проникний для твердих часток. Під час пропуснення води через шар зернистого матеріалу залежно від заряду і співвідношення розмірів домішок води і зерен фільтруючого завантаження можуть відбуватися три типи фільтрування:

1. Затримання домішок на поверхні фільтруючого шару (плівкове фільтрування);
2. Затримання домішок у порах фільтруючого шару (об'ємне фільтрування);
3. Одночасне утворення домішками плівки і їх відкладання в порах завантаження.

Водоочисні споруди, на яких здійснюється процес фільтрування, називають фільтрами. Фільтри за виглядом фільтруючого середовища ділять на тканинні (сітчасті), каркасні (намивні) і зернисті.

У техніці водопідготовки найширше застосовують зернисті фільтри. Фільтри з зернистим завантаженням можна класифікувати за низкою основних ознак:

- за швидкістю фільтрування: повільні (0,1...0,3 м/год), швидкі (5...10 м/год) і надшвидкісні (36...100 м/год);
- за тиском, під яким вони працюють: відкриті (безнапірні) і напірні;
- за напрямком фільтруючого потоку: однопотокові, двопотокові, багатопотокові;
- за крупністю фільтруючого матеріалу: дрібно-, середньо- і грубозернисті;
- за кількістю фільтруючих шарів: одно-, дво- і багат шарові.

Фільтруюче завантаження – основний робочий елемент фільтрувальних споруд, тому правильний вибір його параметрів (матеріалу завантаження, мінімального, максимального і еквівалентного діаметрів зерен фільтруючого матеріалу, коефіцієнта форми зерен, пористості і висоти шару завантаження) має першорядне значення для нормальної роботи фільтрів. У табл. 2.1 наведено характеристики зернистих фільтруючих матеріалів.

Знаходять застосування і активні фільтруючі матеріали, які завдяки своїм властивостям можуть витягувати з води не тільки завислі і колоїдні домішки, але й істинно розчинені забруднення. Так, для стабілізаційного оброблення води використовують мармурову крихту і магномасу. Все ширше застосовують активоване вугілля для вилучення з води речовин, що обумовлюють присмаки і запахи. Використовують природний іонообмінний матеріал цеоліт для видалення з води розчинених сполук фтору і нітрогену. Доступність і дешевизна цього матеріалу дають змогу все ширше застосовувати його в якості завантаження фільтрувальних апаратів.

Таблиця 2.1 – Характеристика фільтруючих матеріалів

Матеріал	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Пористість завантаження, %	Коефіцієнт форми зерен
Кварцовий пісок	2,6...2,65	40...42	1,17
Антрацит подрібнений	1,6...1,7	45	1,15
Керамзит подрібнений неподрібнений	1,2...1,5	58...62	1,7...2,5
	1,7...1,8	45	1,3
Горілі породи	2,4...2,5	52	2
Шунгізіт подрібнений	1,5...1,8	56...58	1,7...2,0
Доменні шлаки	2,6	42...44	–

Момент роботи фільтра, якщо втрата напору в фільтруючому завантаженні досягає гранично допустимої величини або починає погіршуватися якість фільтрату, служить сигналом

для вимикання фільтра на промивання для відновлення затримуючої здатності завантаження, яке здійснюють зворотним струмом фільтрованої води або повітря і води. Воду подають на промивання спеціальним промивним насосом з резервуару фільтрованої води.

Промивання фільтрів є допоміжним процесом, однак воно може вплинути на нормальний режим роботи фільтрів. Якщо в процесі промивання фільтруюче завантаження відмивається недостатньо, то це призводить до постійного накопичення залишкових забруднень, що скорочує фільтроцикл, а іноді і зовсім виводить фільтр з роботи. Тому основне завдання промивання фільтрів – встановлення такого відносного розширення шару завантаження, за якого забезпечується практично повне відмивання зерен завантаження від прилиплих до них в процесі фільтрування забруднень.

Серійно випускають напірні фільтри з такими діаметрами, мм: 1000, 1400, 1500, 2000, 2600, 3000, 3400. Висота фільтруючого завантаження в фільтрах всіх розмірів прийнята 1,2 м. Найбільший діаметр напірного фільтра з умов зручності перевезення залізничним транспортом прийнятий 3,4 м, фільтруюча площа такого фільтра становить 7,1 м<sup>2</sup>. Тому у разі значної продуктивності водоочисної установки часто доводиться приймати велику кількість фільтрів.

На водопідготовчих установках (ВПУ) механічні фільтри встановлюють для видалення завислих речовин, як правило, оскільки дуже рідкісні випадки, коли з води потрібне видалення тільки завислих речовин і не застосовують коагуляцію в освітлювачах.

У ВПУ широко застосовують напірні однопотокові фільтри з завантаженням кварцовим піском або подрібненим антрацитом, або в тих же фільтрах використовують двошарове завантаження: антрацит і кварцовий пісок. Механічні фільтри (вертикальні або горизонтальні) із завантаженням антрацитом або кварцовим піском з висотою шару завантаження  $\leq 1$  м застосовують в процесі очищення води, що містить до 50 мг/л завислих речовин. За вмісту у воді завислих речовин від 50 до 100 мг/л застосовують механічні фільтри з двошаровим завантаженням: 1) кварцовий пісок з еквівалентним діаметром частинок  $d_e = 0,5...1,2$  мм, висота шару завантаження  $H_{ш} = 0,7...0,8$  м; 2) подрібнений антрацит з еквівалентним діаметром частинок  $d_e = 0,8...1,8$  мм, висота шару завантаження  $H_{ш} = 0,4...0,5$  м.

При продуктивності установки більше 70 м<sup>3</sup>/год встановлюють не менше чотирьох фільтрів. Під час промивання одного з фільтрів збільшення швидкості фільтрування допускається не більше 30 %.

Розглядають два режими роботи механічних фільтрів: нормальний у разі роботи всіх фільтрів з періодичним відключенням одного на промивання і форсований, коли один фільтр в ремонті, а другий періодично відключають на промивання. Відключення фільтру на промивання проводять у разі зменшення прозорості фільтрату до 20 см за шрифтом або частіше у разі збільшення втрати напору на фільтрах до 6...8 м вод. ст. За невеликого вмісту завислих речовин промивання здійснюють рідко (1 раз в 1...3 діб).

Для розпушуючого промивання фільтруючого завантаження обов'язкове застосування освітленої води після фільтрів. Промивання механічних фільтрів може здійснюватися з бака, розташованого на позначці, достатньої для подолання опору механічного фільтра і тракту бак – дренаж фільтра. Ємність бака повинна забезпечити промивання фільтра і мати запас ще на одне промивання понад розрахункового числа. Бак має бути наповнений за час, не більше, ніж інтервали між промивками фільтрів. Допускається проводити промивання фільтрів з трубопроводу освітленої води, якщо забір води не перевищує 50 % витрати води на фільтрах.

У разі промивання фільтрів насосами з баків освітленої води ємність останніх повинна передбачати ці витрати і запас води ще на одне промивання.

Для одношарових фільтрів, завантажених кварцовим піском, рекомендують застосовувати водно-повітряне промивання в такому режимі: продування повітрям з інтенсивністю 15...20 л/(с · м<sup>2</sup>) протягом 1...2 хв, потім спільна водно-повітряне промивання з інтенсивністю подачі повітря 15...20 л/(с · м<sup>2</sup>) і води 3...4 л/(с · м<sup>2</sup>) протягом 4...5 хв і подальша подача води з інтенсивністю 6...8 л/(с · м<sup>2</sup>) протягом 4...5 хв.

## 2.2 Методика розрахунку механічного фільтра

Розрахункову швидкість фільтрування за нормального режиму роботи фільтрів (усі фільтри працюють, один перебуває в резерві)  $\omega'_n$  визначають із рівняння:

$$\omega'_n = \frac{n \cdot P \cdot 1000}{24 \cdot C_{oc}}, \text{ м/год}, \quad (2.1)$$

де  $n$  – кількість необхідних для кожного фільтра промивань за добу; для одного фільтра кількість промивань повинна бути не більше 3;

$C_{oc}$  – концентрація завислих часток у воді, що надходить на фільтрування, мг/л;

$P$  – брудоемність завантаження, кг/м<sup>2</sup>. Брудоемність фільтруючого завантаження шаром 1 м за фракційного складу 0,6...1,4 мм становить в середньому 2,5 кг/м<sup>2</sup>.

Розрахункову сумарну площу фільтрування  $F'$ , визначають із рівняння:

$$F' = \frac{Q \cdot \alpha}{\omega'_n}, \text{ м}^2 \quad (2.2)$$

де  $Q$  – продуктивність фільтрів за освітленою водою, м<sup>3</sup>/год;

$\alpha$  – коефіцієнт, що враховує витрату води на власні потреби механічних фільтрів, орієнтовно приймають рівним 1,1, потім уточнюють

Площу фільтрування  $F_\phi$  і діаметр кожного фільтра  $d_\phi$  визначають шляхом вибору відповідної площі фільтрування і діаметра стандартних фільтрів, що випускаються заводами.

Розрахункову площу одного фільтра визначають за рівнянням:

$$F'_\phi = \frac{F'}{a-1}, \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

де  $(a-1)$  – кількість працюючих фільтрів; один фільтр перебуває в резерві.

Вибирають стандартний фільтр, що має найближче значення площі фільтрування  $F_\phi$ , і приймають фактичні значення діаметра фільтра  $d_\phi$  та площі фільтрування. Площі фільтрування стандартних фільтрів насипного типу залежно від діаметра наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Діаметри та площі фільтрування стандартних фільтрів

Діаметр фільтра, $d_\phi$ , мм	700	1000	1500	2000	2600	3000	3400
Площа фільтрування, $F_\phi$ , м <sup>2</sup>	0,39	0,76	1,72	3,1	5,2	6,95	9,1

Для обраних стандартних фільтрів визначають фактичну швидкість фільтрування за нормального режиму (усі фільтри працюють, один у резерві) за формулою:

$$\omega_\phi = \frac{Q+q}{F_\phi \cdot (a-2)}, \quad (2.4)$$

де  $q$  – середньогодинна витрата води на власні потреби, м<sup>3</sup>/год.

Швидкість фільтрування у разі форсованого режиму (один фільтр перебуває на промиванні та один фільтр – у резерві) визначають із рівняння:

$$\omega_\phi = \frac{Q+q}{F_\phi \cdot (a-2)}, \quad (2.5)$$

де 2 – число відключених фільтрів.

Якщо отримане значення  $\omega_n$  або  $\omega_\phi$  перевищує швидкість фільтрування за відповідного режиму, припустиму в табл. 2.3, необхідно збільшити діаметр фільтра або кількість установлених фільтрів.

Витрата води на одне відмивання механічного фільтра:

$$d = \frac{60 \cdot i \cdot t \cdot F_\phi}{1000}, \text{ м}^3 \quad (2.6)$$

де  $i$  – інтенсивність розпушуючого промивання фільтра, л/(с · м<sup>2</sup>);

$t$  – тривалість розпушуючого промивання фільтра, хв.

Значення  $i$  та  $t$  приймають за табл. 2.3 залежно від використовуваного типу завантаження фільтра.

Таблиця 2.3 – Загальні дані для всіх варіантів розрахунків

Параметр	Завантаження фільтра	
	кварцовий пісок	антрацит
Діаметр фільтруючого матеріалу, мм	0,5...1,2	0,6...1,4
Висота фільтруючого шару, м	1,0	1,0
Насипна маса фільтруючого матеріалу	1,6	0,8
Швидкість фільтрування, м/год		
нормальний режим	5	5
форсований режим	7,5	7,5
Інтенсивність розпушуючого промивання, л/(с · м <sup>2</sup> )	12	12
Тривалість розпушуючого промивання, хв	20	20

Середньогодинна витрата води на власні потреби:

$$q = \frac{d \cdot n \cdot (a - 1)}{24}, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (2.7)$$

### 2.3 Алгоритм розрахунку механічного фільтра

Розрахувати механічний фільтр якщо, витрата очищеної води  $Q = 4 \text{ м}^3/\text{год}$ , концентрація завислих часток у воді  $C_{oc} = 20 \text{ мг/л}$ , число промивань фільтра в добу  $n = 2$ , кількість установлених фільтрів  $a = 5$ .

Розв'язок.

1. Визначають розрахункову швидкість фільтрування у разі нормального режиму за рівнянням (2.1):

$$\omega'_n = \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 1000}{24 \cdot 20} = 10,42 \text{ м/год.}$$

2. Визначають розрахункову сумарну площу фільтрування за рівнянням (2.2):

$$F' = \frac{4 \cdot 1,1}{10,42} = 0,42 \text{ м}^2.$$

3. Приймають загальну кількість установлених фільтрів. За умовою загальна кількість установлених фільтрів  $a = 5$ .

4. Визначають розрахункову площу одного фільтра за рівнянням (2.3):

$$F_\phi = \frac{0,42}{5 - 1} = 0,105 \text{ м}^2.$$

5. Приймають фактичне значення площі фільтрування одного фільтра за табл. 2.2 (приймають найближче до розрахункового значення площі фільтрування стандартного фільтра).

$$F_\phi = 0,39 \text{ м}^2; d_\phi = 700 \text{ мм.}$$

6. Визначають витрату води на промивання одного механічного фільтра за рівнянням (2.6):

$$d = \frac{60 \cdot 12 \cdot 20 \cdot 0,39}{1000} = 5,616 \text{ м}^3/\text{год.}$$

7. Визначають середньогодинну витрату води на власні потреби за рівнянням (2.7):

$$q = \frac{5,616 \cdot 2 \cdot (5-1)}{24} = 1,872 \text{ м}^3/\text{год.}$$

8. Визначають фактичну швидкість фільтрування у разі нормального режиму за рівнянням (2.4):

$$\omega_n = \frac{4 + 1,872}{0,39 \cdot (5-1)} = 3,76 \text{ м/год.}$$

9. Якщо фактична швидкість фільтрування перевищує швидкість фільтрування за нормального режиму, припустиму в табл. 2.3, збільшують діаметр фільтра, або кількість фільтрів і знову проводять розрахунки.

$$3,76 < 5 \text{ м/год.}$$

10. Визначають швидкість фільтрування у разі форсованого режиму за рівнянням (2.5):

$$\omega_\phi = \frac{4 + 1,872}{0,39 \cdot (5-2)} = 5,02 \text{ м/год.}$$

11. Якщо отримане значення перевищує швидкість фільтрування за форсованого режиму, припустиму в табл. 2.3, збільшують діаметр фільтра, або кількість фільтрів і знову проводять розрахунки.

$$5,02 < 7,5 \text{ м/год.}$$

Результати розрахунків заносять в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків

Найменування показників	Позначення	Значення
1. Витрата очищеної води, м <sup>3</sup> /год	Q	4
2. Витрата води на власні потреби, м <sup>3</sup> /год	q	1,872
3. Концентрація завислих речовин у воді, мг/л	C <sub>oc</sub>	20
4. Загальна кількість установлених фільтрів	a	5
5. Діаметр фільтрів, мм	d <sub>ф</sub>	700
6. Швидкість фільтрації: за нормального режиму роботи фільтрів, м/год; за форсованого режиму, м/год	$\omega_n$ $\omega_\phi$	3,76 5,02
7. Число регенерацій кожного фільтра в добу	n	2

## 2.4 Завдання для самостійної роботи

Дані загальні для всіх варіантів розрахунків наведено в табл. 2.3. Вихідні дані для різних варіантів розрахунків механічного фільтра наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Вихідні дані для розрахунків механічного фільтра

№ вар.	Витрата очищеної води, Q, м <sup>3</sup> /год	Концентрація завислих речовин у воді, C <sub>ос</sub> , мг/л	Число промивань фільтра в добу, n	Кількість установлюваних фільтрів, а
1	30	10	1	5
2	60	10	1	4
3	100	10	1	4
4	150	10	1	5
5	200	10	1	6
6	30	30	1	5
7	60	30	1	4
8	100	30	1	4
9	150	30	1	5
10	200	30	1	6
11	30	50	1	5
12	60	50	1	4
13	100	50	1	4
14	150	50	1	5
15	200	50	1	6
16	30	75	3	5
17	60	75	3	5
18	100	75	3	5
19	150	75	3	6
20	200	75	3	7
21	30	100	3	5
22	60	100	3	5
23	100	100	3	5
24	150	100	3	6
25	200	100	3	7



## 3 ОЧИЩЕННЯ ВОДИ КОАГУЛЯЦІЄЮ ТА ОСВІТЛЕННЯМ

### 3.1 Теоретичні положення

Для водопостачання хімічних і енергетичних об'єктів використовують в більшості випадків природні води, як поверхневі (з річок, озер, ставків), так і підземні (з артезіанських свердловин). Всі води містять різноманітні домішки, що потрапляють у воду в процесі її природного кругообігу в природі. Крім того, можливе забруднення вододжерел побутовими і промисловими стоками.

Всі домішки, що забруднюють воду, підрозділяють на чотири види залежно від ступеня дисперсності їх часток.

Домішки *першої групи* – це грубодисперсні домішки: суспензії, емульсії, планктон, патогенні мікроорганізми. Такі домішки потрапляють у водойми внаслідок розмивання порід, змиву ґрунту, зі стічними водами. Найчастіше ці домішки представлені частинками глини, піску, ґрунту, мулу, а також емульсіями мінеральних масел, нафтопродуктами і т.д. На поверхні частинок можуть сорбуватися патогенні бактерії, віруси, радіоактивні речовини.

Домішки *другої групи* – це домішки колоїдного ступеня дисперсності. Вони є колоїдними компонентами ґрунту, гуміновими і фульвокислотами, які вимиваються з лісових, торф'яних і болотистих ґрунтів і надають воді бурого забарвлення; високомолекулярними сполуками природного походження, а також сполуками, які потрапляють у водойми зі стічними водами; вірусами та іншими мікроорганізми колоїдного ступеня дисперсності.

Стійкість колоїдних частинок у воді пояснюють наявністю частинок з однаковим за знаком електричним зарядом. Величина електричного заряду ( $\xi$ -потенціалу) перешкоджає укрупненню часток внаслідок сил масового тяжіння.

Укрупнення частинок цієї групи відбувається внаслідок нейтралізації заряду частинок шляхом введення речовин, що утворюють у воді колоїдні частинки протилежного знаку, або шляхом введення нейтральних частинок, що зменшують відстань між центрами частинок.

Сконцентровані колоїдні частинки утворюють фільтруючий шар, який затримує дрібні частинки з групи грубодисперсних і дуже дрібні з групи колоїдно-дисперсних за рахунок високої абсорбційної спроможності свіжоутворених колоїдів.

Домішки *третьої групи* – це домішки молекулярного ступеня дисперсності: гази, органічні речовини: солі, кислоти, луги, які не перейшли до іонного стану.

Домішки *четвертої групи* – це домішки іонного ступеня дисперсності. Вони утворюються внаслідок дисоціації у воді солей, кислот і лугів.

Домішки надають той або інший негативний вплив на властивості води, і тому повинні бути видалені перед її використанням для водопостачання об'єктів.

Одним з найширше застосовуваних на практиці прийомів зниження вмісту у воді колоїдно-розчинних і грубодисперсних домішок є седиментація (осадження) під дією сил тяжіння. Однак колоїдно-розчинні домішки, що обумовлюють мутність і кольоровість природних вод, відрізняються малими розмірами, внаслідок чого їх осадження відбувається вкрай повільно, оскільки сили дифузії превалюють над силами тяжкості. Тому колоїдні домішки води мають певну агрегативну стійкість. Однак під час нагрівання або заморожування, у разі додавання в воду електролітів, у разі накладення магнітного поля агрегативна стійкість домішок порушується, тобто відбувається їх коагуляція.

Коагуляція домішок води – це процес укрупнення дрібних колоїдних частинок, що відбувається внаслідок їх взаємного злипання під дією сил молекулярного тяжіння. Коагуляція завершується утворенням видимих неозброєним оком агрегатів (пластівців) і відділенням їх від рідкого середовища.

Механізм процесу коагуляції обумовлений наявністю навколо частинок гідратних оболонок або подвійного електричного шару.

Гідратні оболонки притаманні гідрофільним домішкам, які представлені в основному органічними речовинами. На їх поверхні є велика кількість поверхневих полярних груп, таких

як OH, COOH та ін., які є гідрофільними. Вони утримують навколо частинки гідратну оболонку. Гідрофільні частинки несуть зазвичай невеликі електричні заряди, та, як правило, під впливом електролітів коагулюють.

Частинки мулу, глини, пилоподібні піщинки і подібна їм суспензія природних вод є гідрофобними домішками. Вони майже позбавлені гідратних оболонок, але мають подвійний електричний шар і несуть значні електричні заряди. Ліквідація або зменшення електричного заряду частинок призводить до порушення агрегативної стійкості і коагуляції гідрофобних домішок.

У практиці водопідготовки для очищення природних вод застосовують хімічний метод коагулювання, який ґрунтується на введенні в систему електроліту – коагулянту. Дія коагулянту у воді зводиться до трьох основних процесів:

- коагуляція;
- флокуляція;
- співосадження і сорбція.

Спочатку, у разі внесення в оброблювану воду коагулянту (алюмінію сульфату, залізного купоросу і ін.), відбувається його дисоціація на іони металу і аніони сильних кислот. Іони металу, беручи участь в обміні з катіонами дифузного шару колоїдних домішок води, сприяють зниженню їх агрегативної стійкості і внаслідок цього стискуванню дифузного шару. В результаті формуються пластівці (у вигляді ланцюжків) з одного реагенту, оскільки зазвичай в природних водах умови для його коагулювання більш сприятливі, ніж для домішок води.

Потім на поверхні сформованих пластівців коагулянту адсорбуються колоїдні та істинно розчинені домішки води. У свою чергу, ланцюжки коагулянту можуть прилипати до поверхні великих домішок і укрупнюватися під час взаємного зіткнення. В кінцевому рахунку утворюються глобули (пластівці). Це явище носить назву флокуляції (укрупнення частинок). Крім того, на поверхні пластівців можуть адсорбуватися розчинені органічні речовини, що зумовлюють присмаки і запахи води, чим досягається певна її дезодорація.

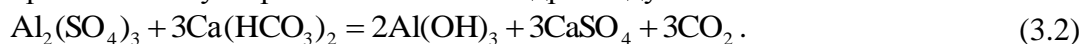
Останнім етапом процесу коагуляції є співосадження укрупнених частинок коагулянту спільно з іншими дисперсними домішками води.

В якості реагентів для коагуляції (коагулянтів) найчастіше використовують глинозем  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ , залізний купорос  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , феруму хлорид  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  та феруму сульфат  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ .

При додаванні до води алюмінію сульфату відбувається його гідроліз з утворенням важкорозчинного алюмінію гідроксиду, який сприяє злипанню колоїдних частинок і появленню в об'ємі води пластівчастої великої суспензії.



Оскільки природні води мають запас лужності, то введений катіон алюмінію взаємодіє також з гідрогенкарбонатами з утворенням алюмінію гідроксиду:



Алюмінію гідроксиди утворюють у воді солі з позитивним зарядом на гранулі. Ці колоїдні частинки підсилюють загальну коагулюючу дію введених солей.

У разі нестачі лужного резерву до води додають вапно або соду (підлугування). Оптимально підлугування виробляти вапном, оскільки в цьому випадку не утворюється вуглекислота і виходить найвище значення рН води. Процес коагулювання домішок води можна поліпшити шляхом видалення вуглекислоти з зони реакції продуванням повітрям.

У практиці водопідготовки найбільшого поширення в якості коагулянту отримав алюмінію сульфат. Алюмінію сульфат  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  – неочищений технічний продукт у вигляді шматків сірувато-зеленого кольору, які одержують шляхом оброблення бокситів, нефелінів або глин сульфатною кислотою. Він повинен мати не менше 9 %  $Al_2O_3$ , що відповідає вмісту близько 30 % чистого алюмінію сульфату. Він також містить близько 30 % нерозчинних домішок і до 35 % води.

Очищений алюмінію сульфат одержують у вигляді плит сірувато-перламутрового кольору з неочищеного продукту або глинозему розчиненням в сульфатній кислоті. Він повинен мати не менше 13,5 %  $Al_2O_3$ , що відповідає вмісту 45 % алюмінію сульфату. Обидва розглянутих коагулянти перевозять навалом в закритих залізничних вагонах.

Для оброблення води випускають також 23...25 % розчин алюмінію сульфату. У разі його застосування відпадає необхідність у спеціальному обладнанні для розчинення коагулянту, а також спрощуються та здешевлюються вантажно-розвантажувальні роботи і транспортування.

Очищення природних вод від завислих речовин і колоїдних домішок проводять в освітлювачах із шаром завислого осаду типів ВТИ, ЦНИИ-2 або ЦНИИ-3, які працюють успішно тільки за умови попереднього оброблення води коагулянтом. Освітлювачі забезпечують більш високий ефект освітлення води і мають більш високу продуктивність, ніж відстійники.

Принцип роботи освітлювачів зі завислим осадом такий. Оброблювана вода, змішана з реагентами, вводиться в освітлювач знизу і рівномірно розподіляється за площею робочого коридору. Далі вода рухається знизу вгору і проходить через шар раніше сформованого завислого осаду, що складається з маси завислих у висхідному потоці пластівців, які безперервно хаотично рухаються, але весь шар в цілому нерухомий. Він знаходиться в стані динамічної рівноваги, обумовленого рівністю швидкості висхідного потоку води і середньої швидкості осадження пластівців.

Під час пропускання води через завислий шар витягнуті з неї домішки залишаються в ньому, при цьому об'єм шару повинен безперервно збільшуватися, але цього не відбувається, оскільки передбачено безперервне видалення надлишкового осаду з завислого шару в осадощільнювач, де він ущільнюється і скидається у водостік. Освітлена вода, що пройшла через шар завислого осаду, збирається за допомогою збірних жолобів або труб і відводиться для подальшого оброблення на фільтри.

Стабільна робота освітлювача досягається у разі сталості витрати і температури оброблюваної води. Спонтанні коливання витрат води викликають розмивання завислого шару і винос пластівців в зону освітлення. У разі коливання температури води, особливо під час додавання теплішої, ніж знаходиться в освітлювачі, виникають конвективні струми, що призводять до порушення завислого шару і замутнення освітленої води. Щоб забезпечити нормальну роботу освітлювачів, допускають протягом години коливання витрати  $\pm 10\%$  і температури оброблюваної води  $\pm 1^\circ C$ .

В процесі коагуляції води в освітлювачі, крім оптимального значення температури 25...30  $^\circ C$ , має суворо дотримуватися її сталість (допустимі коливання  $\pm 1^\circ C$  на годину). Несталість температури порушує завислий шар осаду, що веде до підвищення каламутності освітленої води.

Якість коагульованої води залежить від складу вихідної води і дотримання оптимальних умов коагуляції в освітлювачі. У разі нормальної роботи освітлювача, налагодженої технології коагуляції якість коагульованої води зазвичай одержують такою:

- залишкова перманганатна окисність становить 40...30 % вихідної величини;
- вміст завислих речовин до 10 мг/л;
- прозорість води за шрифтом не менше 30 см;
- залишковий вміст сполук 10 ... 40 % вихідної величини;
- залишковий вміст феруму 0,03...0,3 мг/л;
- залишковий вміст алюмінію менше 0,05 мг/л.

### 3.2 Методика розрахунку

Оптимальну дозу коагулянту можна розрахувати залежно від каламутності води за емпірично встановленою формулою:

$$D_k = 3,5\sqrt{M}, \text{ г/м}^3, \quad (3.3)$$

де  $D_K$  – доза коагулянту – безводного алюмінію сульфату  $Al_2(SO_4)_3$ , г/м<sup>3</sup>;

$M$  – каламутність вихідної води, мг/л.

Дозу технічного  $Al_2(SO_4)_3$  розраховують за такою формулою:

$$D_{Al_2(SO_4)_3} = \frac{100 \cdot D_K}{a_{Al_2(SO_4)_3}}, \text{ г/м}^3, \quad (3.4)$$

де  $a_{Al_2(SO_4)_3}$  – вміст  $Al_2(SO_4)_3$  у технічному алюмінію сульфаті, %.

Як коагулянт використовують алюмінію сульфат, що містить 45 % алюмінію сульфату, а також близько 20 % нерозчинних домішок і до 35 % води.

Площа поперечного перерізу контактної зони освітлювача визначають за формулою:

$$F_{kc} = \frac{Q}{3,6 \cdot v_0}, \text{ м}^2, \quad (3.5)$$

де  $Q$  – продуктивність освітлювача, м<sup>3</sup>/год;

$v_0$  – розрахункова швидкість висхідного руху води на виході з контактної зони, мм/с.

$$v_0 = (0,6 + 0,02 \cdot t) \cdot (1 - 3,5 \cdot C_0) \cdot v_{\text{ч}}, \quad (3.6)$$

де  $t$  – температура води, що піддається очищенню, °С;

$C_0$  – об'ємна концентрація шламу в контактній зоні освітлювача, мл/мл;

$v_{\text{ч}}$  – умовна швидкість вільного осадження частинок шламу, мм/с.

Значення  $v_{\text{ч}}$  приймають за табл. 3.1 залежно від параметру  $a_k$ , який є процентним вмістом  $Al(OH)_3$  в осаді, що утворюється.

Таблиця 3.1 – Значення параметрів осаду залежно від кількості в ньому  $Al(OH)_3$

Величина $a_k$ , мас. %	Показники властивостей суспензії за температури 20 °С		
	$v_{\text{ч}}$ , мм/с	$\gamma_0$ , г/л	$100 \cdot \alpha$ , см <sup>-1</sup>
3	2,25	85	1,7
5	2,15	65	2,9
10	1,95	64	5,5
20	1,7	15	7,5
30	1,45	6	8,1
40	1,2	4,4	8,4
50	1,0	3,5	8,5
60	0,9	2,6	8,6
70	0,85	2,4	8,65
80	0,8	2,3	8,7
90	0,75	2,2	8,75
100	0,7	2,0	8,8

У разі використання для коагуляції алюмінію сульфату:

$$a_k = \frac{100 \cdot P_{Al(OH)_3}}{P_{Al(OH)_3} + M + P_{\text{н.д.}}}, \text{ \%}, \quad (3.7)$$

де  $P_{Al(OH)_3}$  – маса алюмінію гідроксиду, який виділився в осад, г/м<sup>3</sup>;

$P_{\text{н.д.}}$  – кількість нерозчинних домішок, що містяться в технічному алюмінію сульфаті, г/м<sup>3</sup>;

Маса алюмінію гідроксиду, що виділився в осад, дорівнює:

$$P_{Al(OH)_3} = \frac{M_{Al(OH)_3} \cdot D_K}{M_{Al_2(SO_4)_3}}, \text{ г/м}^3, \quad (3.8)$$

де  $M_{Al(OH)_3}$  – молекулярна маса алюмінію гідроксиду,  $M_{Al(OH)_3} = 156$  г/моль;

$M_{Al_2(SO_4)_3}$  – молекулярна маса алюмінію сульфату,  $M_{Al_2(SO_4)_3} = 342$  г/моль.

Кількість нерозчинних домішок, що надходять в воду з коагулянтном, визначають за формулою:

$$P_{н.д.} = \frac{b_{н.д.} \cdot D_{Al_2(SO_4)_3}}{100}, \text{ г/м}^3, \quad (3.9)$$

де  $b_{н.д.}$  – вміст нерозчинних домішок в технічному алюмінію сульфаті, %, приймають за табл. 3.3.

Об'ємну концентрацію шламу в контактній зоні освітлювача визначають за рівнянням:

$$C_0 = \frac{1}{\alpha_c} \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{(100 + 1,65 \cdot t) \cdot H_c}}, \text{ мл/мл}, \quad (3.10)$$

де  $\Pi$  – прозорість води за "хрестом";

$\alpha_c$  – коефіцієнт моделювання концентрації суспензії в контактному середовищі освітлювача;

$H_c$  – приведена висота зони контактного середовища освітлювача, см.

Прозорість води  $\Pi$  на виході з освітлювача визначають за таким рівнянням:

$$\Pi = \frac{880}{M_0}, \quad (3.11)$$

де  $M_0$  – каламутність очищеної води на виході з освітлювача, мг/л.

Таблиця 3.2 – Значення параметрів осаду залежно від кількості в ньому  $Al(OH)_3$

$D_{ос}, \text{ м}$	4	6	8	10	12	14	16
$\alpha_c$	1,0	0,93	0,88	0,85	0,82	0,8	0,78

Значення  $\alpha_c$  приймають залежно від діаметра освітлювача за табл. 3.2.

Приведену висоту контактної зони освітлювача приймають рівною  $H_c = 200$  см.

Питому площу поперечного перерізу шламоушільнювача у процентах від площі поперечного перерізу контактної зони освітлювача визначають за формулою:

$$B = \frac{100 \cdot G_{ос}}{\gamma_0 \cdot C_0} - q_{пр}, \%, \quad (3.12)$$

де  $G_{ос}$  – кількість осаду, що утворюється, г/м<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  – умовна об'ємна маса частинок в контактній зоні освітлювача, г/м<sup>3</sup>;

$C_0$  – об'ємна концентрація осаду в контактній зоні освітлювача, мл/мл;

$q_{пр}$  – розмір продування, % від розрахункової продуктивності освітлювача.

Кількість осаду, що утворюється в процесі коагуляції, визначають з рівняння:

$$G_{ос} = M + P_{Al(OH)_3} + P_{н.д.}, \text{ г/м}^3. \quad (3.13)$$

Площу поперечного перерізу шламоушільнювача визначають за формулою:

$$F_{шy} = \frac{F_{кc} \cdot B}{100}, \text{ м}^2. \quad (3.14)$$

Діаметр шламоушільнювача дорівнює:

$$d_{шy} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{шy}}{\pi}}, \text{ м}. \quad (3.15)$$

Площа поперечного перерізу освітлювача становитиме:

$$F_{ос} = F_{кc} + F_{шy}, \text{ м}^2. \quad (3.16)$$

Діаметр освітлювача визначають за формулою:

$$d_{oc} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{oc}}{\pi}}, \text{ м.} \quad (3.17)$$

Висота робочої зони освітлювача (зони контактної зони і зони освітлення води) розраховують за формулою:

$$H_{oc} = H_{kc} + H_{з.ос.}, \text{ м,} \quad (3.18)$$

де  $H_{з.ос.}$  – висота зони освітлення, приймають рівною 200...250 см.

Розрахунковий розмір продування освітлювача становить:

$$Q_{пр} = \frac{G_{oc} \cdot Q}{1000 \cdot \gamma_1}, \text{ м}^3/\text{ГОД,} \quad (3.19)$$

де  $\gamma_1$  – ваговий вміст твердої фази в ущільненому осаді, г/л.

Ваговий вміст твердої фази в ущільненому осаді розраховують за формулою:

$$\gamma_1 = \frac{\alpha \cdot p_1 \cdot \tau}{\ln\left(\frac{\alpha \cdot p_1 \cdot \tau}{\gamma_0}\right)}, \text{ г/л,} \quad (3.20)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт ущільнення осаду,  $\text{см}^{-1}$ ;

$\tau$  – час накопичення осаду;

$$p_1 = \frac{0,6 \cdot G_{oc} \cdot Q}{10 \cdot F_{ш}}, \text{ г/см}^2. \quad (3.21)$$

Добова витрата технічного алюмінію сульфату:

$$G_{доб}^k = \frac{24 \cdot D_{Al_2(SO_4)_3} \cdot (Q + Q_{пр})}{1000}, \text{ кг/добу.} \quad (3.22)$$

### 3.3 Алгоритм розрахунку освітлювача

Розрахувати освітлювач, якщо продуктивність освітлювача  $Q = 60 \text{ м}^3/\text{год}$ ; каламутність вихідної води  $M = 120 \text{ г/м}^3$ ; коефіцієнт моделювання концентрації суспензії в контактній середовищі освітлювача  $\alpha_c = 0,95$ , продування освітлювача  $q_{пр} = 0,24 \%$ .

Розрахунок освітлювача проводять в такому порядку:

1. За рівнянням (3.3) визначають дозу 100 % коагулянту  $Al_2(SO_4)_3$ :

$$D_K = 3,5\sqrt{M} = 3,5\sqrt{120} = 38,34 \text{ г/м}^3.$$

2. За рівнянням (3.4) визначають дозу технічного продукту; значення  $a_{Al_2(SO_4)_3}$  приймають за табл. 3.3,  $a_{Al_2(SO_4)_3} = 45 \%$ :

$$D_{Al_2(SO_4)_3} = \frac{100 \cdot D_K}{a_{Al_2(SO_4)_3}} = \frac{100 \cdot 38,34}{45} = 85,2 \text{ г/м}^3.$$

Таблиця 3.3 – Технологічні дані для розрахунку освітлювача

Найменування показників	Позначення	Значення
1. Вміст $Al_2(SO_4)_3$ у технічному алюмінію сульфаті, %.	$a_{Al_2(SO_4)_3}$	45
2. Температура води, що піддається очищенню, °С	t	30
3. Вміст нерозчинних домішок в технічному алюмінію сульфаті, %	$b_{н.д.}$	20
4. Каламутність очищеної води на виході з освітлювача, мг/л.	$M_0$	10
5. Приведена висота контактної зони освітлювача, см.	$H_c$	200

6. Висота зони освітлення, см.	$H_{з.ос.}$	200
7. Час накопичення осаду	$\tau$	6

3. За формулою (3.8) визначають масу алюмінію гідроксиду, що виділився в осад:

$$P_{Al(OH)_3} = \frac{M_{Al(OH)_3} \cdot D_K}{M_{Al_2(SO_4)_3}} = \frac{156 \cdot 38,34}{342} = 17,49, \text{ г/м}^3.$$

4. За рівнянням (3.9) розраховують кількість нерозчинних домішок, що надходять в воду з коагулянтном, значення  $b_{н.д.}$  приймають за табл. 3.3,  $b_{н.д.} = 20 \%$ :

$$P_{н.д.} = \frac{b_{н.д.} \cdot D_{Al_2(SO_4)_3}}{100} = \frac{20 \cdot 85,2}{100} = 17,04, \text{ г/м}^3.$$

5. За рівнянням (3.7) визначають вміст  $Al(OH)_3$  в осаді, що утворюється:

$$a_k = \frac{100 \cdot P_{Al(OH)_3}}{P_{Al(OH)_3} + M + P_{н.д.}} = \frac{100 \cdot 17,49}{17,49 + 120 + 17,04} = 11,32 \%$$

6. Відповідно до отриманого значення  $a_k$  за табл. 3.1 за допомогою інтерполяції визначають:

- умовну швидкість вільного осадження частинок шламу  $v_{ч} = 1,917$  мм/с;
- умовну об'ємну масу частинок в контактній зоні освітлювача  $\gamma_0 = 57,532$  г/л;
- коефіцієнт моделювання концентрації суспензії в контактному середовищі освітлювача  $100 \cdot \alpha = 5,764$  см<sup>-1</sup>;  $\alpha = 0,05764$  см<sup>-1</sup>.

7. За рівнянням (3.11) розраховують прозорість води на виході з освітлювача, значення  $M_0$  приймають за табл. 3.3,  $M_0 = 10$  г/м<sup>3</sup>:

$$\Pi = \frac{880}{M_0} = \frac{880}{10} = 88 \text{ см.}$$

8. За рівнянням (3.10) розраховують об'ємну концентрацію шламу в контактній зоні освітлювача; значення  $t$  і  $H_c$  приймають за табл. 3.3;  $t = 30$  °С,  $H_c = 200$  см:

$$C_0 = \frac{1}{\alpha_c} \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{(100 + 1,65 \cdot t) \cdot H_c}} = \frac{1}{0,95} \cdot \sqrt{\frac{88}{(100 + 1,65 \cdot 30) \cdot 200}} = 0,057 \text{ мл/мл.}$$

9. За рівнянням (3.6) визначають розрахункову швидкість висхідного руху води на виході з контактної зони:

$$v_0 = (0,6 + 0,02 \cdot t) \cdot (1 - 3,5 \cdot C_0) \cdot v_{ч} = (0,6 + 0,02 \cdot 30) \cdot (1 - 3,5 \cdot 0,057) \cdot 1,917 = 1,84 \text{ мм/с.}$$

10. За рівнянням (3.5) розраховують площу поперечного перерізу контактної зони освітлювача:

$$F_{кc} = \frac{Q}{3,6 \cdot v_0} = \frac{60}{3,6 \cdot 1,84} = 9,06 \text{ м}^2.$$

11. За формулою (3.13) визначають кількість осаду, що утворюється в процесі коагуляції:

12. За рівнянням (3.12) визначають питому площу поперечного перерізу шламоушільнювача в процентах від площі поперечного перерізу контактної зони освітлювача:

$$B = \frac{100 \cdot G_{ос}}{\gamma_0 \cdot C_0} - q_{пр} = \frac{100 \cdot 154,53}{1000 \cdot 57,532 \cdot 0,057} - 0,24 = 1,15 \%$$

13. За рівнянням (3.14) визначають поперечного перерізу шламоушільнювача

$$F_{шу} = \frac{F_{кc} \cdot B}{100} = \frac{9,06 \cdot 1,15}{100} = 0,1 \text{ м}^2.$$

14. За рівнянням (3.15) розраховують діаметр шламоушільнювача:

$$d_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{ш}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1}{3,14}} = 0,36 \text{ м.}$$

15. За рівнянням (3.16) визначають площу поперечного перерізу освітлювача:

$$F_{\text{ос}} = F_{\text{к}} + F_{\text{ш}} = 9,06 + 0,1 = 10,06 \text{ м}^2.$$

16. За формулою (3.17) розраховують діаметр освітлювача:

$$d_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{ос}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,06}{3,14}} = 3,58 \text{ м.}$$

17. За рівнянням (3.18) визначають висота робочої зони освітлювача значення висоти зони освітлення  $H_{3.ос}$  приймають за табл. 3.3;  $H_{3.ос} = 200$  см:

$$H_{\text{ос}} = H_{\text{с}} + H_{3.ос} = 200 + 200 = 400 \text{ см.}$$

18. За рівнянням (3.21) розраховують вміст твердої фази на одиницю площі шламоушільнювача:

$$p_1 = \frac{0,6 \cdot G_{\text{ос}} \cdot Q}{10 \cdot F_{\text{ш}}} = \frac{0,6 \cdot 154,53 \cdot 60}{10 \cdot 0,1} = 5563,08 \text{ г/см}^2.$$

19. За рівнянням (3.20) розраховують ваговий вміст твердої фази в ущільненому осаді:

$$\gamma_1 = \frac{\alpha \cdot p_1 \cdot \tau}{\ln\left(\frac{\alpha \cdot p_1 \cdot \tau}{\gamma_0}\right)} = \frac{0,05764 \cdot 5563,08 \cdot 6}{\ln\left(\frac{0,05764 \cdot 5563,08 \cdot 6}{57,532}\right)} = 548,16 \text{ г/л.}$$

20. За формулою (3.19) визначають величину продування освітлювача:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{G_{\text{ос}} \cdot Q}{1000 \cdot \gamma_1} = \frac{154,53 \cdot 60}{1000 \cdot 548,16} = 0,017 \text{ м}^3/\text{год.}$$

21. За рівнянням (3.22) визначають добову витрату коагулянту:

$$G_{\text{доб}}^{\text{к}} = \frac{24 \cdot D_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3} \cdot (Q + Q_{\text{пр}})}{1000} = \frac{24 \cdot 85,2 \cdot (60 + 0,017)}{1000} = 122,72 \text{ кг/добу.}$$

Результати розрахунків заносимо в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків

Найменування показників	Позначення	Значення
1. Продуктивність освітлювача за очищеною водою, м <sup>3</sup> /год	Q	60
2. Концентрація завислих речовин, г/м <sup>3</sup> :		
– у вихідній воді	M	120
– в очищеній воді	M <sub>0</sub>	10
3. Концентрація завислих речовин у воді, мг/л	C <sub>ос</sub>	20
4. Кількість 100 % алюмінію сульфату, витраченого на коагуляцію, г/м <sup>3</sup>	D <sub>к</sub>	38,34
5. Добова витрата коагулянту, кг/добу	G <sub>доб</sub> <sup>к</sup>	122,72
6. Розрахункова швидкість висхідного руху води на виході з контактної зони, мм/с	v <sub>0</sub>	1,84
7. Діаметр, м:		
– шламоушільнювача	d <sub>ш</sub>	0,36
– освітлювача	d <sub>ос</sub>	3,58
8. Величина продування освітлювача, м <sup>3</sup> /год	Q <sub>пр</sub>	0,017
9. Концентрація завислих частинок в ущільненому осаді, г/л	γ <sub>1</sub>	548,16



### 3.4 Завдання для самостійної роботи

Дані загальні для всіх варіантів розрахунків наведено в табл. 3.3. Вихідні дані для різних варіантів розрахунків освітлювача наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Вихідні дані для розрахунків освітлювача

№ вар.	Продуктивність освітлювача $Q$ , м <sup>3</sup> /год	Каламутність вихідної води $M$ , г/м <sup>3</sup> ;	Коефіцієнт моделювання концентрації суспензії $\alpha_c$	Продування освітлювача $Q_{пр}$ , %.
1	30	100	1,0	0,1
2	60	100	1,0	0,16
3	100	100	0,96	0,28
4	150	100	0,93	0,42
5	200	100	0,9	0,55
6	30	150	1,0	0,1
7	60	150	1,0	0,16
8	100	150	0,96	0,28
9	150	150	0,93	0,42
10	200	150	0,9	0,55
11	30	200	1,0	0,1
12	60	200	1,0	0,16
13	100	200	0,96	0,28
14	150	200	0,93	0,42
15	200	200	0,9	0,55
16	30	250	1,0	0,1
17	60	250	1,0	0,16
18	100	250	0,96	0,28
19	150	250	0,93	0,42
20	200	250	0,9	0,55
21	30	300	1,0	0,1
22	60	300	1,0	0,16
23	100	300	0,96	0,28
24	150	300	0,93	0,42
25	200	300	0,9	0,55

## 4 ЗМ'ЯГШЕННЯ ВОДИ Na-КАТІОНУВАННЯМ

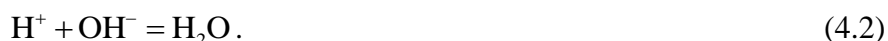
### 4.1 Теоретичні положення

Оброблення води методами іонного обміну ґрунтується на пропущенні вихідної або частково обробленої води через фільтруючий шар іонообмінного матеріалу, практично нерозчинного у воді, але здатного взаємодіяти з іонами, які містяться в оброблюваній воді. Матеріали, що мають спроможність обмінювати катіони, називають катіонітами, а матеріали, що мають спроможність обмінювати аніони, – аніонітами. Щоб одержати потрібну іонну форму іоніту, проводять регенерацію.

Катіоніти в процесі регенерації їх розчинами  $\text{NaCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  утворюють відповідно натрієву, гідрогенну або амонійну форми, які умовно можна позначити так:  $\text{NaR}$ ,  $\text{HR}$ ,  $\text{NH}_4\text{R}$ .

Під час пропущення оброблюваної води, яка містить катіони  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$ , через відрегенерований катіоніт перебігають реакції обміну іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  на іони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  або  $\text{NH}_4^+$ , що містяться в катіоніті; цей процес називають катіонуванням.

Аніоніти, відрегенеровані лугом ( $\text{NaOH}$  та ін.), утворюють гідроксильну форму, умовно позначену  $\text{ROH}$ . Якщо через відрегенерований аніоніт пропускати розчин кислоти, наприклад  $\text{HCl}$ , відбудеться реакція обміну аніонів (аніонування) і здійсниться взаємна нейтралізація іонів  $\text{H}^+$  (кислоти) і іонів  $\text{OH}^-$ , витіснених аніонами з аніоніту.



За своєю хімічною природою всі катіоніти є кислотами, все аніоніти – основами. Залежно від складу функціонально активних груп розрізняють типи іонітів за кислотністю (або основністю), катіоніти поділяють на сильно-, середньо- і слабокислотні, відповідно аніоніти на сильно-, середньо- і слабоосновні. За своїми технологічними властивостями вони мають суттєві відмінності (табл. 4.1).

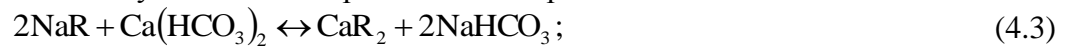
Слабоосновними аніонітами затримуються тільки аніони сильних кислот, аніони слабких кислот  $\text{HSiO}_3^-$  і  $\text{HCO}_3^-$  видаляються тільки сильноосновними аніонітами.

В процесі водопідготовки застосовують катіоніти: сульфовугілля (найдешевший), катіоніт КУ-2 (термостійкий), рідше катіоніт КУ-1 і слабокислотні КБ-4-П2. Сильнокислотні катіоніти КУ-2 і КУ-1 незначно знижують обмінну ємність зі зниженням  $\text{pH} < 7$ . Слабокислотні катіоніти виявляють здатність до обміну іонів за  $\text{pH} > 7$ .

Таблиця 4.1 – Технологічна характеристика іонообмінних матеріалів

Марка іоніту	Розмір зерен, мм	Насипна маса, т/м <sup>3</sup>		Повна обмінна ємність, г-екв/м <sup>3</sup>
		товарного продукту	у набряклому стані	
Катіоніти				
Сульфовугілля 1-го гатунку				
крупний СК-1	0,5...1,2	0,67...0,7	–	500
дрібний СМ-1	0,25...0,7	0,69...0,79	–	570
Катіоніт КУ-1	0,3...2,0	0,6...0,73	0,33	650
Катіоніт КУ-2-8	0,315...1,25	0,7...0,88	0,34	1700
Катіоніт КБ-4-П2	0,25...1,0	0,68...0,82	0,17...0,33	2800
Аніоніти				
Аніоніт АН-31	0,4...2,0	0,72...0,75	0,31	1500
Аніоніт АВ-17-8	0,355...1,25	0,74	0,33	800

Оброблення води методом Na-катіонування ґрунтується на пропущенні оброблюваної води через Na-форму катіоніту, для чого попередньо катіоніт регенерують натрію хлоридом (NaCl). В процесі Na-катіонування води перебігають такі реакції:



де NaR, CaR<sub>2</sub>, MgR<sub>2</sub> – сольові форми катіоніту.

Як видно з наведених реакцій, з оброблюваної води видаляються катіони Ca<sup>2+</sup> і Mg<sup>2+</sup>, а в оброблювану воду надходять іони Na<sup>+</sup>, аніонний склад води при цьому не змінюється.

Одноступінчастим Na-катіонуванням можна одержати воду з залишковою жорсткістю до 0,1 мг-екв/л, однак для одержання глибше пом'якшеної води (із залишковою жорсткістю 0,01...0,02 мг-екв/л) потрібно істотно збільшувати питому витрату солі на регенерацію фільтра, причому необхідно ретельно контролювати "просакування" жорсткості. У схемі двоступеневого Na-катіонування всі ці недоліки усуваються і надійно забезпечується залишкова жорсткість фільтрату менш 0,01 мг-екв/л. Число ступенів катіонування визначається вимогами до обробленої води.

## 4.2 Методика розрахунку

### 4.2.1 Розрахунок Na-катіонітових фільтрів першого ступеня

Розрахунок Na-катіонітових фільтрів починають зазвичай з підбору діаметра фільтрів, що випускаються промисловістю за швидкістю фільтрування.

Розрахункову сумарну площу фільтрування, F', м<sup>2</sup>, визначають за рівнянням:

$$F' = \frac{Q \cdot \alpha}{\omega'_n}, \quad (4.8)$$

де Q – продуктивність фільтрів за освітленою водою, м<sup>3</sup>/год;

α – коефіцієнт, що враховує витрату води на власні потреби механічних фільтрів, орієнтовно приймають рівним 1,1, потім уточнюють;

ω'<sub>n</sub> – розрахункова швидкість фільтрування, м/год; приймається за табл. 4.2 залежно від жорсткості вихідної води.

Таблиця 4.2 – Розрахункова швидкість фільтрування

Жорсткість вихідної води, Ж <sub>зар</sub> , мг-екв/л	1	2,5	5	7,5	10	15
Розрахункова швидкість фільтрування, ω' <sub>n</sub> , м/год	24	22,5	20	17,5	15	10

Площа фільтрування F<sub>ф</sub> і діаметр d<sub>ф</sub> кожного фільтра визначають шляхом підбору відповідної площі фільтрування та діаметру стандартних фільтрів, що випускаються заводами.

Визначають розрахункову площу одного фільтра за рівнянням:

$$F'_\phi = \frac{F'}{a - 1}, \quad (4.9)$$

де  $(a - 1)$  – кількість працюючих фільтрів. Кількість фільтрів 1 ступеня приймають не менше трьох (два працюють і один резервний).

Вибирають стандартний фільтр, який має найближче значення площі фільтрування і приймають фактичні значення діаметра фільтра  $d_\phi$  і площі фільтрування  $F_\phi$ .

Площі фільтрування стандартних іонообмінних фільтрів залежно від діаметра наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Діаметри і площі фільтрування стандартних фільтрів

Діаметр фільтра $d_\phi$ , мм	700	1000	1500	2000	2600	3000	3400
Площа фільтрування, $F_\phi$ , м <sup>2</sup>	0,39	0,76	1,72	3,1	5,2	6,95	9,1

Висоту шару катіоніту у фільтрі  $H_{ш}$  визначають за формулою:

$$H_{ш} = \frac{24 \cdot J_{зар} \cdot Q}{(a - 1) \cdot F_\phi \cdot n \cdot E_{роб}^{Na}}, \text{ м}, \quad (4.10)$$

де  $n$  – число регенерацій кожного фільтра у добу;

$J_{зар}$  – загальна жорсткість води, що надходить на Na-катіонітові фільтри, мг-екв/л;

$E_{роб}^{Na}$  – робоча обмінна ємність катіоніта під час Na-катіонування, мг-екв/м<sup>3</sup>; визначають за формулою:

$$E_{роб}^{Na} = \alpha_{эф} \cdot \beta_{Na} \cdot E_{повн} - 0,5 \cdot q_{пит} \cdot J_{зар}, \quad (4.11)$$

де  $\alpha_{эф}$  – коефіцієнт ефективності регенерації Na-катіоніту;

$\beta_{Na}$  – коефіцієнт, що враховує зниження обмінної ємності катіоніту за  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$  внаслідок впливу іонів  $Na^+$ , що містяться у вихідній воді;

$q_{пит}$  – питома витрата води на відмивання катіоніту, м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> катіоніту;

$E_{повн}$  – повна обмінна ємність катіоніту, г-екв/м<sup>3</sup>;

0,5 – частка пом'якшення відмивної води.

Висота шару катіоніту повинна дорівнювати  $H_{ш} = 1,5 \dots 2,5$  м. В іншому випадку змінюють число фільтрів, діаметр фільтрів або кількість регенерацій фільтра на добу і розрахунки повторюють знову.

Значення коефіцієнта  $\alpha_{эф}$  залежить від питомої витрати NaCl на регенерацію катіоніту  $q_c$ ; визначають за табл. 4.4. У свою чергу значення  $q_c$  залежать від вихідної жорсткості води, визначають за табл. 4.5.

Таблиця 4.4 – Залежність коефіцієнта ефективності регенерації  $\alpha_{эф}$  від питомої витрати солі  $q_c$  на регенерацію

$q_c$ , г/г-екв	100	150	200	250	300	400
$\alpha_{эф}$	0,62	0,74	0,81	0,86	0,9	0,91

Таблиця 4.5 – Питома витрата NaCl на регенерацію катіоніта

Жорсткість вихідної води $J_{зар}$ , мг-екв/л	1	2,5	5	7,5	10	15
Питома витрата NaCl на регенерацію катіоніта $q_c$ , г/г-екв	120	120	120	150	187,5	225

Значення коефіцієнта  $\beta_{Na}$  залежать від відношення концентрації іонів натрію в мг-екв/л у вихідній воді до її жорсткості і наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Значення коефіцієнта зниження обмінної ємності катіоніту  $\beta_{Na}$ 

$\frac{C_{Na}^2}{Ж_{зар}}^*$	0,01	0,05	0,1	0,5	1	5	10
$\beta_{Na}$	0,93	0,88	0,83	0,70	0,65	0,54	0,5

Значення питомої витрати води на відмивання катіоніту  $q_{пит}$  наведено в табл. 4.7, значення повної обмінної ємності катіоніту  $E_{повн}$  наведено в табл. 4.1.

Регенерацію катіоніту проводять технічною повареною сіллю. Витрата 100 % повареної солі на одну регенерацію Na-катіонітового фільтра визначають за формулою:

$$Q_c^{Na} = \frac{E_{роб}^{Na} \cdot F_{\phi} \cdot H_{ш} \cdot q_c}{1000}, \text{ кг}, \quad (4.12)$$

де  $q_c$  – питома витрата солі на регенерацію обмінної ємності катіоніту, г/г-екв.

Витрату технічної солі на добу визначають за формулою:

$$Q_{т.с} = \frac{Q_c^{Na} \cdot n \cdot (a - 1) \cdot 100}{p}, \text{ кг/добу}, \quad (4.13)$$

де  $p$  – вміст NaCl у технічній солі, наведено в табл. 4.7, %.

Витрати води на регенерацію Na-катіонітового фільтра складаються з витрат води на розпушуюче промивання, приготування регенераційного розчину, відмивання катіоніту від продуктів регенерації та надлишку NaCl.

Розпушування шару катіоніту необхідно для усунення злежуваності та видалення подрібнених частинок катіоніту. Витрату води на одне розпушуюче промивання фільтра визначають за формулою:

$$Q_{розп} = \frac{60 \cdot i \cdot t_{розп} \cdot F_{\phi}}{1000}, \text{ м}^3, \quad (4.14)$$

де  $i$  – інтенсивність розпушуючого промивання фільтрів, приймають за табл. 4.7, л/см<sup>2</sup>;

$t_{розп}$  – тривалість розпушуючого промивання, приймають за табл. 4.7, хв.

Витрату води на приготування регенераційних розчинів солі визначають за рівнянням:

$$Q_{р.р.} = \frac{Q_c^{Na} \cdot 100}{1000 \cdot b_{р.р.} \cdot \rho_{р.р.}}, \text{ м}^3, \quad (4.15)$$

де  $b_{р.р.}$  – концентрація регенераційного розчину, приймають за табл. 4.7, %;

$\rho_{р.р.}$  – густина регенераційного розчину, приймають за табл. 4.7, т/м<sup>3</sup>.

Витрату води на відмивання катіоніту від продуктів регенерації визначають за рівнянням:

$$Q_{відм} = q_{пит} \cdot F_{\phi} \cdot H_{ш}, \text{ м}^3, \quad (4.16)$$

де  $q_{пит}$  – питома витрата води на відмивання катіоніту, приймають за табл. 4.7, м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> катіоніту.

Витрата води на одну регенерацію фільтра становить:

$$Q_{в.п.}^{\phi} = Q_{розп} + Q_{р.р.} + Q_{відм}, \text{ м}^3. \quad (4.17)$$

Середньогодинну витрату води на власні потреби Na-катіонітових фільтрів визначають за рівнянням:

\*  $C_{Na}$  – концентрація іонів  $Na^+$  у вихідній воді, мг-екв/л. Зазвичай концентрацію іонів натрію у воді виражають в мг/л. Щоб виразити концентрацію в мг-екв/л, потрібно це значення розділити на еквівалент натрію, тобто на 23.

$$Q_{\text{в.п.}} = \frac{Q_{\text{в.п.}}^{\phi} \cdot n \cdot (a-1)}{24}, \text{ м}^3/\text{ГОД.} \quad (4.18)$$

Фактична швидкість фільтрування у разі нормального режиму роботи фільтрів:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{Q + Q_{\text{в.п.}}}{F_{\phi} \cdot (a-1)}, \text{ м/ГОД.} \quad (4.19)$$

Фактична швидкість фільтрування у разі форсованого режиму роботи фільтрів (один фільтр на регенерації і один в резерві):

$$\omega_{\phi} = \frac{Q + Q_{\text{в.п.}}}{F_{\phi} \cdot (a-2)}, \text{ м/ГОД.} \quad (4.20)$$

Час між регенерації фільтра визначають з рівняння:

$$T_{\text{Na}} = \frac{24}{n} - \frac{t_{\text{рег}}^{\text{Na}}}{60}, \text{ ГОД.} \quad (4.21)$$

де  $T_{\text{Na}}$  – межрегенерацийний період кожного Na-катионитового фільтра;

$n$  – кількість регенерацій кожного фільтра за добу;

$t_{\text{рег}}^{\text{Na}}$  – час регенерації фільтра, хв.

Час регенерації фільтра визначають за формулою:

$$t_{\text{рег}}^{\text{Na}} = c + t_{\text{р.р.}} + t_{\text{відм}}, \text{ хв.} \quad (4.22)$$

де  $t_{\text{розп}}$  – тривалість розпушуючого промивання, приймають за табл. 4.7, хв.;

$t_{\text{р.р.}}$  – час пропускання регенераційного розчину через фільтр, визначають за рівнянням:

$$t_{\text{р.р.}} = \frac{Q_{\text{р.р.}} \cdot 60}{\omega_{\text{р.р.}} \cdot F_{\phi}}, \text{ хв,} \quad (4.23)$$

де  $\omega_{\text{р.р.}}$  – швидкість пропускання регенераційного розчину, приймають за табл. 4.7, м/ГОД.

Час відмивання від продуктів регенерації визначають за рівнянням:

$$t_{\text{відм}} = \frac{Q_{\text{відм}} \cdot 60}{\omega_{\text{відм}} \cdot F_{\phi}}, \text{ хв,} \quad (4.24)$$

де  $\omega_{\text{відм}}$  – швидкість відмивання, приймають за табл. 4.7, м/ГОД.

Кількість фільтрів, що одночасно регенерують визначають за рівнянням:

$$n_{\text{о.р.}} = \frac{n \cdot a \cdot t_{\text{рег}}^{\text{Na}}}{24 \cdot 60}. \quad (4.25)$$

#### 4.2.2 Розрахунок Na-катионітових фільтрів другого ступеня

Розрахунок Na-катионітових фільтрів другого ступеня аналогічний розрахунку фільтрів першого ступеня. На відміну від фільтрів першого ступеня під час розрахунку фільтрів другого ступеня приймають жорсткість оброблюваної води 0,1 мг-екв/л, швидкість фільтрування до 40 м/год, висоту шару катионіту 1,5 м, питому витрату солі на регенерацію катионіту 300...400 г/г-екв, концентрацію регенераційних розчинів 8...12 %, робочу ємність поглинання сульфовугілля 250...300 г-екв/м<sup>3</sup>. Жорсткість фільтрату після другого ступеня Na-катионування приймають рівною 0,01 мг-екв/л.

#### 4.2.3 Розрахунок стоків, що скидаються від Na-катионітових фільтрів

В процесі регенерації Na-катионітових фільтрів крім солей, що містяться у вихідній воді, скидаються продукти регенерації фільтрів –  $\text{CaCl}_2$  і  $\text{MgCl}_2$ , а також надлишок кухонної солі, який береться для більш глибокої регенерації фільтруючого матеріалу. Під час проведення

операції розпушування можливе попадання в стік подрібненого фільтруючого матеріалу; використовувана для регенерації технічна кухонна сіль містить до 7 % різних домішок, які також надходять в стік.

Кількість води, що скидається на добу від Na-катіонітових фільтрів, визначають за рівнянням:

$$Q_{\text{доб}}^{\text{Na}} = Q_{\text{в.п.}}^{\phi} \cdot n \cdot (a - 1), \text{ м}^3/\text{добу}. \quad (4.26)$$

Кількість продуктів регенерації  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{MgCl}_2$ , що скидаються за одну регенерацію фільтра визначають за рівнянням:

$$Ж_{\text{p}} = \frac{E_{\text{роб}}^{\text{Na}} \cdot F_{\phi} \cdot H_{\text{ш}}}{1000}, \text{ кг-екв}. \quad (4.27)$$

Частку солей Ca і Mg у фільтрі, що піддають регенерації, приймають в тому ж співвідношенні, в якому вони містилися у вихідній воді, наприклад, якщо у вихідній воді жорсткість кальцієва становила 70 %, то і частка кальцію в продуктах регенерації, які видаляються з фільтра буде  $g_{\text{Ca}} = 0,7$ .

Кількість  $\text{CaCl}_2$ , що видаляється за одну регенерацію фільтра, визначають за рівнянням:

$$G_{\text{CaCl}_2} = Ж_{\text{p}} \cdot g_{\text{Ca}} = Ж_{\text{p}} \cdot \frac{Ж_{\text{Ca}}}{Ж_{\text{заг}}}, \text{ кг-екв}, \quad (4.28)$$

де  $Ж_{\text{Ca}}$  – кальцієва жорсткість вихідної води, мг-екв/л.

Кількість  $\text{MgCl}_2$ , що скидається за одну регенерацію фільтра, визначають за формулою:

$$G_{\text{MgCl}_2} = Ж_{\text{p}} \cdot g_{\text{Mg}} = Ж_{\text{p}} \cdot \frac{Ж_{\text{Mg}}}{Ж_{\text{заг}}}, \text{ кг-екв}, \quad (4.29)$$

де  $Ж_{\text{Mg}}$  – магнієва жорсткість вихідної води, мг-екв/л.

Кількість  $\text{CaCl}_2$ , що скидається протягом доби, визначають за рівнянням:

$$G_{\text{CaCl}_2}^{\text{доб}} = \frac{M_{\text{e}}^{\text{CaCl}_2} \cdot G_{\text{CaCl}_2} \cdot (a - 1) \cdot n}{1000}, \text{ т/добу}, \quad (4.30)$$

де  $M_{\text{e}}^{\text{CaCl}_2}$  – еквівалентна маса  $\text{CaCl}_2$ ,  $M_{\text{e}}^{\text{CaCl}_2} = 55,5$  г.

Кількість  $\text{MgCl}_2$ , що скидається протягом доби, визначають за рівнянням:

$$G_{\text{MgCl}_2}^{\text{доб}} = \frac{M_{\text{e}}^{\text{MgCl}_2} \cdot G_{\text{MgCl}_2} \cdot (a - 1) \cdot n}{1000}, \text{ т/добу}, \quad (4.31)$$

де  $M_{\text{e}}^{\text{MgCl}_2}$  – еквівалентна маса  $\text{MgCl}_2$ ,  $M_{\text{e}}^{\text{MgCl}_2} = 47,6$  г.

Скидання продуктів регенерації від Na-катіонітових фільтрів другого ступеня окремо не розраховують, оскільки регенерацію цих фільтрів проводять 1 раз в 10...15 діб і значно раніше виснаження катіоніту, що не позначається на розрахунку, тому всі скиди приймають за першим ступенем Na-катіонування.

Надлишок солі, що скидається в каналізацію від однієї регенерації фільтра, визначають за рівнянням:

$$G_{\text{NaCl}} = \frac{(q_{\text{c}} - 58,44) \cdot E_{\text{роб}}^{\text{Na}} \cdot F_{\phi} \cdot H_{\text{ш}}}{1000}, \text{ кг}, \quad (4.32)$$

де 58,44 – теоретична питома витрата солі на регенерацію, г/г-екв.

Кількість повареної солі, що скидається в каналізацію протягом доби:

$$G_{\text{NaCl}}^{\text{доб}} = \frac{G_{\text{NaCl}} \cdot (a - 1) \cdot n}{1000}, \text{ т/добу}. \quad (4.33)$$

Скидання подрібненого катіоніту протягом доби незначно, річний знос катіоніту знаходять за рівнянням:

$$G_k = \frac{\gamma_k \cdot F_\phi \cdot H_{ш} \cdot (a-1) \cdot b}{100}, \text{ т/рік.} \quad (4.34)$$

де  $\gamma_k$  – насипна маса катіоніту, приймають за табл. 4.7 для катіоніту, що використовують у фільтрі, т/м<sup>3</sup>;

$b$  – механічний річний знос катіоніту, приймають за табл. 4.7 для катіоніту, що використовують у фільтрі, %.

### 4.3 Алгоритм розрахунку Na-катіонітового фільтру

Розрахувати Na-катіонітовий фільтр, якщо витрата води  $Q = 90$  м<sup>3</sup>/год; загальна жорсткість вихідної води  $Ж_{заг} = 10$  мг-екв/л; концентрація іонів кальцію  $Ж_{Ca} = 7$  мг-екв/л; концентрація іонів магнію  $Ж_{Mg} = 3$  мг-екв/л; концентрація іонів натрію  $C_{Na} = 75$  мг/л; кількість фільтрів  $a = 5$ ; число регенерацій фільтрів у добу  $n = 3$ .

Таблиця 4.7 – Технологічні дані для розрахунку Na-катіонітових фільтрів

Показник	Позначення	Сульфо-вугілля	Катіоніт КУ-2-8
Висота шару катіоніту, м	$H_{ш}$	1,5...2,0	1,5
Крупність зерен катіоніта, мм		0,5...1,2	0,5 1,2
Насипна маса катіоніту, т/м <sup>3</sup>	$\gamma_k$	0,68	0,79
Механічний річний знос катіоніту, %	$b$	15	10
Швидкість фільтрування, м/год, нормальна не повинна перевищувати за жорсткості води:	$\omega_n$		
0...5 мг-екв/л		25	25
5...10 мг-екв/л		15	15
10...15 мг-екв/л		10	10
Розпушуюче промивання катіоніту:			
– інтенсивність, л/(м <sup>2</sup> · с)	$i$	5	5
– тривалість, хв	$t_{розп}$	25	25
Число регенерацій кожного Na-катіонітового фільтра першого ступеня у добу	$n$	1...3	1...3
Концентрація регенераційного розчину, %	$b_{р.р.}$	6,5	6,5
Густина регенераційного розчину, т/м <sup>3</sup>	$\rho_{р.р.}$	1,045	1,045
Швидкість пропускання регенераційного розчину, м/год	$\omega_{р.р.}$	3,5	3,5
Вміст NaCl у технічній солі, %	$p$	90	90
Відмивання катіоніту від продуктів регенерації:			
– питома витрата відмивної води, м <sup>3</sup> на 1 м <sup>3</sup> катіоніту;	$q_{пит}$	5	6
– швидкість пропускання відмивної води через катіоніт, м/год	$\omega_{відм}$	7	7

Розрахунок Na-катіонітового фільтру проводять в такому порядку:

1. Визначають розрахункову сумарну площу фільтрування за рівнянням 4.8:

$$F' = \frac{Q \cdot \alpha}{\omega'_n} = \frac{90 \cdot 1,1}{15} = 6,6 \text{ м}^2.$$

2. Визначають розрахункову площу одного фільтру за рівнянням 4.9:



$$F_{\phi} = \frac{F}{a-1} = \frac{6,6}{5-1} = 1,65 \text{ м}^2.$$

3. Приймають фактичні значення діаметра фільтра і площі фільтрування одного фільтру  $F_{\phi}$  за табл. 4.3 (приймають найближче до розрахункового значення площі фільтрування стандартного фільтру):

$$F_{\phi} = 1,72 \text{ м}^2; d_{\phi} = 1500 \text{ мм}.$$

4. Визначають за табл. 4.5 питому витрату NaCl на регенерацію фільтра:

$$q_c = 187,5, \text{ г/г-екв.}$$

5. Визначають за табл. 4.4 значення коефіцієнта ефективності регенерації катіоніту:

$$\alpha_{\text{еф}} = 0,7025.$$

6. Визначають відношення квадрата концентрації іонів  $\text{Na}^+$  в вихідній воді до її жорсткості:

$$\frac{C_{\text{Na}}^2}{J_{\text{заг}}} = \frac{(75/23)^2}{10} = 1,06.$$

7. За табл. 4.6 визначають значення коефіцієнту зниження обмінної ємності катіоніту:

$$\beta_{\text{Na}} = 0,647.$$

8. Визначають робочу обмінну ємність катіоніту в процесі Na-катіонування за рівнянням 4.11; значення питомої витрати води на відмивання катіоніту  $q_{\text{пит}}$  наведено в табл. 4.7, значення повної обмінної ємності катіоніту  $E_{\text{повн}}$  наведено в табл. 4.1. Обираємо катіоніт КУ-2-8 з  $E_{\text{повн}} = 1700 \text{ г-екв/м}^3$ .

$$E_{\text{роб}}^{\text{Na}} = \alpha_{\text{еф}} \cdot \beta_{\text{Na}} \cdot E_{\text{повн}} - 0,5 \cdot q_{\text{пит}} \cdot J_{\text{заг}} = 0,7025 \cdot 0,647 \cdot 1700 - 0,5 \cdot 6 \cdot 10 = 742,68 \text{ г-екв/м}^3.$$

9. Визначають висоту шару катіоніту у фільтрі за формулою 4.10:

$$H_{\text{ш}} = \frac{24 \cdot J_{\text{заг}} \cdot Q}{(a-1) \cdot F_{\phi} \cdot n \cdot E_{\text{роб}}^{\text{Na}}} = \frac{24 \cdot 10 \cdot 90}{(5-1) \cdot 1,72 \cdot 3 \cdot 742,68} = 1,41 \text{ м}.$$

Приймають стандартне значення висоти шару катіоніту у фільтрі  $H_{\text{ш}} = 1,5 \text{ м}$ .

10. Провіряють умову  $1,5 \text{ м} \leq H_{\text{ш}} \leq 2,5 \text{ м}$ . Якщо умова не виконується, змінюють або марку катіоніту, або діаметр фільтрів, або їх кількість і розрахунки повторюють знову.

11. Визначають витрати на регенерацію катіоніта 100 % натрію хлориду за рівнянням 4.12:

$$Q_c^{\text{Na}} = \frac{E_{\text{роб}}^{\text{Na}} \cdot F_{\phi} \cdot H_{\text{ш}} \cdot q_c}{1000} = \frac{742,68 \cdot 1,72 \cdot 1,5 \cdot 187,5}{1000} = 359,27 \text{ кг}.$$

12. Визначають витрату технічної повареної солі на регенерацію за рівнянням 4.13:

$$Q_{\text{т.с}} = \frac{Q_c^{\text{Na}} \cdot n \cdot (a-1) \cdot 100}{p} = \frac{359,27 \cdot 3 \cdot (5-1) \cdot 100}{90} = 4790,27 \text{ кг/добу}.$$

13. Визначають витрату води на одне розпушуюче промивання за рівнянням 4.14:

$$Q_{\text{розп}} = \frac{60 \cdot i \cdot t_{\text{розп}} \cdot F_{\phi}}{1000} = \frac{60 \cdot 5 \cdot 25 \cdot 1,72}{1000} = 12,9 \text{ м}^3.$$

14. Визначають витрату води на приготування регенераційного розчину солі за рівнянням 4.15:

$$Q_{\text{р.р.}} = \frac{Q_c^{\text{Na}} \cdot 100}{1000 \cdot b_{\text{р.р.}} \cdot \rho_{\text{р.р.}}} = \frac{359,27 \cdot 100}{1000 \cdot 6,5 \cdot 1,045} = 5,29 \text{ м}^3.$$

15. Визначають витрату води на промивання катіоніту від продуктів реакції за рівнянням 4.16:

$$Q_{\text{відм}} = q_{\text{пит}} \cdot F_{\phi} \cdot H_{\text{ш}} = 6 \cdot 1,72 \cdot 1,5 = 15,48 \text{ м}^3.$$

16. Визначають витрату води на одну регенерацію фільтру за рівнянням 4.17:

$$Q_{\text{в.п.}}^{\phi} = Q_{\text{розп}} + Q_{\text{р.р.}} + Q_{\text{відм}} = 12,9 + 5,29 + 15,48 = 33,67 \text{ м}^3.$$

17. Визначають середньогодинну витрату води на власні потреби за рівнянням 4.18:

$$Q_{\text{в.п.}} = \frac{Q_{\text{в.п.}}^{\phi} \cdot n \cdot (a-1)}{24} = \frac{33,67 \cdot 3 \cdot (5-1)}{24} = 16,84 \text{ м}^3/\text{год.}$$

18. Визначають фактичне значення швидкості фільтрування за нормальних умов роботи за рівнянням 4.19:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{Q + Q_{\text{в.п.}}}{F_{\phi} \cdot (a-1)} = \frac{90 + 16,84}{1,72 \cdot (5-1)} = 15,4 \approx 15 \text{ м/год.}$$

19. Визначають фактичне значення швидкості фільтрування у разі форсованого режиму роботи за рівнянням 4.20:

$$\omega_{\phi} = \frac{Q + Q_{\text{в.п.}}}{F_{\phi} \cdot (a-2)} = \frac{90 + 16,84}{1,72 \cdot (5-2)} = 23,7 \text{ м/год.}$$

20. Визначають тривалість пропускання регенераційного розчину через фільтр за рівнянням 4.23:

$$t_{\text{р.р.}} = \frac{Q_{\text{р.р.}} \cdot 60}{\omega_{\text{р.р.}} \cdot F_{\phi}} = \frac{5,29 \cdot 60}{3,5 \cdot 1,72} = 53 \text{ хв.}$$

21. Визначають тривалість відмивання фільтра від продуктів регенерації за рівнянням 4.24:

$$t_{\text{відм}} = \frac{Q_{\text{відм}} \cdot 60}{\omega_{\text{відм}} \cdot F_{\phi}} = \frac{15,48 \cdot 60}{7 \cdot 1,72} = 77 \text{ хв.}$$

22. Визначають тривалість регенерації фільтра за рівнянням 4.22:

$$t_{\text{рег}}^{\text{Na}} = t_{\text{розп}} + t_{\text{р.р.}} + t_{\text{відм}} = 25 + 53 + 77 = 155 \text{ хв.}$$

23. Визначають час між регенераціями фільтра за рівнянням 4.21:

$$T_{\text{Na}} = \frac{24}{n} - \frac{t_{\text{рег}}^{\text{Na}}}{60} = \frac{24}{3} - \frac{155}{60} = 5,42 \text{ год.}$$

24. Визначають кількість одночасно регенеруємих фільтрів за рівнянням 4.25:

$$n_{\text{о.р.}} = \frac{n \cdot a \cdot t_{\text{рег}}^{\text{Na}}}{24 \cdot 60} = \frac{3 \cdot 5 \cdot 155}{24 \cdot 60} = 1,6 \approx 2.$$

25. Кількість води, що скидається за добу від Na-катионітових фільтрів, визначають за рівнянням 4.26:

$$Q_{\text{доб}}^{\text{Na}} = Q_{\text{в.п.}}^{\phi} \cdot n \cdot (a-1) = 16,84 \cdot 3 \cdot (5-1) = 202,08 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

26. Визначають кількість продуктів регенерації  $\text{CaCl}_2$  і  $\text{MgCl}_2$ , що скидаються за одну регенерацію фільтра, за рівнянням 4.27:

$$Ж_{\text{р}} = \frac{E_{\text{роб}}^{\text{Na}} \cdot F_{\phi} \cdot H_{\text{ш}}}{1000} = \frac{742,68 \cdot 1,72 \cdot 1,5}{1000} = 1,916 \text{ кг-екв.}$$

27. Розраховують кількість  $\text{CaCl}_2$ , що видаляється за одну регенерацію фільтра, за рівнянням 4.28:

$$G_{\text{CaCl}_2} = Ж_{\text{р}} \cdot \frac{Ж_{\text{Ca}}}{Ж_{\text{зар}}} = 1,916 \cdot \frac{7}{10} = 1,341 \text{ кг-екв.}$$

28. Розраховують кількість  $\text{MgCl}_2$ , що скидається за одну регенерацію фільтра, за формулою 4.29:

$$G_{\text{MgCl}_2} = Ж_{\text{р}} \cdot \frac{Ж_{\text{Mg}}}{Ж_{\text{зар}}} = 1,916 \cdot \frac{3}{10} = 0,575 \text{ кг-екв.}$$

29. Визначають кількість  $\text{CaCl}_2$ , що скидається протягом доби, за рівнянням 4.30:

$$G_{\text{CaCl}_2}^{\text{доб}} = \frac{M_e^{\text{CaCl}_2} \cdot G_{\text{CaCl}_2} \cdot (a-1) \cdot n}{1000} = \frac{55,5 \cdot 1,341 \cdot (5-1) \cdot 3}{1000} = 0,89 \text{ т/добу.}$$

30. Розраховують кількість  $\text{MgCl}_2$ , що скидається протягом суток, за рівнянням 4.31:

$$G_{\text{MgCl}_2}^{\text{доб}} = \frac{M_e^{\text{MgCl}_2} \cdot G_{\text{MgCl}_2} \cdot (a-1) \cdot n}{1000} = \frac{47,6 \cdot 0,575 \cdot (5-1) \cdot 3}{1000} = 0,33 \text{ т/добу.}$$

31. Розраховують надлишок солі, що скидається в каналізацію від однієї регенерації фільтра, за рівнянням 4.32:

$$G_{\text{NaCl}} = \frac{(q_c - 58,44) \cdot E_{\text{роб}}^{\text{Na}} \cdot F_{\text{ф}} \cdot H_{\text{ш}}}{1000} = \frac{(187,5 - 58,44) \cdot 742,68 \cdot 1,72 \cdot 1,5}{1000} = 247,29 \text{ кг.}$$

32. Визначають кількість повареної солі, що скидається в каналізацію протягом доби, за формулою 4.33:

$$G_{\text{NaCl}}^{\text{доб}} = \frac{G_{\text{NaCl}} \cdot (a-1) \cdot n}{1000} = \frac{247,29 \cdot (5-1) \cdot 3}{1000} = 2,97 \text{ т/добу.}$$

33. Розраховують річний знос катіоніту за рівнянням 4.34:

$$G_{\text{к}} = \frac{\gamma_{\text{к}} \cdot F_{\text{ф}} \cdot H_{\text{ш}} \cdot (a-1) \cdot b}{100} = \frac{0,79 \cdot 1,72 \cdot 1,5 \cdot (5-1) \cdot 10}{100} = 0,815 \text{ т/рік.}$$

Результати розрахунків заносять в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати розрахунків фільтрів Na-катіонітового пом'якшення води

Найменування показників	Позначення	Значення
1. Кількість пом'якшеної води, одержаної після Na-катіонітових фільтрів, м <sup>3</sup> /год	Q	90
2. Кількість води, витрачена на власні потреби, м <sup>3</sup> /год	Q <sub>в.п.</sub>	16,84
3. Кількість іонообмінних фільтрів, включно резервний	a	5
4. Діаметр іонообмінних фільтрів, мм	d <sub>ф</sub>	1500
5. Швидкість фільтрування за нормального режиму роботи фільтрів, м/год	ω <sub>н</sub>	15,4
6. Кількість регенерацій іонообмінних фільтрів у добу	n	3
7. Кількість технічної солі, що витрачається у добу на регенерацію, кг/добу	Q <sub>т.с</sub>	4790,27
8. Кількість стічних вод, що скидаються від Na-катіонітових фільтрів, м <sup>3</sup> /добу.	Q <sub>доб</sub> <sup>Na</sup>	202,08
9. Кількість $\text{CaCl}_2$ , що скидається в каналізацію, т/добу	G <sub>CaCl<sub>2</sub></sub> <sup>доб</sup>	0,89
10. Кількість $\text{MgCl}_2$ , що скидається в каналізацію, т/добу	G <sub>MgCl<sub>2</sub></sub> <sup>доб</sup>	0,33
11. Кількість повареної солі, що скидається в каналізацію, т/добу	G <sub>NaCl</sub> <sup>доб</sup>	2,97
12. Річний знос катіоніту, т/рік	G <sub>к</sub>	0,815

#### 4.4 Завдання для самостійної роботи

Розрахувати Na-катіонітовий фільтр.

Дані загальні для всіх варіантів розрахунків наведено в табл. 4.7. Вихідні дані для різних варіантів розрахунків Na-катіонітового фільтру наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Вихідні дані для розрахунків Na-катіонітового фільтру

№ вар.	Витрата води, Q, м <sup>3</sup> /год	Склад води				Кількість фільтрів, а	Кількість регенерацій фільтра за добу, п
		Жорсткість, Ж <sub>заг</sub> , мг-екв/л	Концентрація				
			іонів кальцію, Ж <sub>Ca</sub> , мг-екв/л	іонів магнію, Ж <sub>Mg</sub> , мг-екв/л	іонів натрію, С <sub>Na</sub> , мг/л		
1	30	1,6	1,17	0,43	12,4	3	2
2	60	1,6	1,17	0,43	12,4	3	2
3	100	1,6	1,17	0,43	12,4	4	2
4	150	1,6	1,17	0,43	12,4	5	2
5	200	1,6	1,17	0,43	12,4	4	2
6	30	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
7	60	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
8	100	4,5	3,5	1,0	35,0	5	3
9	150	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
10	200	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
11	30	7	5,0	2,0	55,0	5	3
12	60	7	5,0	2,0	55,0	5	3
13	100	7	5,0	2,0	55,0	5	3
14	150	7	5,0	2,0	55,0	4	3
15	200	7	5,0	2,0	55,0	5	3
16	30	10	7,0	3,0	75,0	4	3
17	60	10	7,0	3,0	75,0	4	3
18	100	10	7,0	3,0	75,0	5	3
19	150	10	7,0	3,0	75,0	5	3
20	200	10	7,0	3,0	75,0	5	3
21	30	15	11,0	4,0	115,0	5	3
22	60	15	11,0	4,0	115,0	5	3
23	100	15	11,0	4,0	115,0	5	3
24	150	15	11,0	4,0	115,0	5	3
25	200	15	11,0	4,0	115,0	5	3

## 5 ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ВОДИ

### 5.1 Теоретичні положення

Видалення з води розчинених газів – важлива частина комплексного технологічного процесу оброблення води. Необхідність цього процесу викликана прагненням зменшити інтенсивність корозії внутрішніх поверхонь теплосилового обладнання під дією розчинених в теплоносії агресивних газів. Крім того, наявність у воді розчиненого і карбону(IV) оксиду негативно позначається на ефективності роботи аніонітових фільтрів, встановлених в схемі очищення води.

Кисень і карбону(IV) оксид присутні у воді внаслідок розчинення у разі контакту води з атмосферним повітрям. Карбону(IV) оксид з'являється у воді також в процесі хімічного знесолення після стадії Н-катионування і в процесі пом'якшення води методами Na-Н-катионування. Азот – інертний газ, його наявність у воді обґрунтовано контактом води з атмосферним повітрям, появлення водню у воді – корозією внутрішніх поверхонь обладнання. Амоніак потрапляє у воду головним чином внаслідок амінування води і, крім того, присутній в хімічно очищеній воді, якщо в схемі підготовки води встановлені NH<sub>4</sub>-катионітові фільтри. Такі гази, як сульфур(IV) оксид і гідрогену сульфід можуть бути присутніми у воді в процесі її оброблення натрію сульфідом.

Найефективніший спосіб видалення розчинених газів з води – десорбція. Цей спосіб ґрунтується на відомих законах Генрі – Дальтона, що характеризують залежність між концентрацією у воді розчиненого газу і його парціальним тиском.

Застосування цих законів дає змогу визначити концентрацію газу за тієї умови, що в паровому просторі над водою знаходиться лише розглянутий газ і відсутні інші гази. Концентрацію розчиненого у воді газу виражають таким рівнянням:

$$C_r = K_r \cdot p_r = K_r \cdot (p_{\text{зар}} - p_{\text{H}_2\text{O}}), \quad (5.1)$$

де  $C_r$  – концентрація розчиненого у воді газу;

$K_r$  – коефіцієнт абсорбції газу водою;

$p_{\text{зар}}$  – загальний тиск;

$p_{\text{H}_2\text{O}}$  – парціальний тиск водяної пари.

Як видно з рівняння 5.1, зниження концентрації газу у воді відбувається зі зменшенням різниці  $(p_{\text{зар}} - p_{\text{H}_2\text{O}})$ , тобто у разі наближення парціального тиску водяної пари до значення повного тиску газової суміші. Це досягається створенням над поверхнею води, що містить розглянутий газ, суміші газів, в складі якої практично відсутній газ, що видаляється з води. Отже, для видалення газу з води необхідно створити умови, за яких парціальний тиск його над поверхнею води дорівнював б нулю.

Видалення газу з води істотно залежить від кінетики десорбції, яка може бути виражена рівнянням:

$$-\frac{dC_r}{d\tau} = (C_r - C_r^*) \cdot k \cdot f, \quad (5.2)$$

де  $\frac{dC_r}{d\tau}$  – швидкість десорбції;

$C_r$  – концентрація видаляемого газу;

$C_r^*$  – рівноважна концентрація газу;

$k$  – коефіцієнт пропорційності;

$f$  – питома поверхня розділу фаз.

Найбільший ефект досягається за  $C_r^* = 0$ , тобто за парціального тиску видаляемого газу, близькому до нуля. У цьому випадку рівняння 5.2 перетвориться до вигляду:

$$-\frac{dC_r}{dt} = C_r \cdot k \cdot f. \quad (5.3)$$

За сталих значень  $k$  і  $f$  для апарату концентрація газу у воді залежить тільки від часу дегазації, зі збільшенням часу дегазації концентрація розчиненого газу у воді зменшується. Повного звільнення води від розчиненого газу в який-небудь реальний відрізок часу досягти неможливо, тому час, необхідний для дегазації, знаходять, задаючись певною кінцевою концентрацією розчиненого у воді газу.

Ефект дегазації можна підвищити, збільшивши питому поверхню розділу фаз пари і води. В цьому випадку за інших рівних умов збільшується час контакту води з парою, що не містить видалюваного з води газу. На ефект дегазації істотно впливає підвищення температури води, це обумовлено тим, що з підвищенням температури зменшується коефіцієнт абсорбції газу водою.

### 5.1.1 Видалення розчиненого карбону(IV) оксиду

Під час пом'якшення води Na-катіонуванням присутні у воді кальцію і магнію гідрогенкарбонати переходять і натрію гідрогенкарбонат:



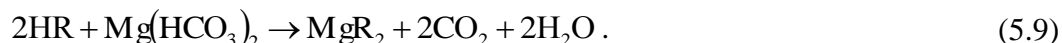
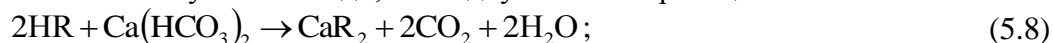
який в процесі подальшого нагрівання води піддається термічному розкладанню з утворенням карбону(IV) оксиду:



Утворений карбону(IV) оксид підвищує корозійну активність води і збільшує корозію внутрішніх поверхонь водогрійного обладнання. Тому перед декарбонізацією воду спочатку підкислюють сульфатною кислотою і розкладають натрію гідрогенкарбонат з утворенням натрію сульфату, карбону(IV) оксиду і води:



Потім з підкисленої води видаляють розчинений карбону(IV) оксид. Багато  $\text{CO}_2$  утворюється в схемах з H-катіонуванням води, яке відбувається за реакціями:



Зниження концентрації  $\text{CO}_2$  у воді можна досягти аерацією, тобто продуванням води повітрям. Цей спосіб видалення з води розчиненого  $\text{CO}_2$  широко застосовують на установках водопідготовки різних підприємств. Суть методу аерації полягає в продуванні через воду повітря, що містить незначну кількість  $\text{CO}_2$ . В результаті над поверхнею оброблюваної води створюється атмосфера, в якій парціальний тиск  $\text{CO}_2$  мізерно малий порівняно з парціальним тиском  $\text{CO}_2$  у воді.

Видалення з води карбону(IV) оксиду виробляють в апаратах, які називають декарбонізаторами, а сам процес носить назву декарбонізації. Декарбонізацію проводять в апаратах як плівкового, так і барботажного типу. Декарбонізатор плівкового типу є циліндричним сталевим баком, усередині якого розташовується насадка, що складається з кільця Рашига, що є керамічними кільцями. Вода подається в декарбонізатор зверху через патрубок і зливається через розподільні сопла на поверхню насадки. Оброблювана вода омиває елементи насадки тонким шаром, а назустріч їй рухається повітря, що подається в декарбонізатор вентилятором. Видаляемий з води  $\text{CO}_2$  переходить у повітря і разом з ним виводиться з декарбонізатора в атмосферу. Вода, яка пройшла очищення, стікає в піддон декарбонізатора і через гідравлічний затвор надходить в бак декарбонізованої води, який розташовують під днищем декарбонізатора.

У разі правильно обраної площі поверхні контакту води з повітрям і достатньої витрати повітря використання декарбонізатора плівкового типу дає змогу знизити концентрацію розчиненого CO<sub>2</sub> в декарбонізованій воді до 3...7 мг/кг.

Конструкція барботажного декарбонізатора передбачає продування стисненого повітря знизу через всю площу перетину бака, в який зверху надходить оброблювана вода. Для цих апаратів необхідно встановити вищий тиск повітря, що подається компресором, ніж для декарбонізатора плівкового типу. Крім того, необхідно передбачати очищення повітря від мастила компресора.

У практиці оброблення води набули широкого застосування декарбонізатори з насадкою з кілець Рашига. Характеристику кілець Рашига наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристика кілець Рашига

Розміри кілець, мм	Кількість кілець в 1 м <sup>3</sup> насадки за безладного завантаження	Поверхня насадки, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Маса кілець, кг/м <sup>3</sup>
25×25×3	53200	204	532
35×35×4	20200	140	505
50×50×5	6000	87,5	530

## 5.2 Методика розрахунку

Розрахунок декарбонізатора полягає у визначенні геометричних розмірів необхідної поверхні кілець Рашига і визначенні напору, створюваного вентилятором. Площу поперечного перерізу декарбонізатора визначають за щільністю зрошення насадки, тобто за витратою води, що припадає на одиницю площі поперечного перерізу декарбонізатора.

На підставі розрахунку необхідно зробити вибір декарбонізатора з тих, що випускаються промисловістю, при цьому необхідно забезпечити 25 % запас продуктивності за водою проти розрахункового.

Розмір кілець Рашига незалежно від продуктивності декарбонізатора становить 25 × 25 × 3 мм. Поверхня одиниці об'єму кілець Рашига дорівнює 204 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, а маса 532 кг/м<sup>3</sup>. Кількість кілець в 1 м<sup>3</sup> за безладного завантаження 53200 шт./м<sup>3</sup>, вільний об'єм на 1 м<sup>3</sup> насадки становить 0,74 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Вміст CO<sub>2</sub> у вихідній воді визначають за номограмою (рис. 5.1).

Номограма складена для води з сухим залишком 200 мг/л за температури 10 і 20 °С. У разі інших значень сухого залишку вводиться поправний коефіцієнт, значення якого наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Значення поправного коефіцієнта

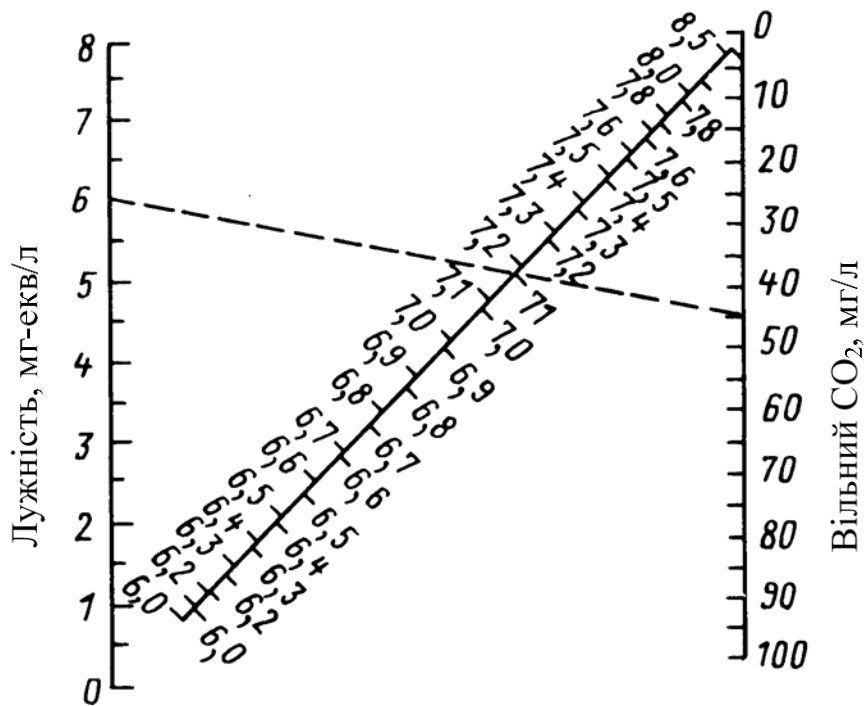
Сухий залишок, C <sub>с.з.</sub> , мг/л	100	200	300	400	500	750	1000
Поправний коефіцієнт α	1,05	1,0	0,96	0,94	0,92	0,87	0,83

Вміст карбону(IV) оксиду у вихідній воді розраховують за формулою:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{вих.в.}} = C_{\text{CO}_2}^{\text{н.}} \cdot \alpha, \text{ мг/л}, \quad (5.10)$$

де C<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>н.</sup> – вміст карбону(IV) оксиду в вихідній воді, мг/л, визначений за номограмою (рис. 5.1);

α – поправний коефіцієнт, відповідний сухому залишку вихідної води (табл. 5.2).



Р  
ис. 5.1 – Номограма для визначення вмісту у воді  $\text{CO}_2$  залежно від значення рН і лужності води

Кількість карбону(IV) оксиду, що надходить у декарбонізатор після Na-катіонування і підкислення (або після H-катіонування) води, визначають за формулою:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{поч}} = 44 \cdot Ж_{\text{к}} + C_{\text{CO}_2}^{\text{вих.в.}}, \text{ мг/л}, \quad (5.11)$$

де  $Ж_{\text{к}}$  – карбонатна жорсткість, яка руйнується під час Na-катіонування і підкислення або під час H-катіонування води, мг-екв/л.

Необхідну поверхню насадки  $F$  (поверхня десорбції), яка забезпечує видалення розчиненого карбону(IV) оксиду, розраховують за формулою:

$$F = \frac{G}{K_{\text{д}} \cdot \Delta C_{\text{ср}}}, \text{ м}^2, \quad (5.12)$$

де  $G$  – кількість  $\text{CO}_2$ , що видаляється у декарбонізаторі, визначають за рівнянням:

$$G = \frac{Q \cdot (C_{\text{CO}_2}^{\text{поч}} - C_{\text{CO}_2}^{\text{кін}})}{1000}, \text{ кг/год}, \quad (5.13)$$

де  $Q$  – продуктивність декарбонізатора,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$C_{\text{CO}_2}^{\text{кін}}$  – концентрація  $\text{CO}_2$  в декарбонізованій воді, приймають  $0,005 \text{ кг/м}^3$  (5 мг/л);

$K_{\text{д}}$  – коефіцієнт десорбції карбону(IV) оксиду, м/год, для декарбонізаторів, завантажених кільцями Рашига розміром  $25 \times 25 \times 3$  мм, за щільності зрошення  $60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  визначають залежно від температури декарбонізованої води за графіком, що наведено на рис. 5.2;

$\Delta C_{\text{ср}}$  – середня рушійна сила десорбції,  $\text{кг/м}^3$ , визначають за рис. 5.3 залежно від вмісту розчиненого карбону(IV) оксиду до та після декарбонізатора.



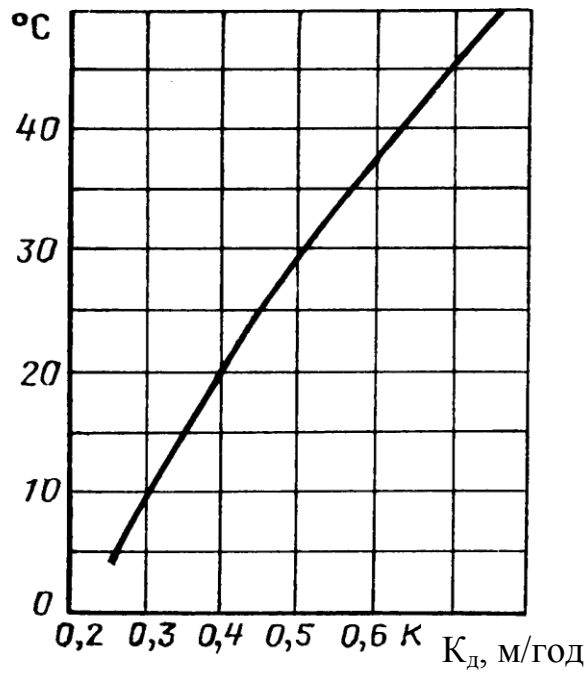
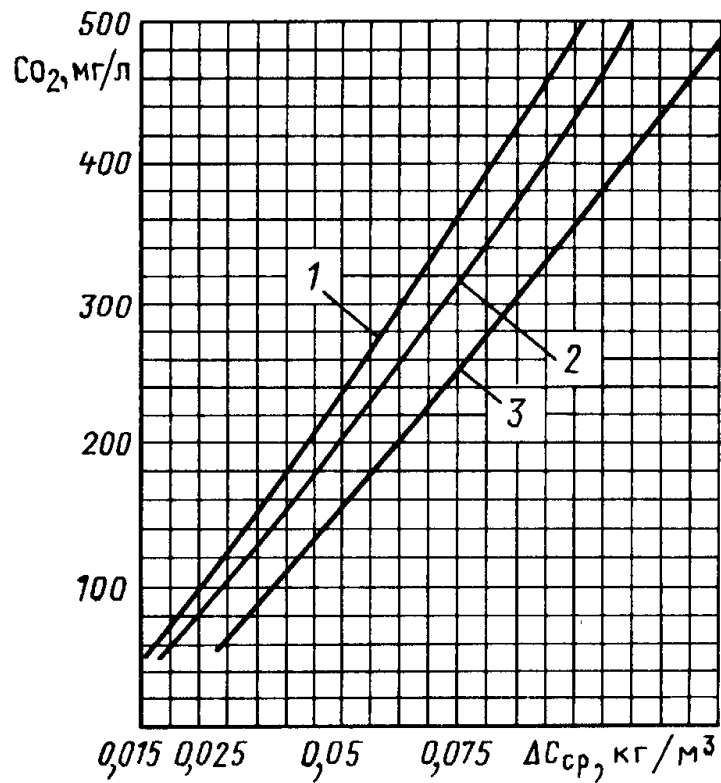


Рис. 5.2 – Залежність коефіцієнта десорбції карбону(IV) оксиду від температури



1 –  $C_{CO_2}^{кін} = 3$  мг/л; 2 –  $C_{CO_2}^{кін} = 5$  мг/л; 3 –  $C_{CO_2}^{кін} = 10$  мг/л.

Рис. 5.3 – Залежність  $\Delta C_{cp}$  від  $C_{CO_2}^{нач}$  за різних значень  $C_{CO_2}^{кін}$

Площу поперечного перерізу декарбонізатора визначають за рівнянням:

$$f = \frac{Q}{60}, \text{ м}^2, \quad (5.14)$$

де 60 – оптимальна щільність зрошення насадки,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , на одиницю площі поперечного перерізу декарбонізатора.

Уразі зниження щільності зрошення насадки с 60 до  $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  виникає необхідність збільшення площі декарбонізатора на 50 %, об'єму насадки – на 58 % та висоти насадки – на 5 %.

Діаметр декарбонізатора визначають за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot f}{\pi}}, \text{ м.} \quad (5.15)$$

Висоту насадки декарбонізатора визначають за формулою:

$$h = \frac{V_{\text{к.р.}}}{f}, \text{ м,} \quad (5.16)$$

де  $V_{\text{к.р.}}$  – об'єм, що займають кільця Рашига  $25 \times 25 \times 3$  мм за безладного завантаження, визначають за рівнянням:

$$V_{\text{к.р.}} = \frac{F}{204}, \text{ м}^3, \quad (5.17)$$

де  $F$  – поверхня десорбції,  $\text{м}^2$ ;

204 – поверхня  $1 \text{ м}^3$  насадки за безладного завантаження,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Витрату повітря, що подається в декарбонізатор, розраховують за формулою:

$$Q_{\text{пов}} = b \cdot Q, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (5.18)$$

де  $b$  – питома витрата повітря,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Сумарний опір проходу повітря через декарбонізатор (мм вод. ст.) розраховують за формулою:

$$\sum \zeta = 40 + 25 \cdot h, \quad (5.19)$$

де 25 мм вод. ст. – опір висоти шару в 1 м насадки з колець Рашига  $25 \times 25 \times 3$ .

### 5.3 Алгоритм розрахунку декарбонізатора

Розрахувати декарбонізатор, якщо продуктивність декарбонізатора  $Q = 90 \text{ м}^3/\text{год}$ ; карбонатна жорсткість, яка руйнується під час пом'якшення  $Ж_{\text{к}} = 3 \text{ мг-екв/л}$ ; рН = 7; лужність 4 мг-екв/л; сухий залишок  $C_{\text{с.з.}} = 200 \text{ мг/л}$ .

Таблиця 5.3 – Технологічні дані для розрахунку декарбонізатора

Показник	Позначення	Значення
Концентрація розчиненого карбону(IV) оксиду в декарбонізованій воді, мг/л	$C_{\text{CO}_2}^{\text{кін}}$	5,0
Температура води в декарбонізаторі, °C	t	20
Питома витрата повітря, що подається в декарбонізатор, $\text{м}^3/\text{м}^3$	b	25

Розрахунок декарбонізатора проводять в такому порядку:

1. Визначають вміст у воді вільного  $\text{CO}_2$  залежно від значення рН = 7 і лужності води, яка становить 4 мг-екв/л:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{н}} = 45 \text{ мг/л.}$$

2. Визначають поправний коефіцієнт залежно від значення сухого залишку  $C_{\text{с.з.}} = 200 \text{ мг/л}$  за табл. 5.2:

$$\alpha = 1.$$

3. Розраховують вміст карбону(IV) оксиду у вихідній воді за формулою 5.10:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{вих.в.}} = C_{\text{CO}_2}^{\text{н}} \cdot \alpha = 45 \cdot 1 = 45 \text{ мг/л.}$$

4. Визначають кількість карбону(IV) оксиду, що надходить у декарбонізатор після пом'якшення за формулою 5.11:

$$C_{\text{CO}_2}^{\text{поч}} = 44 \cdot Ж_{\text{к}} + C_{\text{CO}_2}^{\text{вих.в.}} = 44 \cdot 3 + 45 = 177 \text{ мг/л.}$$

5. Розраховують кількість  $\text{CO}_2$ , що видаляється у декарбонізаторі, за рівнянням 5.13:

$$G = \frac{Q \cdot (C_{\text{CO}_2}^{\text{поч}} - C_{\text{CO}_2}^{\text{кін}})}{1000} = \frac{90 \cdot (177 - 5)}{1000} = 15,48 \text{ кг/год.}$$

6. Визначають коефіцієнт десорбції карбону(IV) оксиду залежно від температури декарбонізованої води за графіком, що наведено на рис. 5.2:

$$K_{\text{д}} = 0,4 \text{ м/год.}$$

7. Визначають середню рушійну силу десорбції залежно від вмісту розчиненого карбону(IV) оксиду до та після декарбонізатора за графіком, що наведено на рис. 5.3:

$$\Delta C_{\text{ср}} = 0,045 \text{ кг/м}^3.$$

8. Розраховують необхідну поверхню насадки (поверхню десорбції), яка забезпечує видалення розчиненого карбону(IV) оксиду за формулою 5.12:

$$F = \frac{G}{K_{\text{д}} \cdot \Delta C_{\text{ср}}} = \frac{15,48}{0,4 \cdot 0,045} = 860 \text{ м}^2.$$

9. Розраховують площу поперечного перерізу декарбонізатора за рівнянням 5.14:

$$f = \frac{Q}{60} = \frac{90}{60} = 1,5 \text{ м}^2.$$

10. Розраховують діаметр декарбонізатора за формулою 5.15:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,5}{3,14}} = 1,4 \text{ м.}$$

11. Розраховують об'єм, що займають кільця Рашига  $25 \times 25 \times 3$  мм за безладного завантаження за рівнянням 5.17:

$$V_{\text{к.р.}} = \frac{F}{204} = \frac{860}{204} = 4,22 \text{ м}^3.$$

12. Визначають висоту насадки декарбонізатора за формулою 5.16:

$$h = \frac{V_{\text{к.р.}}}{f} = \frac{4,22}{1,5} = 2,8 \text{ м.}$$

13. Розраховують витрату повітря, що подається в декарбонізатор, за формулою 5.18:

$$Q_{\text{пов}} = 25 \cdot 60 = 1500 \text{ м}^3/\text{год.}$$

14. Розраховують сумарний опір проходу повітря через декарбонізатор (мм вод. ст.) за формулою:

$$\sum \zeta = 40 + 25 \cdot h = 40 + 25 \cdot 2,8 = 110 \text{ мм вод. ст.}$$

Результати розрахунків заносять в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати розрахунків декарбонізатора

Найменування показників	Позначення	Значення
1. Продуктивність декарбонізатора, м <sup>3</sup> /год	Q	90
2. Кількість розчиненого $\text{CO}_2$ у воді, яка надходить у декарбонізатор, мг/л	$C_{\text{CO}_2}^{\text{поч}}$	177
3. Кількість вільного $\text{CO}_2$ у декарбонізованій воді, мг/л	$C_{\text{CO}_2}^{\text{кін}}$	5
4. Діаметр декарбонізатора, м	D	1,4
5. Висота насадки в декарбонізаторі, м	h	2,8
6. Витрата повітря, що подається в декарбонізатор, м <sup>3</sup> /год	$Q_{\text{пов}}$	1500
7. Сумарний опір проходу повітря через декарбонізатор, мм вод. ст.	$\sum \zeta$	110

## 5.4 Завдання для самостійної роботи

Розрахувати декарбонізатор.

Дані загальні для всіх варіантів розрахунків наведено в табл. 5.3. Вихідні дані для різних варіантів розрахунків декарбонізатора наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Вихідні дані для розрахунків декарбонізатора

№ вар.	Продуктивність декарбонізатора, Q, м <sup>3</sup> /год	Склад вихідної води			
		карбонатна жорсткість, яка руйнується під час пом'якшення, Ж <sub>к</sub> , мг-екв/л	pH	лужність, мг-екв/л	сухий залишок, С <sub>с.з.</sub> , мг/л
1	30	1,0	6,5	1,5	100
2	60	1,0	6,5	1,5	100
3	100	1,0	6,5	1,5	100
4	150	1,0	6,5	1,5	100
5	200	1,0	6,5	1,5	100
6	30	3,0	7,0	4,0	200
7	60	3,0	7,0	4,0	200
8	100	3,0	7,0	4,0	200
9	150	3,0	7,0	4,0	200
10	200	3,0	7,0	4,0	200
11	30	5,0	7,5	6,0	500
12	60	5,0	7,5	6,0	500
13	100	5,0	7,5	6,0	500
14	150	5,0	7,5	6,0	500
15	200	5,0	7,5	6,0	500
16	30	7,0	8,0	8,0	750
17	60	7,0	8,0	8,0	750
18	100	7,0	8,0	8,0	750
19	150	7,0	8,0	8,0	750
20	200	7,0	8,0	8,0	750
21	30	10,0	8,5	12	1000
22	60	10,0	8,5	12	1000
23	100	10,0	8,5	12	1000
24	150	10,0	8,5	12	1000
25	200	10,0	8,5	12	1000

## ЛІТЕРАТУРА

1. Іванченко Л.В. Хімія і технологія води : навчальний посібник / Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, В.В. Брем. – Одеса : Екологія, 2017. – 212 с. Режим доступу: <http://dspace.opu.ua/xmlui/handle/123456789/1224>
2. . Конспект лекцій з курсу "Хімія та технологія води" для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Уклад.: Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, В.В. Брем, національний ун-т "Одеська політехніка". – Одеса, 2022. – 105 с.
3. Физико-химические методы очистки воды. Управление водными ресурсами. / [под ред. И.М. Астрелина и Х. Ратнавиры]. – Проект "Водная гармония", 2015 – 614 с.
4. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води. / А.К. Запольський – К.: Вища школа, 2005. – 671 с.
5. Тугай А.М. Водопостачання. / А.М. Тугай, В.О. Орлов. – Рівне: РДТУ, 2001. – 429 с.
6. Крамаренко Л.В. Технологія очищення природних вод: Навчальний посібник. / Л.В. Крамаренко. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 145 с.
7. Куликов Н.И. Теоретические основы очистки воды: Уч. пособие. / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов и др. – Макеевка: ДГАСА, 1999. – 277 с.
8. Вихрев В.Ф. Водоподготовка / В.Ф. Вихрев, М.С. Шкроб. – М.: Энергия, 1973.
9. Кожинов В.Ф. Очистка питьевой и технической воды / В.Ф. Кожинов – М.: ООО "Бастет", 2008 – 304 с.
10. Кишневский В.А. Технологии подготовки воды в энергетике / В.А. Кишневский – Одеса: Фенікс, 2008 – 400 с.
11. Громогласов А.А. Водоподготовка. Процессы и аппараты / Громогласов А.А., Копылов А.С., Пильщиков А.П. [под ред. О.И. Мартыновой]. – М.: Энергоиздат, 1990. – 272 с.
12. Белан Ф.И. Водоподготовка: учебник для энергетических и энергостроительных техникумов / Ф.И. Белан – М.: Энергия, 1979, – 208 с.
13. Шкроб М.С. Водоподготовка и водный режим водо-турбинных электростанций / [под ред. М.С. Шкроба]. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961 – 472 с.