

Тема 3. Водний баланс оборотних систем водопостачання

Мета заняття: розуміння особливостей балансу води в оборотних системах; усвідомлення забезпечення теплового режиму охолоджувачів води; опанування розрахунку коефіцієнта концентрування солей; усвідомлення особливостей збереження сольового балансу в оборотних системах; набуття навичок аналізу імовірності утворення осадів; усвідомлення водно-хімічного режиму оборотних систем

План

1. Баланс води в оборотній системі.
2. Параметри теплового режиму охолоджувачів води. Поняття коефіцієнта концентрування солей K_k або коефіцієнта випаровування.
3. Визначення K_k на підставі водного балансу системи.
4. Визначення коефіцієнта концентрування через сольовий баланс системи. Сольовий баланс.
5. Оцінка імовірності утворення осадів.
6. Водно-хімічний режим оборотних систем.

1. Для багаторазового використання води в обороті її приходится кондиціювати, готувати для повторного використання в системі охолодження. Інакше система буде не справлятися з її призначенням через порушення в її роботі. Такими порушеннями може бути поява на стінках теплообмінних апаратів відкладень, біологічних обростань, корозії металевих елементів системи тощо. Це приводить до збільшення втрат тиску при русі води по трубопроводах з відкладеннями та зменшенню їхньої пропускної здатності, погіршенню умов теплопередачі, зниженню ефекту охолодження тощо.

Баланс води в оборотній системі характеризується рівністю (усі витрати в відсотках від витрати оборотної води):

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (1)$$

P – підпиток води;

P_1 – втрата води на випаровування;

P_2 – втрата води на знесення з охолодника;

P_3 – витрата води на продування.

Втрати води із системи (рис. 1.1) на випаровування (P_1), знесення (P_2) і продування (P_3) характеризують водяний режим оборотної системи та називаються параметрами водяного режиму.

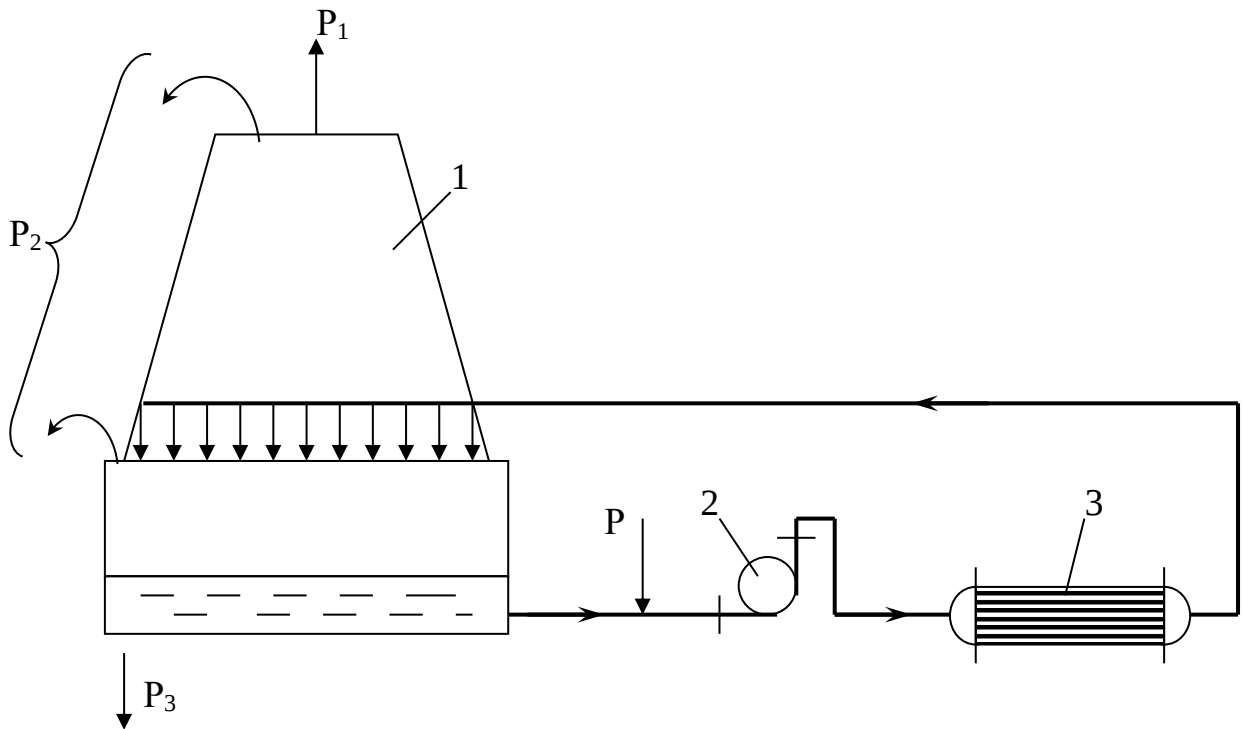
Втрати води на випаровування P_1 , %, залежать від ряду факторів і визначаються розрахунком. З достатньої для практики точністю цей параметр може бути визначений по формулі [4]:

$$P_1 = K \Delta t, \quad (2)$$

де Δt – різниця температур оборотної води, що подається в градирню і що відводиться;

K – коефіцієнт, прийнятий в залежності від температури повітря:

Значення коефіцієнта K приймається 0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,16 для температури повітря відповідно 0°C; 10°C; 20°C; 30°C; 40°C.



1 – охолоджувач (ставок, бризкальний басейн, градирня); 2 – циркуляційний насос; 3 – холодильник (теплообмінний апарат).

Рисунок 1.1 – Втрати води в оборотній системі

Втрати води на знесення P_2 , % для різних охолоджувачів складають:

Вентиляторні градирні з водоуловлювачами	0,1 ÷ 0,2
Баштові градирні	0,5 ÷ 1,5
Бризкальні басейни до 500 м³/год	2,0 ÷ 3,0
з 500 до 5000 м³/год	1,5 ÷ 2,0
вище 5000 м³/год	0,75 ÷ 1,0

2. Крім зазначених параметрів водяного режиму дуже істотними характеристиками систем оборотного водопостачання є параметри теплового режиму охолоджувачів води: температура оборотної води до і після градирні, різниця (перепад) цих температур, питоме теплове навантаження, різниця температур охолодженої води та повітря по змоченому термометру. Параметри теплового режиму нормовані в табл. 1.

Таблиця 1.1 - Параметри теплового режиму охолоджувачів води

Тип охолоджувача	Максимальне питоме теплове навантаження, тис.ккал/м ² *год	Перепад температури, °С	Мінімальна різниця температур охолодженої води та повітря по змоченому термометрі, °С
Ставки-охолоджувачі	0,2 – 0,4	5 – 10	10 – 12
Бризкальні басейни	5 – 20	5 – 10	10 – 12
Баштові градирні	60 – 100	5 – 15	8 – 10
Вентиляторні градирні	80 – 100	3 – 20	4 – 5

3. Під час використання й охолодженні води у системах зворотного водопостачання частина її втрачається на випаровування, краплинне винесення, у виробництві, з осадом, що видаляється з очисних споруд, зі скидом води з системи (продувкою). Вважають, що розчинені солі води, які випарилися (повністю або частково) залишаються у зворотній воді й підвищують їхню концентрацію. Усі втрати води в системі оборотного водопостачання компенсуються додаванням свіжої води. Ступінь підвищення концентрації розчинених у воді речовин називають коефіцієнтом концентрування солей або коефіцієнтом упарювання. Чисельне значення цього коефіцієнта може бути виражено за випаровуванням води як

$$K_y = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{P_2 + P_3 + P_4} = \frac{P_d}{P_d - P_1}, \quad (3)$$

де P_1 – втрати води, що відбуваються в системі внаслідок випаровування;

P_2 – втрати води на краплинне винесення при охолодженні води;

P_3 – продувка системи;

P_4 – втрати води з системи, що відбуваються з інших причин (втрати води зі зневодненням шламом, втрати води при аваріях, переливи внаслідок порушення

режиму водопостачання тощо).

Усі величини втрат визначають у відсотках від витрати циркуляційної в системі води.

Рівняння (3) можна представити в спрощеному вигляді:

$$K_y = 1 + \frac{P_1}{P_2 + P_3 + P_4}. \quad (4)$$

Отже, в системах зворотного водопостачання величина КК завжди понад 1 і ця величина тим більше чим менше величини P_2 , P_3 і P_4 . Коефіцієнт випаровування добре розчинних солей характеризує ступінь замкненості системи зворотного водопостачання. Величина КК, як правило, не перевищує 2-4. У деяких випадках, наприклад, у хімічній промисловості, цей коефіцієнт

досягає 8. Якщо припустити, що продувка в системі відсутня, тобто $P_3 = 0$, тоді маємо:

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

4. Сольовий баланс систем оборотного водопостачання має велике значення в практиці експлуатації цих систем. Концентрації тих чи інших солей, що надходять у системи оборотного водопостачання з додатковою водою, піддаються змінам і найчастіше дуже великим. Залежить це від розчинності даної солі, фізико-хімічних процесів, що відбуваються з нею, водяного режиму системи. При цьому концентрації солей в оборотній воді залежать не тільки від прийнятого водяного режиму, але і від потужності оборотної системи та часу, що пройшов з моменту її пуску.

Солі, що надходять у системи оборотного водопостачання з додатковою водою, варто розділяти на 2 основні групи:

- 1) солі добре розчинні, що не випадають в осад у системах ні при яких умовах їхньої роботи (хлориди калію, натрію, кальцію, магнію);
- 2) солі, що унаслідок недостатньої розчинності чи фізико-хімічних перетворень, що зазнають вони в системах оборотного водопостачання, можуть випадати в осад (сульфат, карбонат кальцію).

Особливий інтерес являють собою солі другої групи, що випадаючи в осад створюють великі ускладнення при експлуатації систем оборотного водопостачання. Потрібно розрахувати, якою повинна бути концентрація солі при тих чи інших умовах роботи системи та вжити необхідних заходів для запобігання утворення садів. Для того, щоб визначити, яка повинна бути концентрація в оборотній воді солі, необхідно знати закон зміни концентрації в часі та коефіцієнт концентрування солей, що не випадають в осад.

Якщо в додатковій воді містяться розчинені солі, що не випадають у вигляді осадів і не відкладаються в трубах і холодильниках, то спостерігається баланс солей, що виражається рівнянням

$$C_{доо} P = C_{об} (P_2 + P_3) = C_{об} (P - P_1).$$

$C_{доо}$ і $C_{об}$ – концентрація солі (чи іона) відповідно в додатковій і оборотній воді в г/м³.

При роботі оборотної системи внаслідок випаровування частини води P_1 відбувається поступове збільшення концентрації розчинених у воді солей (чи іонів), але тільки доти, поки кількість виведених із системи солей (чи іонів) із краплинним віднесенням P_2 і продувкою P_3 не стане рівним кількості солей (чи іонів), що вводяться з підпитком P .

Якщо міркувати спрощено, коефіцієнт концентрування солей – це коефіцієнт упарювання $K_y = C_{об} / C_{доо} = C_{об} / C_0$, дорівнює відношенню концентрації солей в оборотній системі до концентрації солей води, підживлення P .

$$K_y = \frac{P}{P_2 + P_3} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3} = 1 + \frac{P_1}{P_2 + P_3},$$

то K_y завжди більше 1, а

$$C_{об} = C_0 \left(1 + \frac{P_1}{P_2 + P_3} \right) = C_0 \times K_y.$$

5. Оцінка імовірності утворення осадів в системі оборотного водопостачання без стабілізаційної обробки води проводиться таким чином:

1) обчислюють припустиму граничну лужність оборотної води $L_{об.гр.}$, що може підтримуватися в системі:

$$L_{об.гр.} = \psi \sqrt{\frac{0,1(CO_2)_{дод.} (P - P_1)}{(Ca)_{дод.}}},$$

де $(CO_2)_{дод.}$ і $(Ca)_{дод.}$ – вуглекислота і кальцій додаткової води;

ψ – коефіцієнт, обумовлений залежністю від солевмісту оборотної води та температури охолодженої води по табл. 2.

Таблиця 2 – Значення ψ

Температура охолодженої води, °С	Солевміст оборотної води, мг/л						
	200	400	600	800	1000	1500	2000
15	8,04	8,68	9,18	9,56	9,94	10,7	11,3
20	7,54	8,12	8,6	8,98	9,32	10,0	10,6
25	7,12	7,65	8,07	8,42	8,76	9,41	9,97
30	6,66	7,18	7,58	7,92	8,22	8,83	9,36
35	6,21	6,69	7,08	7,39	7,63	8,24	8,76
40	5,80	6,24	6,61	6,89	7,16	7,7	8,16
45	5,38	5,79	6,13	6,39	6,64	7,14	7,56
50	4,81	5,42	5,72	5,98	6,22	6,67	7,06

або по формулі

$$\psi = \left[\frac{K_1 \times PP_{CaCO_3} \times 10^{6 + \frac{3\sqrt{\mu}}{1 + 1,5\sqrt{\mu}}}}{1,1 \times K_2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

де K_1 і K_2 – константи першої і другої ступені дисоціації вугільної кислоти.

2) обчислюють лужність оборотної води $L_{об.}$, що повинна установитися в системі за умови, що не буде відбуватися розпад бікарбонатів:

$$L_{об} = \frac{P}{P - P_1} L_{дод}.$$

Якщо $L_{об} \leq L_{об.гр.}$, то обробка води не потрібна, а мінімальна продувка визначається по формулі

$$P_3 = \frac{L_{дод.} P_1}{L_{об.гр.} - L_{дод.}} - P_2.$$

Для води річки Дніпро лужність визначається наявністю бікарбонатних іонів, тобто карбонатною твердістю води, тому

$$P_3 = \frac{T_{додкарб.} P_1}{T_{карб.гр.} - T_{додкарб.}} - P_2.$$

Значення $T_{карб.гр.}$ визначаємо зі співвідношення

$$2,8 T_{карб.гр.} = 8 + \frac{\theta^i}{3} - \frac{t_{вих} - 40}{5,5 - \frac{\theta^i}{7}} - \frac{2,8 T_{некарб.}}{6 - \frac{\theta^i}{7} + \left(\frac{t_{вих} - 40}{10} \right)^3},$$

де θ^i – показник окислюваності оборотної води, мг О₂/л:

Для дніпровської води м. Запоріжжя $T_{карб.гр.} = 3,24$ мг-екв/л, $T_{дод.карб.} = 2,6$ мг-екв/л. При $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ и для $t_{повітря} + 10^\circ\text{C}$ для о/ц водопостачання ТЕЦ-ПВС комбінату «Запоріжсталь» $P_1 = 1,2\%$, $P_2 = 1,0\%$.

Тоді

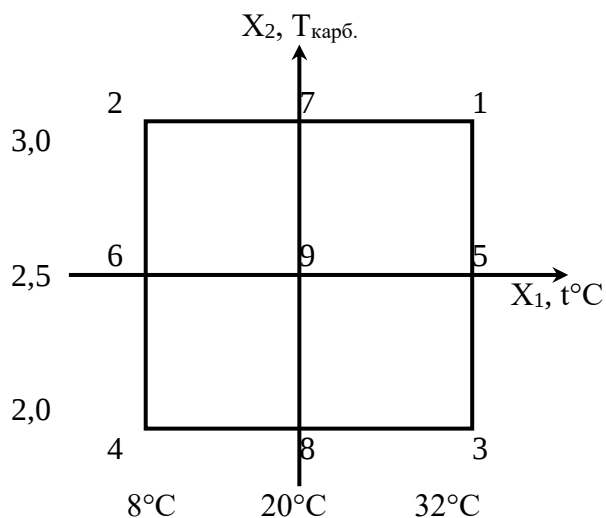
$$P_3 = \frac{T_{додкарб.} P_1}{T_{карб.гр.} - T_{додкарб.}} - P_2 = \frac{2,6 \times 1,2}{3,24 - 2,6} - 1,0 = 3,875\%.$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 1,2 + 1,0 + 3,875 = 6,075 \%.$$

Тоді при $Q = 50784$ м³/год, $P = 50784 \times 0,06075 = 3085$ м³/год

6. Температура охолодженої води на градирнях і бризкальних басейнах коливається від $+8^\circ\text{C}$ узимку до $+32^\circ\text{C}$ улітку. Твердість карбонатна складає узимку – 2,92 мг-екв/л, навесні – 3,0 мг-екв/л, влітку і восени – 2,55 мг-екв/л, отже підживлення, підпиток Р буде від цих факторів змінюватися значно.

Будуємо двофакторний план і порахуємо підживлення при варіюванні вищевказаних факторів у приведених межах для дев'яти вузлів:



№ крапки	$X_1, t^{\circ}\text{C}$	$X_2, T_{\text{карб.}}$
1	+1(32°C)	+1(3,0)
2	-1(8°C)	+1(3,0)
3	+1(32°C)	-1(2,0)
4	-1(8°C)	-1(2,0)
5	+1(32°C)	0(2,5)
6	-1(8°C)	0(2,5)
7	0(20°C)	+1(3,0)
8	0(20°C)	-1(2,0)
9	0(20°C)	0(2,5)

Рисунок 1.2 – Двохфакторний план

При цьому необхідно врахувати, що $T_{\text{карб.гр.}}$ по сезонах коливається: осінню, зимою і весною – 3,9 мг-екв/л і літом – 3,55 мг-екв/л.

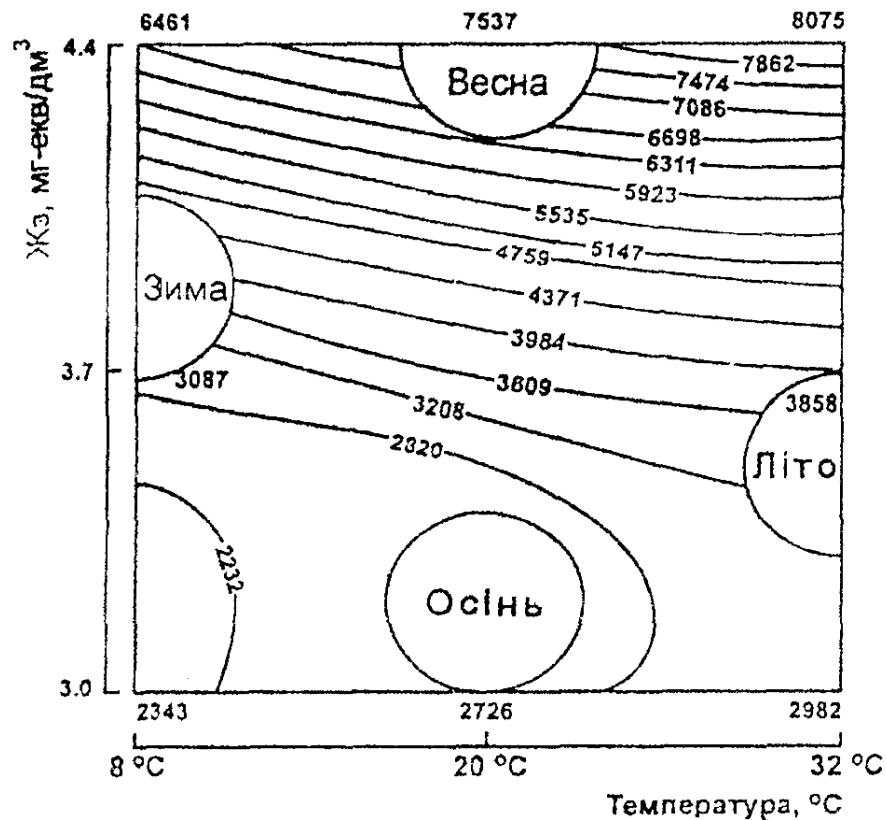
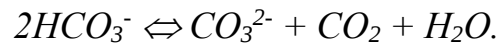


Рисунок 1.3 – Лінії ізозначень кількості підживлювальної води в залежності від температури навколишнього повітря та коливань її твердості

Рівняння динамічної рівноваги між різними формами вугільної кислоти у водяних розчинах вуглекислих з'єднань:



Спільне рішення рівнянь констант рівноваги першої і другої ступені дисоціації вугільної кислоти – K_1 і K_2

$$\left(K_1 = \frac{f_{\text{H}^+} f_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} \right); \quad \left(K_2 = \frac{f_{\text{H}^+} f_{\text{CO}_3^{2-}} [\text{CO}_3^{2-}]}{f_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-]} \right) \quad \text{і рівнянь на}$$

основі дії мас даної реакції і добутку розчинності CaCO_3 $\left(f_{\text{Ca}} [\text{Ca}^{2+}] f_{\text{CO}_3^{2-}} [\text{CO}_3^{2-}] = \text{PP}_{\text{CaCO}_3} \right)$ дає константу рівноваги $K_p = K_1/K_2$, відкіля ми визначаємо концентрацію рівноважної вуглекислоти $[\text{CO}_2]_{\text{рівн.}} = \frac{K_2}{K_1 \text{PP}_{\text{CaCO}_3}} f_{\text{HCO}_3^-}^2 f_{\text{Ca}} [\text{HCO}_3^-]^2 [\text{Ca}^{2+}]$. Ланжельє дав свій знаменитий індекс стабільності $J = \text{pH}_0 - \text{pH}_S$. Вони розраховані на основі логарифма $(\text{CO}_2)_{\text{рівн.}}$

$$\lg[\text{CO}_2]_{\text{рівн.}} = \text{p}K_1 - \text{p}K_2 + \text{pPP}_{\text{CaCO}_3} + 2\lg[\text{HCO}_3^-] + \lg[\text{Ca}^{2+}]$$

$$-3\sqrt{\mu} - 5.96.$$

Для визначення pH_s рівноважного насичення карбонатом кальцію він запропонував суму 4-х функцій:

$$pH_s = f_1(t) - f_2(Ca^{2+}) - f_3(Щ) + f_4(P) .$$

При $J > 0$ вода схильна до утворення карбонатних відкладень; при $J < 0$ – розчинення карбонатних відкладень (корозійна); при $J \approx 0$ – вода стабільна.

Треба сказати, що індекс стабільності Ланжелє внаслідок своєї логарифмічної природи служить лише якісним показником схильності води до того чи іншого процесу і не є кількісною характеристикою агресивних властивостей води.

Питання для самоконтролю

1. Які витрати води існують в оборотних системах?
2. Які параметри характеризують тепловий режим охолоджувачів води?
3. Які види солей присутні в оборотних системах?
4. В яких межах коливається температура та твердість води?
5. Що показує індекс стабільності води?

Використана література

1. Водопостачання та водовідведення промислових підприємств : навч. посіб. з дисциплін "Водопостачання пром. підприємств", "Системи водовідведення пром. підприємств" для студентів ЗДІА спец. 192 "Буд-во та цив. інженерія" /Д. В. Прутцьков, В. І. Сокольник, О. Г. Добровольська [та ін.] / ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 194 с. URL: <http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/2018/f359207.pdf>.
2. Епоян С. М. Зворотні та безстічні системи водокористування промислових підприємств : конспект лекцій. : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022.– 113 с. URL:<https://tinyurl.com/456arjw5>
3. Айрапетян Т. С. Конспект лекцій з дисципліни "Особливості промислового водопостачання". Харків : ХНАМГ, 2008. 87 с. URL: <http://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054212.pdf>.
4. Айрапетян Т. С. Зворотні і безстічні системи водопостачання промислових підприємств : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 150 с.