

УДК 628.179

*В.Р. Гаєвський ^а, В.Л. Филипчук ^а, О.А. Сироватський ^б***ДИНАМІКА РОЗЧИННИХ СОЛЕЙ В ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ
ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

^а Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
^б Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків,
Україна

На основі балансу мас розроблена модель динаміки розчинних солей у воді охолоджувальних систем оборотного водопостачання. Запропонована модель виражена у загальній формі для умови постійності об'єму оборотної води і нестационарності вхідних і вихідних потоків. Модель враховує ситуацію, коли концентрація розчинної солі більша, ніж концентрація цієї солі в оборотній воді, і, таким чином, враховує технологічну необхідність зміни джерела живлення системи при аварійній (надзвичайній) ситуації на спорудах підготовки живильної води. Розроблена модель дає можливість з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати водно-хімічний режим роботи діючих і нових оборотних систем охолодження і обирати оптимальні варіанти управління такими системами (методи стабілізаційної обробки оборотної води, підготовки живильної води, обсяги продувки тощо). Запропонована модель перевірена в лабораторних умовах для випадків концентрування і розбавлення добре розчинної солі NaCl і встановлено, що похибка не перевищує 2% і є експериментально-приладовою. Для різних значень скидних потоків (продувки) проаналізовано зміну коефіцієнта концентрування для випадку початкової рівності концентрації розчинної солі у живильній і оборотній водах і показано, що встановлення динамічної рівноваги між оборотною і живильною водами можуть досягати для продувок 1–4% десятки і навіть сотні оборотних циклів і таку інерційність системи необхідно враховувати в процесі експлуатації і прогнозування роботи охолоджувальних систем оборотного водопостачання.

Ключові слова: охолоджувальні системи оборотного водопостачання, динаміка розчинних солей, коефіцієнт концентрування, живильна вода, продувка, оборотний цикл.

DOI: 10.32434/0321-4095-2024-156-5-111-120

Вступ

Охолоджувальні системи оборотного водопостачання (ОСОВ) є одними із найважливіших систем у технологічних процесах підприємств багатьох галузей промисловості таких як хімічна промисловість, енергетика, металургія тощо [1]. Такі системи є не тільки невід'ємною частиною технологічного процесу але ще й відносяться до природоохоронних екологічних систем. Одним з основних процесів, що відбуваються в ОСОВ є

зміни концентрацій як розчинних так і малорозчинних солей, що часто призводить до зміни фізико-хімічних параметрів води і погіршення роботи ОСОВ. Зміна концентрації розчинних солей є репером для оцінювання водно-хімічного режиму і виділення в об'ємі ОСОВ твердої фази малорозчинних солей, тому часто розчинні солі ще називають трассерами. Причому, утворення твердої фази карбонату кальцію з гідрокарбонатних систем, якими є в основному води оборотних

© В.Р. Гаєвський, В.Л. Филипчук, О.А. Сироватський, 2024



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Dynamics of soluble salts in cooling systems of circulating water supply

систем, призводить не тільки до забруднення теплообмінного обладнання, а також і до виділення в об'ємі та потрапляння в атмосферу вуглекислого газу [2,3], який є парниковим газом, а значить екологічно активним і потребуючим контролю і утилізації. Таким чином, прогнозування зміни вмісту розчинних солей у водному об'ємі ОСОВ шляхом побудови і перевірки моделей на основі закономірностей водообмінних процесів, що відбуваються у водному об'ємі ОСОВ, є важливою науковою задачею.

Усі розроблені моделі динаміки компонентів у воді ОСОВ враховують вхідні і вихідні потоки по відношенню до оборотної води і базуються на основі закону збереження маси (балансу маси). Основні потоки вказані у відповідних нормативних документах і розраховуються на основі параметрів технологічних режимів конкретного промислового підприємства. Моделі концентрування солей у воді ОСОВ можна розділити на ті, що базуються на потоках, величина яких не змінюється з часом [1] і на такі, що враховують залежність потоків від часу [2]. Особливістю моделей, що базуються на постійних потоках і постійному об'ємі води ОСОВ, є те, що вони можуть виражатись простими алгебраїчними виразами без використання складних математичних процедур. Такі моделі легко перевірити експериментально у лабораторних умовах, хоч на практиці вони реалізуються не часто. Моделі ж, що враховують змінність технологічних параметрів [4,5] або навіть включення додаткових потоків (наприклад як при рециркуляції [6,7]) чи проходження у воді ОСОВ різних фізико-хімічних процесів (наприклад кристалізації [2,8]) не мають простого алгебраїчного вираження і потребують використання спеціальних числових математичних процедур. Такі моделі експериментально перевірити складно, але вони часто зустрічаються на практиці для реалізації оптимальних водно-хімічних режимів роботи ОСОВ [9–11]. Необхідно відмітити, що моделі концентрування розчинних солей використовують також для визначення утворення кількості твердої фази у водному об'ємі ОСОВ [1] малорозчинних солей, найбільш поширеними з яких є карбонат кальцію [12] та сульфат кальцію [13,14]. Традиційна модель концентрування солей в охолоджувальних оборотних системах [1] не оперує таким важливим показником роботи системи, як кількість циклів протягом яких встановлюється динамічна рівновага. Крім того, в існуючих на сьогодні моделях не передбачається варіант роботи охолоджувальної системи, коли концентрація солей

в живильній воді більша ніж в оборотній. На наш погляд, це зумовлює розробку такої моделі концентрування солей, яка б враховувала наведені вище аспекти.

Метою даної роботи є побудова моделі динаміки концентрування і розбавлення розчинних солей у воді ОСОВ і її перевірка в лабораторних умовах.

Для досягнення мети будуть розглянуті технологічні параметри роботи ОСОВ з градієнтами і встановимо основні параметри, що визначають концентрування і розбавлення розчинних солей у воді ОСОВ.

Методика експерименту

Ціль лабораторного експерименту – імітувати водообмін в ОСОВ без врахування випаровування і перевірити модель динаміки розчинної солі. Як буде показано далі, кінетичний коефіцієнт зміни концентрації в об'ємі ОСОВ (коефіцієнт біля часової змінної) не залежить від потоку випаровування і до того ж неперервні вхідні і вихідні потоки можна замінити багаторазовим дискретним водообміном, а тому такий експеримент слід вважати коректним. В основу експерименту покладено дослідження зміни концентрації малорозчинної солі у незмінному об'ємі при багаторазовому водообміні (рис. 1). Водообмін реалізувався шляхом видалення певного об'єму V_{out} з концентрацією c_{out} із базового об'єму V_0 і дозуванням такої ж кількості об'єму V_{in} з концентрацією c_{in} . Базовий розчин, об'ємом $V_0=1$ дм³ заливали в хімічну мірну колбу з міткою, що відповідала 1 дм³ класу точності А (ДСТУ ISO 1042). Всі розчини готували із солі NaCl марки х.ч. на дистильованій воді з питомою електропровідністю 3,5–4,0 мкСм/см. Після видалення із V_0 чергової порції V_{out} , заливали чергову порцію V_{in} і розчин у мірній колбі ретельно перемішували декілька хвилин шляхом струшування колби. Після перемішування водообмін повторювався аналогічно вказаній вище процедурі і за кожним разом вимірювалась електропровідність об'єму V_{out} . Питому електропровідність вимірювали аналізатором рідини кондуктометричним СКВ (ТУ У 33.2–14082639–003–2001, Харків) з точністю $\pm 1\%$. Дозовані об'єми були наступні: 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200 мл, що відповідало водообміну 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20%. Такий діапазон відповідає використовуваним значенням продувки (скиду) в ОСОВ.

Результати

Модель динаміки розчинних солей

Модель динаміки розчинних солей включає розгляд технологічних параметрів потоків води і розгляд динаміки розчинних солей в загальній

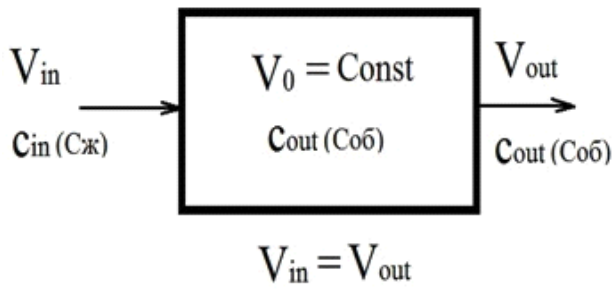


Рис. 1. Схема експерименту з визначення динаміки розчинної солі в об'ємі V_0 в процесі водообміну V_{out} на V_{in} . $c_{ж}$ – концентрація розчинної солі в живильній воді; $c_{об}$ – концентрація розчинної солі в оборотній воді.

формі і при умовах сталості потоків і базового об'єму.

Технологічні параметри потоків води в ОСОВ

Основні потоки ОСОВ приведені на рис. 2, згідно з яким розглянемо основні технологічні параметри роботи ОСОВ, пов'язані з водними потоками:

- 1) об'єм води в ОСОВ V_0 , м³;
- 2) витрата оборотної води в системі $Q_{об}$, м³/год;
- 3) втрати води на випаровування при охолодженні, $Q_{вип}$, м³/год;
- 4) втрати води на продування (скид води із системи) $Q_{пр}$, м³/год;
- 5) втрати води у вигляді крапельного виносу $Q_{кр}$, м³/год;

- 6) відбір води на технологічні потреби $Q_{тех}$, м³/год;
- 7) втрати води на очисних спорудах $Q_{оч}$, м³/год;
- 8) втрати води на фільтрацію $Q_{ф}$, м³/год;
- 9) додавання води в систему для компенсації втрат (живлення системи), вказаних у п.п. 3–8 $Q_{ж}$, м³/год.

Витрати, вказані у п.п. 3–8, беруться з відповідних таблиць або розраховуються за відповідними формулами, в залежності від певних умов і конструкції елементів ОСОВ. Витрата оборотної води Q (в кг/год) залежить від типу паросилової частини ТЕС і відношення Q (кг/год) до витрати пари (в кг/год) називається кратністю охолодження.

Модель кінетики розчинних солей у воді ОСОВ

Далі будемо вважати, що вхідні об'єми і концентрації це об'єми і концентрації потоків живлення, тобто ті, що відповідають п. 9 ($c_{in}=c_{ж}$), а вихідні об'єми і концентрації відповідають потокам всіх втрат окрім випаровування (п. 3), тобто ті, що відповідають п.п. 4, 5, 6, 7, 8 води і, причому вихідні концентрації рівні концентраціям в оборотній воді ($c_{out}=c_{об}$).

Для побудови моделі, використаємо принцип сумування процесів, які відповідальні за вхідні потоки (утворення) і вихідні потоки (знищення) компонента (речовини) із даного об'єму [15], що базується на основі балансу мас, тоді у загальному вигляді запишемо:

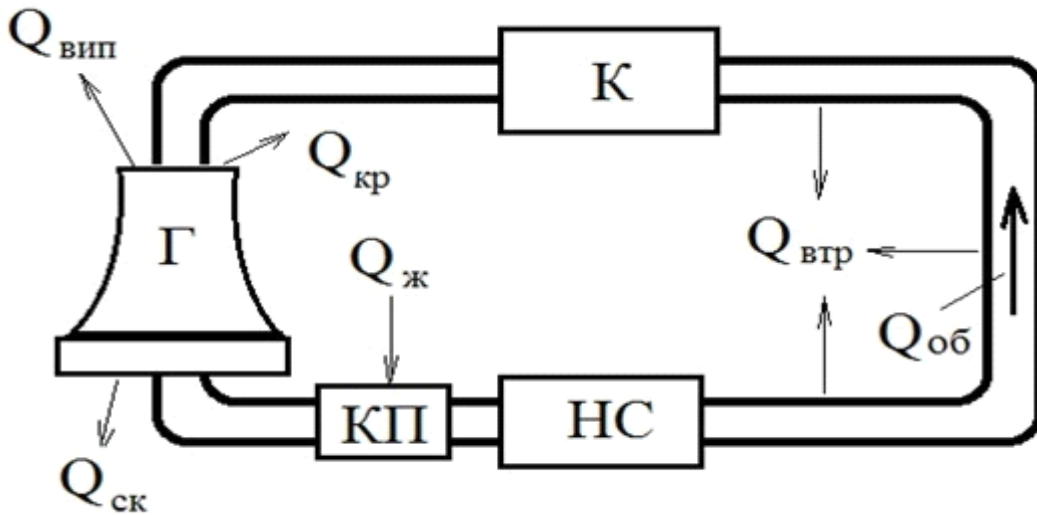


Рис. 2. Схема оборотної системи охолодження з градирнями: Г – градирня; КП – камера прийому живильної води; НС – насосна станція; К – конденсатор; $Q_{об}$, $Q_{вип}$, $Q_{кр}$, $Q_{ск}$, $Q_{ж}$, $Q_{втр}$ – потоки (об – оборотної води; вип – випаровування; кр – краплинного виносу; ск – скидні (продувка); ж – живлення; втр – інші втрати (на технологічні потреби, на очисних спорудах, на фільтрацію))

$$\frac{dM_{об}}{dt} = \sum_{i=1}^k a_i(t) \cdot f_i(t) - \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot g_i(t), \quad (1)$$

де $M_{об}$ – маса компонента в оборотній воді; $a_i(t)$ – кінетичний коефіцієнт i -го вхідного потоку; $f_i(t)$ – функції, що визначають значення концентрацій компонента у i -му вхідному потоці в даний момент часу; $b_i(t)$ – кінетичний коефіцієнт i -го вихідного потоку; $g_i(t)$ – функції, що визначають значення концентрацій компонента у i -му вихідному потоці в даний момент часу.

У найпростішому випадку $f_i(t)$ і $g_i(t)$ можуть бути концентраціями компонента, $a_i(t)$ і $b_i(t)$ визначають відповідно вхідні і вихідні потоки даного компонента. Тоді, вхідним потоком компонента є потік в об'ємі живильної води ($Q_{ж}$, п. 9) і відповідно $a_i=Q_{ж}$, а $f_i(t)$ – концентрація одного із компонентів розчинної солі (наприклад, Cl^-) у живильній воді тобто $f_i(t)=c_{ж}(t)$. З врахуванням вищесказаного, запишемо:

$$\sum_{i=1}^k a_i \cdot f_i(t) = Q_{ж} \cdot c_{ж}(t). \quad (2)$$

Для вихідних потоків, згідно з п.п. 3–9 запишемо:

$$\sum_{i=1}^n b_i \cdot g_i(t) = Q_{пр} \cdot c_{об} + Q_{кр} \cdot c_{об} + Q_{тех} \cdot c_{об}(t) + Q_{оч} \cdot c_{об}(t) + Q_{ф} \cdot c_{об}(t). \quad (3)$$

Виразимо масу речовини в оборотній воді (M) через масову концентрацію (c , кг/м³) записавши, що

$$M = c \cdot V_0. \quad (4)$$

Оскільки $Q_{тех}$, $Q_{оч}$ та $Q_{ф}$ залежать від конкретних умов експлуатації оборотної системи і на структуру моделі динаміки розчинних солей у воді ОСОВ не впливають, то в нашому випадку не будемо враховувати ці потоки. На основі (1) і враховуючи, що об'єм води в циркуляційній системі (V) рівний

$$V_0 = Q \cdot T, \quad (5)$$

де T – період циркуляції оборотної води в системі, а також ввівши відносні потоки

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{об}}, \quad (6)$$

запишемо наступне:

$$\frac{dc_{об}}{dt} = \frac{1}{T} \left[q_{ж}(t) \cdot c_{ж}(t) - (q_{кр}(t) + q_{пр}(t)) \cdot c_{об}(t) \right], \quad (7)$$

де q – потоки, виражені в долях одиниці від витрати охолоджувальної води (Q).

Видно, що (7) є лінійним неоднорідним рівнянням першого порядку зі змінними коефіцієнтами:

$$\frac{dc_{об}}{dt} + p(t) \cdot c_{об} = r(t), \quad (8)$$

де

$$p(t) = \frac{1}{T} (q_{кр}(t) + q_{пр}(t)), \quad (9)$$

$$r(t) = \frac{1}{T} (q_{ж}(t) \cdot c_{ж}(t)). \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (8) має вигляд (корні):

$$c_{об}(t) = \frac{1}{s(t)} \cdot \left(\int r(t) \cdot s(t) dt + C_0 \right), \quad (11)$$

де

$$s(t) = \exp \left(\int p(t) dt \right). \quad (12)$$

З врахуванням (12) запишемо залежність концентрації розчинної солі в оборотній воді від часу ($m_{об}(t)$):

$$c_{об}(t) = \frac{1}{\exp \left(\int p(t) dt \right)} \times \left(\int r(t) \cdot \exp \left(\int p(t) dt \right) dt + C \right). \quad (13)$$

У рівнянні (13) константу C вибираємо із початкових умов (задача Коші) для $t=0$ $c_{об}(t)=c_{об}(0)$.

Розглянемо розв'язок (13) для умов концентрування і розбавлення компонентів розчинних солей (наприклад, хлорид-іонів, Cl^-).

Для процесу концентрування початкові умови запишемо, ввівши коефіцієнт концентрування (k) у вигляді [1,2,6]:

$$k(t) = \frac{c_{об}(t)}{c_{ж}(t)}. \quad (14)$$

Тоді з врахуванням (14) початкові умови запишемо у вигляді:

$$c_{об}(0) = k(0) \cdot c_{ж}(0). \quad (15)$$

На нашу думку, умова (15) є найбільш загальною і враховує довільні (фізично значимі) початкові значення коефіцієнта концентрування ($k(0) < 1$, $k(0) > 1$, $k(0) = 1$). З врахуванням (15), а також враховуючи, що для випадку:

$$q_{вип} = \text{const}1, q_{кр} = \text{const}2, q_{пр} = \text{const}3 \quad (16)$$

маємо:

$$\exp\left(\int p(t)dt\right) = \exp\left(\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right) \text{ та}$$

$$\int r(t) \cdot \exp\left(\int p(t)dt\right) dt = \frac{q_{вип} + q_{кр} + q_{пр}}{q_{кр} + q_{пр}} \cdot \exp\left(\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right).$$

Тоді із (13) і (16) отримаємо, що

$$C = (k(0) - k_{\infty}) \cdot c_{ж}(0), \quad (17)$$

де згідно з [1,2,6]:

$$\frac{q_{вип} + q_{кр} + q_{пр}}{q_{кр} + q_{пр}} = k_{\infty}, \quad (18)$$

і називається граничним коефіцієнтом концентрування [1].

Із рівняння (13), враховуючи (16) і (17), запишемо вирази для концентрування розчинних солей у воді ОСОВ, що має вигляд:

$$c_{об}(t) = k_{\infty} \cdot c_{ж} + (k(0) - k_{\infty}) \cdot c_{ж} \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (19)$$

На основі рівнянь (14) і (19) запишемо вираз для динаміки коефіцієнта концентрування у загальному випадку (для $k(0) < 1$, $k(0) > 1$, $k(0) = 1$) концентрування солей у воді ОСОВ:

$$k(t) = k_{\infty} + (k(0) - k_{\infty}) \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (20)$$

Обговорення результатів

У обговоренні результатів розглядаються режими концентрування, розведення і режим

концентрування в реальних ОСОВ при сталих потоках і базовому об'ємі.

Динаміка концентрування

Розглянемо процес концентрування розчинної солі шляхом водообміну у об'ємі, що не змінюється з часом без врахування випаровування. Для такого випадку концентрація дозованого об'єму V_{in} буде більша, ніж концентрація в базовому об'ємі V_0 , тобто, ніж концентрація в об'ємі, що видаляється V_{out} (рис. 1), і тоді $c_{ж} > c_{об}$. В діючих охолоджувальних системах таке може відбуватись, наприклад, коли виникає необхідність зміни джерела живлення системи або при аварійних (надзвичайних) ситуаціях на спорудах підготовки живильної води. Згідно з цим концентрація до водообміну (початкова) у базовому об'ємі V_0 буде мінімальною, тобто у даному випадку $c_{об}(0) = c_{min}$, а кінцева концентрація буде рівною концентрації в об'ємі живлення ($c_{ж}$) і тоді:

$$k(0) = k_{min} = \frac{c_{min}}{c_{ж}}, \quad k_{\infty} = \frac{c_{ж}}{c_{ж}} = 1. \quad (21)$$

Враховуючи (21) на основі загальних виразів (19) і (20), запишемо рівняння для концентрації розчинної солі у оборотній воді (22) і рівняння для коефіцієнта концентрування (23):

$$c_{об}(t) = c_{ж} + (k_{min} - 1) \cdot c_{ж} \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right), \quad (22)$$

$$k(t) = 1 + (k_{min} - 1) \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (23)$$

Далі врахуємо, що

$$\frac{t}{T} = n, \quad (24)$$

де n – кількість циклів оборотної води.

Тоді можна записати:

$$c_{об}(t) = c_{ж} + (k_{min} - 1) \cdot c_{ж} \times \exp\left[-(q_{кр} + q_{пр}) \cdot n\right], \quad (25)$$

$$k(t) = 1 + (k_{min} - 1) \times \exp\left[-(q_{кр} + q_{пр}) \cdot n\right]. \quad (26)$$

З рівнянь (25) і (26) видно фізичний зміст

множника $(q_{кр} + q_{пр})$ – це частка об'єму води (по відношенню до базового об'єму V_0) якою обмінюється базовий об'єм V_0 з живильною водою за один цикл. Далі отримуємо формули для перевірки експериментальних даних з моделлю концентрування розчинних солей у воді ОСОВ. Враховуючи, що електропровідність пропорційна концентрації, тобто $\sigma = A \cdot c$ (де A – коефіцієнт пропорційності), запишемо:

$$\sigma_{об}(t) = \sigma_{ж} + (k_{мин} - 1) \cdot \sigma_{ж} \times \exp\left[-(q_{кр} + q_{пр}) \cdot n\right], \quad (27)$$

$$k(t) = 1 + (k_{мин} - 1) \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (28)$$

Результати експериментів і теоретичної моделі (21) показані на рис. 3 і 4. Видно, що похибка перевірки моделі кінетики розчинних солей у випадку їх концентрування близька до приладової похибки лабораторних експериментів і така перевірка вважається задовільною.

Динаміка розведення

Розглянемо процес розведення розчинної солі у незмінному об'ємі шляхом водообміну без врахування випаровування. В такому випадку концентрація дозованого об'єму V_{in} буде менша, ніж концентрація об'єму, що видаляється V_{out} (рис. 1), тобто $c_{ж} < c_{об}$. Згідно з цим концентрація до водообміну у базовому об'ємі V_0 буде максимальною $c_{об}(0) = c_{max}$, а кінцева концентрація буде рівною концентрації в об'ємі живлення ($c_{ж}$) і тоді:

$$k(0) = k_{max} = \frac{c_{max}}{c_{ж}}, \quad k_{\infty} = \frac{c_{ж}}{c_{ж}} = 1. \quad (29)$$

Тоді, враховуючи (21), на основі загальних виразів (19) і (20), запишемо рівняння для концентрації розчинної солі у оборотній воді (30) і рівняння для коефіцієнта концентрування (31):

$$c_{об}(t) = c_{ж} + (k_{max} - 1) \cdot c_{ж} \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right), \quad (30)$$

$$k(t) = 1 + (k_{max} - 1) \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (31)$$

Далі отримуємо формули для перевірки експериментальних даних з моделлю концентрування розчинних солей у воді ОСОВ. Враховуючи, що електропровідність пропорційна концентрації, тобто $\sigma = A \cdot c$ (де A – коефіцієнт пропорційності), запишемо:

$$\sigma_{об}(t) = \sigma_{ж} + (k_{max} - 1) \cdot \sigma_{ж} \times \exp\left[-(q_{кр} + q_{пр}) \cdot n\right], \quad (32)$$

$$k(t) = 1 + (k_{max} - 1) \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (33)$$

Вважаючи, що за один цикл відбувається один водообмін часткою води $(q_{кр} + q_{пр})$ і використовуючи вирази (32) і (33), модель була перевірена в лабораторних умовах, згідно з наведеною вище методикою досліджень. Результати експериментів і теоретичної моделі ((22) і (23), (25) і (26)) показані на рис. 4. Із рис. 5 та рис. 6 видно, що похибка перевірки моделі динаміки розчинних солей у випадку їх розбавлення близька до приладової похибки лабораторних експериментів і така перевірка вважається задовільною.

Динаміка концентрування у реальних ОСОВ

Відмітимо, що у роботі [2] надано вираз для коефіцієнта концентрування у формі:

$$k(t) = k_{\infty} - \frac{q_{вип}}{q_{кр} + q_{пр}} \times \exp\left(-\frac{q_{кр} + q_{пр}}{T} \cdot t\right). \quad (34)$$

Видно, що вираз (32) є частковим виразом і слідує із (20) для умови $k(0) = 1$, тобто для початкових умов $c_{об}(0) = c_{ж}(0)$. Звідси випливає, що кінетика $k(t)$, що описується виразом (20) є більш загальною і рекомендується авторами для використання аналізу водно-хімічного режиму води ОСОВ при довільних фізичних початкових умовах, тобто при довільних початкових значеннях $k(0)$. Хоча вираз (20) є загальною формою кінетики коефіцієнта концентрування все ж проаналізуємо випадок, розглянутий у [1] з врахуванням (24). Результати наведені на рис. 7. Видно, що для величин продувки 1–4% для характерних періодів циркуляції оборотної води 30–100 хвилин тривалість встановлення динамічної рівноваги водної системи в ОСОВ, може сягати десятків і навіть сотень годин (десятки і сотні циклів).

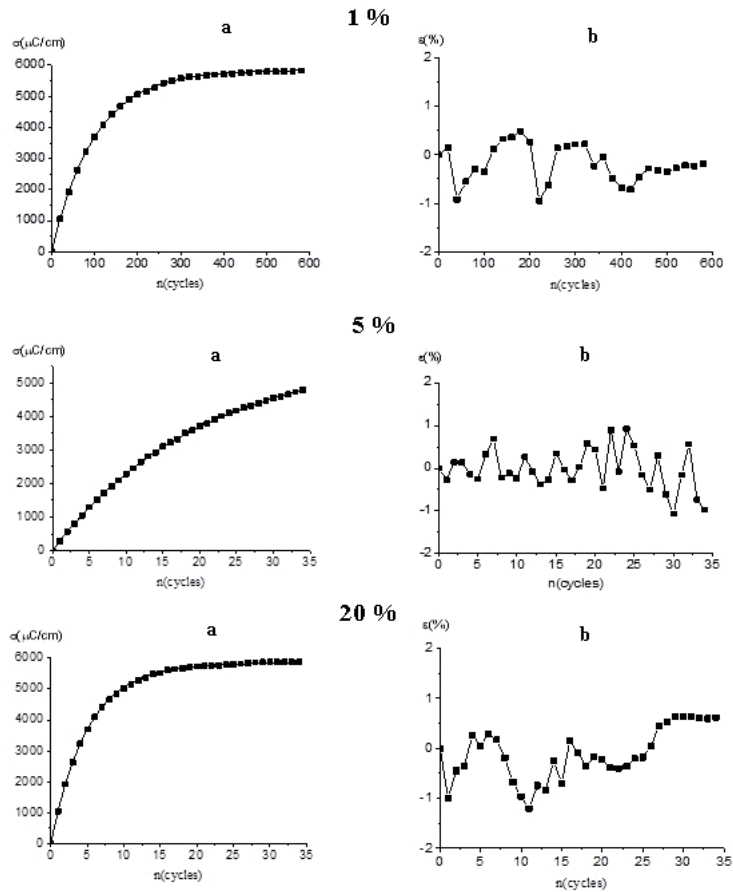


Рис. 3. Залежність концентрування солі NaCl від кількості циклів водообміну. Лінія – теорія, квадрати – експеримент (а). Відповідні значення відносних похибок (б). Значення величин водообміну у відсотках вказані над рисунками

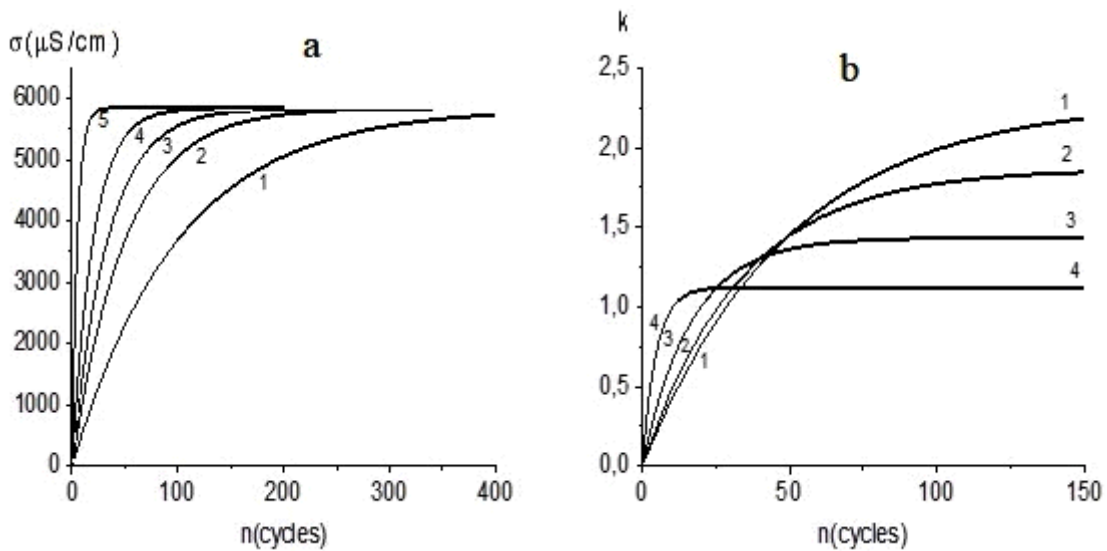


Рис. 4. Залежність концентрування (а) та коефіцієнта концентрування (б) солі NaCl від кількості циклів водообміну для різних значень водообміну: 1 – 1%; 2 – 2%; 3 – 3%; 4 – 5%; 5 – 20%

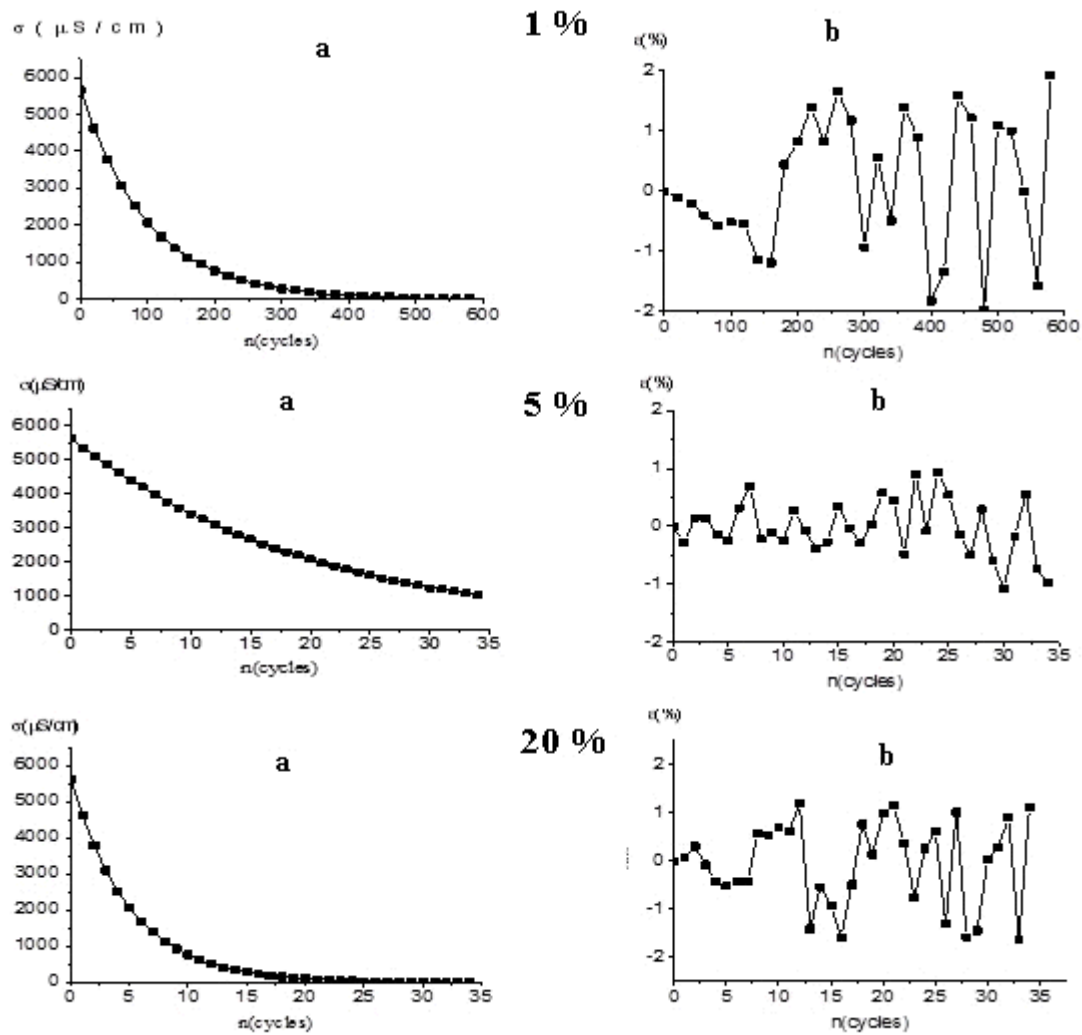


Рис. 5. Залежність розбавлення солі NaCl від кількості циклів водообміну. Лінія – теорія, квадрати – експеримент (а). Відповідні значення відносних похибок (б). Значення величин водообміну у відсотках вказані над рисунками

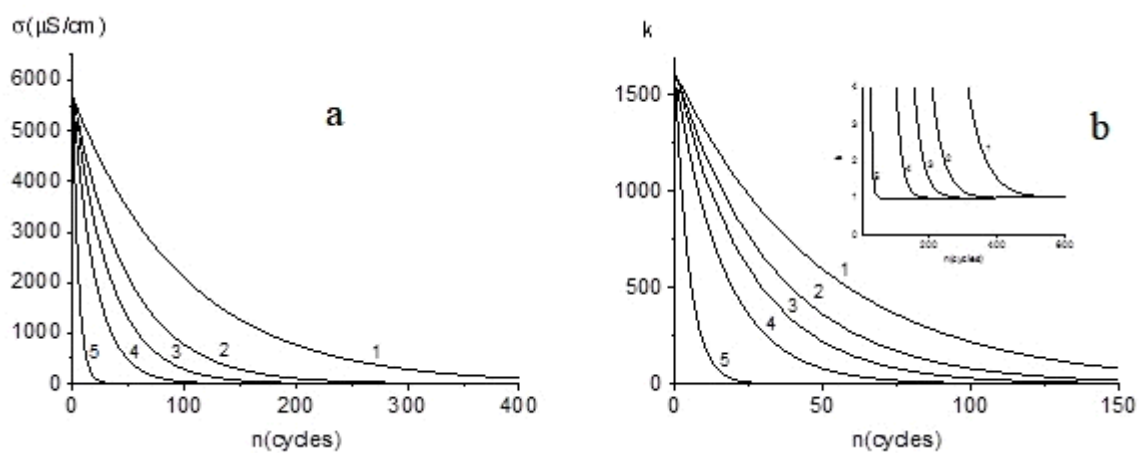


Рис. 6. Залежність розбавлення (а) та коефіцієнта концентрування (б, вкладка для k близьких до одиниці) солі NaCl від кількості циклів водообміну для різних значень водообміну: 1 – 1%; 2 – 2%; 3 – 3%; 4 – 5%; 5 – 20%

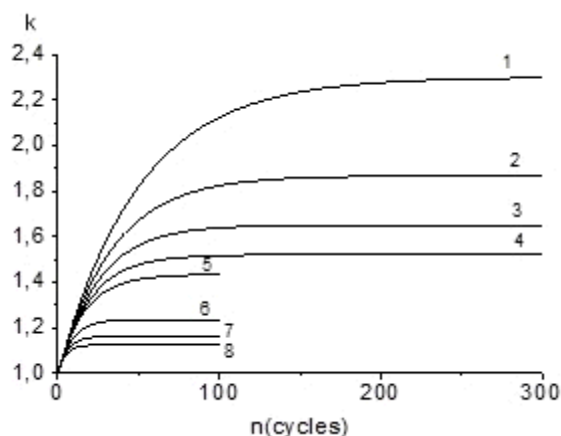


Рис. 7. Залежність коефіцієнта концентрування від кількості циклів водообміну для початкових умов $k(0) = 1$ і різних значеннях продукції: 1 – 1%, 2 – 2%, 3 – 3%, 4 – 4%, 5 – 5%, 6 – 10%, 7 – 15%, 8 – 20%

Висновки

На основі балансу мас розроблена модель кінетики розчинних солей у воді ОСОВ, що виражається у рівняннях (13), (15), (19) та (20). Модель перевірена в лабораторних умовах для випадків концентрування і розбавлення і встановлено, що похибка не перевищує 2% і є експериментально-приладовою.

Запропонована модель, на відміну від існуючих, розширює діапазон сфери її використання в умовах різних співвідношень концентрацій добре розчинних солей живильної і оборотної вод і змінних концентрацій солей в живильній воді, в тому числі у випадку, коли $c_{ж} > c_{об}$.

Розроблена модель дає можливість з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати водно-хімічний режим роботи діючих і нових систем водного охолодження і обирати оптимальні варіанти управління такими системами (методи стабілізаційної обробки оборотної води, підготовки живильної води, обсяги продування тощо).

На основі аналізу запропонованої моделі встановлено фізичний зміст множника $(q_{кр} + q_{пр})$ у показнику експоненти виразів (22), (23) та (25), (26) – це частка об'єму води (за відношенням до базового об'єму V_0), якою обмінюється базовий об'єм V_0 з живильною водою за один цикл.

Проаналізовано зміну коефіцієнта концентрування для випадку $k(0)=1$ і показано, що характерні часи встановлення динамічної рівноваги можуть досягати для малих продувань (1–4%) десятки і навіть сотні оборотних циклів і таку інерційність системи необхідно враховувати в про-

цесі експлуатації і прогнозування роботи ОСОВ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучеренко Д.И., Гладков В.А. Обратное водоснабжение (Системы водяного охлаждения). – М.: Стройиздат, 1980. – 169 с.
2. Гаєвський В.Р., Кочмарський В.З. Підвищення ефективності оборотних систем охолодження мінімізацією кальцій-карбонатних відкладень. Монографія. – Рівне: НУВГП, 2018. – 154 с.
3. Gajevskiy V.R. Electrical conductivity of aqueous solutions of carbon dioxide // Ukr. J. Phys. – 2015. – Vol.60. – No. 3. – P.259-263.
4. Development of methods for the decrease in instability of recycling water of conjugated closed-circuit cooling system of HPP / Chichirov A.A., Chichirova N.D., Vlasov S.M., et al. // Therm. Eng. – 2016. – Vol.63. – P.747-753.
5. Gallegos A.A., Martinez S.S., Ramirez Reyes J.L. Evaluation of water corrosivity using a corrosion rate model for a cooling water system // J. New Mat. Electrochem. Systems. – 2005. – Vol.8. – P.133-142.
6. Kyshnevskiy V.A., Chychenyn V.V., Shulayk I.D. Water chemistry calculation method of the circulating cooling system with recirculation // East. Eur. J. Enterprise Technol. – 2013. – Vol.6/8. – No. 66. – P.10-14.
7. Kochmarskii V., Kostiuk O., Filipovych Y. Concentration of soluble salts in cooling water of power plants with blow down recirculation // Water Water Purif. Technol. Sci. Technic. News. – 2021. – Vol.31. – No. 3. – P.35-43.
8. Kochmarskii V.Z., Melnyk V.O. Solid CaCO_3 formation in waters of circulating cooling systems of power plants under the conditions of electric load change. Water Water Purif. Technol. Sci. Technic. News. – 2018. – Vol.23. – No. 2. – P.27-35.
9. Ferguson R.J. Computerized ion association model profiles complete range of cooling system parameters // Proc. 52nd Int. Water Conf. – 1991.
10. Ferguson R. Thermodynamics and kinetics of cooling water treatment // Abstr. Association of Water Technologies. – 2011.
11. Economic impact of condenser fouling in existing thermoelectric power plants. / Walker ME., Safari I., Theregowda R.B., et al. // Energy. – 2012. – Vol.44. – No. 1. – P.429-437.
12. Kochmarskii V.Z., Gayevskii V.R., Tyshko N.L. Crystallization of calcium carbonate from hydrocarbonate solutions // Ukr. J. Phys. – 2017. – Vol.62. – No. 5. – P.382-390.
13. Gayevskii V.R., Kochmarskii V.Z., Gayevska S.G. Nucleation and crystal growth of calcium sulfate dihydrate from aqueous solutions: speciation of solution components, kinetics of growth, and interfacial tension // J. Cryst. Growth. – 2020. – Vol.548. – Art. No. 125844.

14. Gayevskii V.R., Kochmarskii V.Z., Gayevska S.G. Surface energy and structure of nuclei during crystallization of calcium sulfate dihydrate from aqueous solutions // *Ukr. J. Phys.* – 2021. – Vol.66. – No. 8. – P.708-713.

15. Eyring H., Lin S.M., Lin S.H. *Basic chemical kinetics*. – New York: John Wiley & Sons, 1980. – 493 p.

Надійшла до редакції 17.04.2024

DYNAMICS OF SOLUBLE SALTS IN COOLING SYSTEMS OF CIRCULATING WATER SUPPLY

V.R. Gayevskii ^{a,*}, V.L. Fylypchuk ^a, O.A. Syrovatskyi ^b

^a National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

^b O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

* e-mail: v.r.haievskiy@nuwm.edu.ua

A model of the dynamics of soluble salts in the water of cooling systems of circulating water supply was developed based on mass balance principles. The proposed model is expressed in a general form under the assumption of a constant volume of circulating water and non-stationary input and output flows. The model accounts for scenarios where the concentration of soluble salts exceeds their concentration in the circulating water, thereby considering the technological necessity to change the system's power source in the event of an emergency at the feedwater treatment facilities. The developed model enables accurate prediction of the water-chemical regime in both existing and new recirculating cooling systems, sufficient for engineering calculations. It also facilitates the selection of optimal management strategies for such systems, including stabilization methods for recirculating water, feedwater preparation, blowdown volumes, etc. The model was validated under laboratory conditions for cases of concentration and dilution of highly soluble NaCl salt, with an observed error margin not exceeding $\pm 2\%$, attributed to experimental and instrumental factors. The variation in the concentration factor was analyzed for different blowdown rates, assuming initial equality of soluble salt concentrations in feedwater and circulation water. It was shown that establishing dynamic equilibrium between the circulation and feed waters can require dozens or even hundreds of circulation cycles for blowdown rates of 1–4%, and this system inertia must be considered during operation and when forecasting the performance of cooling systems with circulating water supply.

Keywords: cooling systems of circulating water supply; dynamics of soluble salts; concentration factor; feedwater; blowdown; circulating cycle.

REFERENCES

1. Kucherenko DY, Hladkov VA. *Oborotnoe vodospabzhenye (Sistemy vodianoho okhlazhdeniya)* [Circulating water supply (water cooling systems)]. Moscow: Stroyizdat; 1980. 169 p. (in Russian).

2. Haievskiy VR, Kochmarskiy VZ. *Pidvyshchenniya efektyvnosti oborotnykh system okholodzhenniya minimizatsieyu kaltsii-karbonatnykh vidkladen'* [Increasing the efficiency of reversible cooling systems by minimizing calcium carbonate deposits]. Rivne: NUVHP; 2018. 154 p. (in Ukrainian).

3. Gajevskiy VR. Electrical conductivity of aqueous solutions of carbon dioxide. *Ukr J Phys.* 2015; 60(3): 259-263. doi: 10.15407/ujpe60.03.0258.

4. Chichirov AA, Chichirova ND, Vlasov SM, Lyapin AI, Misbakhov RS, Silov IY, et al. Development of methods for the decrease in instability of recycling water of conjugated closed-circuit cooling system of HPP. *Therm Eng.* 2016; 63: 747-753. doi: 10.1134/S0040601516100025.

5. Gallegos AA, Martinez SS, Ramirez Reyes JL. Evaluation of water corrosivity using a corrosion rate model for a cooling water system. *J New Mat Electrochem Systems.* 2005; 8: 133-142.

6. Kyshnevskiy VA, Chychenyn VV, Shulayk ID. Water chemistry calculation method of the circulating cooling system with recirculation. *East Eur J Enterprise Technol.* 2013; 6/8(66): 10-14. doi: 10.15587/1729-4061.2013.19428.

7. Kochmarskii V, Kostyuk O, Filipovych Y. Concentration of soluble salts in cooling water of power plants with blow down recirculation. *Water Water Purif Technol Sci Technic News.* 2021; 31(3): 35-43. doi: 10.20535/2218-930032021246548.

8. Kochmarskii VZ, Melnyk VO. Solid CaCO₃ formation in waters of circulating cooling systems of power plants under the conditions of electric load change. *Water Water Purif Technol Sci Technic News.* 2018; 23(2): 27-35. doi: 10.20535/2218-93002322018144957.

9. Ferguson RJ. Computerized ion association model profiles complete range of cooling system parameters. In: *Proc 52nd Int Water Conf.* 1991.

10. Ferguson RJ. Thermodynamics and kinetics of cooling water treatment. In: *Abstracts of the Association of Water Technologies Annual Meeting.* 2011.

11. Walker ME, Safari I, Theregowda RB, Hsieh MK, Abbasian J, Arastoopour H, et al. Economic impact of condenser fouling in existing thermoelectric power plants. *Energy.* 2012; 44: 429-437. doi: 10.1016/j.energy.2012.06.010.

12. Kochmarskii VZ, Gayevskii VR, Tyshko NL. Crystallization of calcium carbonate from hydrocarbonate solutions. *Ukr J Phys.* 2017; 62(5): 382-390. doi: 10.15407/ujpe62.05.0382.

13. Gayevskii VR, Kochmarskii VZ, Gayevska SG. Nucleation and crystal growth of calcium sulfate dihydrate from aqueous solutions: speciation of solution components, kinetics of growth, and interfacial tension. *J Cryst Growth.* 2020; 548: 125844. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2020.125844.

14. Gayevskii VR, Kochmarskii VZ, Gayevska SG. Surface energy and structure of nuclei during crystallization of calcium sulfate dihydrate from aqueous solutions. *Ukr J Phys.* 2021; 66(8): 708-713. doi: 10.15407/ujpe66.8.708.

15. Eyring H, Lin SM, Lin SH. *Basic chemical kinetics*. New York: John Wiley & Sons; 1980. 493 p.