

УДК 543.322:544.475:621.175.1  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/24>

**Кочмарський В.З.**

Національний університет водного господарства і природокористування

**Костюк О.В.**

Національний університет водного господарства і природокористування

**Тимейчук О.Ю.**

Національний університет водного господарства і природокористування

**Куба В.В.**

Національний університет водного господарства і природокористування

## АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ШВИДКОСТІ ВИДІЛЕННЯ $\text{CaCO}_3$ В КВАЗИСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ

*Розглядаються низькотемпературні відкладення, зокрема, твердого  $\text{CaCO}_3$ , що є основним компонентом забруднень теплообмінників на електростанціях та підприємствах, особливо тих, що використовують оборотні системи охолодження (ОСО). Для аналізу умов виділення  $\text{CaCO}_3$  з оборотних вод сформульовано кінетичні рівняння для розчинних солей та активної концентрації іонів кальцію  $\text{Ca}^{2+}$ . Показано, що характерний час перехідних процесів концентрування як для розчинних солей, так і для іонів  $\text{Ca}^{2+}$  рівний добутку динамічного параметра  $\varphi = G_{\text{жс}} / (G_{\text{жс}} - G_{\text{вт}})$  на період заміщення води в ОСО водою підживлення ( $T_{\text{жс}}$ ),  $T = \varphi \cdot T_{\text{жс}}$ .*

*Отримані співвідношення між водними потоками в ОСО та динамічним параметром  $\varphi$ , що справедливі за умови сталості водного об'єму ОСО. Ці співвідношення дозволяють контролювати величини потоків продувки та випарювання, визначити потрібну величину підживлення ОСО та оцінювати ефективність роботи градирень.*

*Сформульовано поняття квазістаціонарного режиму роботи ОСО. В цьому наближенні отримано вираз для швидкості виділення  $\text{CaCO}_3$  як функцію якості води та режиму роботи ОСО. Розроблено алгоритм розрахунку граничної концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , яка встановлюється в оборотній воді у квазістаціонарному режимі.*

*Отримані вирази застосовані для аналізу стабільності оборотної води конкретної ОСО у якій використовують пом'якшення води підживлення освітленням. На підставі розрахованого рівня стабільності оборотної води робиться висновок про необхідність додаткових заходів щодо зменшення швидкості виділення  $\text{CaCO}_3$ , наприклад, підкисленням та додаванням інгібіторів відкладень.*

*Методика розрахунку граничної концентрації іонів кальцію може також використовуватися для створення керуючого алгоритму в схемі автоматизації управління роботою ОСО для досягнення її максимальної ефективності.*

**Ключові слова:** оборотна вода, підживлення, кінетичні рівняння, швидкість виділення, карбонат кальцію, квазістаціонарний режим, динамічний параметр.

**Вступ.** Оборотні системи охолодження електростанцій та промислових підприємств поряд з виконанням своєї прямої функції – охолодження конденсаторів турбін чи інших технологічних теплообмінників є досконалим інструментом економії найціннішого природного ресурсу – води.

На сьогодні використовують три основні типи оборотних систем охолодження, в подальшому ОСО: зі ставками охолодження, градирнями та бризкальними басейнами [1]. Реальні ОСО часто включають комбінації основних типів. Будучи

ефективними засобом економії водних ресурсів, ОСО поряд з цим мають специфічні недоліки [2] які є наслідками нагріву охолодної води (ОВ) та концентрування солей завдяки її випаровуванню і полягають у виділенні відкладень на поверхнях теплопередачі.

Проаналізувавши склад забруднень низькотемпературних теплообмінників більше ніж двадцяти електростанцій, автори [2] дійшли висновку, що основним компонентом відкладень є карбонат кальцію. Тому, стратегія протидії відкладенням

повинна ґрунтуватися на аналізі динаміки концентрації іонів кальцію в ОВ, з врахуванням режимів роботи ОСО та фізико-хімічних процесів, що протікають в оборотній воді.

Модель процесу виділення карбонату кальцію в ОСО, разом з даними якості води, повинна бути основою для автоматизації контролю за станом кальцій-карбонатної підсистеми ОВ, тобто за її здатністю до виділення  $\text{CaCO}_3$  [3] та забезпечення і підтримання потрібного рівня стабільності ОВ.

**Формулювання моделі.** Інтенсивність виділення  $\text{CaCO}_3$  в оборотній воді можна оцінити шляхом одномоментного зіставлення концентрацій добре розчинних солей (трасерів) з концентрацією малорозчинних (накипінів), наприклад, іонів  $\text{Ca}^{2+}$  [3], оскільки менше, порівняно з трасерами, концентрування накипінів пов'язано саме з їх виділенням у вигляді твердої фази з ОВ. Таке зіставлення є основою фізико-хімічної та математичної моделі динаміки цих іонів в ОСО, яка розглядається в роботі.

Для розуміння структури та аналізу роботи ОСО розглянемо її спрощену схему див. рис. 1.

Вона складається з теплообмінних апаратів 1, охолоджувача води (тут градирні) 2, циркуляційного насоса 3, насоса градирні НГ та системи водоводів 4. Нагріта в технологічних теплообмінниках 1 вода охолоджується у градирні 2 переважно завдяки випаровуванню і повертається в теплообмінники. Орієнтовні величини потоків ОСО такі: потік випаровування  $G_{\text{вп}}$  становить (1.0 ÷ 1.5)% від потоку оборотної води  $G_0$ , краплинного виносу  $G_{\text{крп}} = (0.05 \div 0.5)\%$ , а потік фільтрації  $G_{\text{ф}}$  переважно менший від 0.05%. Час обороту ОВ в ОСО становить (0.5–1.5) год. Тому вода підживлення швидко переміщується з основним потоком і за декілька оборотів ОВ в ній встановлюється майже однорідний розподіл компонентів. Температура нагріву ОВ в тепло-

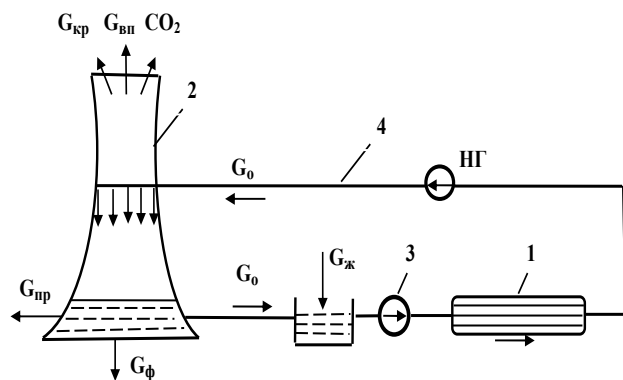


Рис. 1. Спрощена схема оборотної системи охолодження з градирнею

обмінниках (7–10)°С. Утворення відкладень на поверхнях теплообміну починається з карбонату кальцію оскільки у приповерхневому шарі трубок теплообмінників температура ОВ вища ніж у ядрі потоку і внаслідок зниження розчинності  $\text{CaCO}_3$  при рості температури він формує первинний шар на трубній системі. Шар  $\text{CaCO}_3$  служить основою для органічних відкладень різної природи. Загалом відкладення мають шарувату структуру і теплопровідність на один-два порядки меншу ніж матеріал трубок.

Випаровування влітку забезпечує 80–90% розсіювання тепла, яке подається в градирні, завдяки тому, що 1кг пари виносить  $\approx (2.4 \dots 2.5)$  МДж теплоти, проте, як вже згадувалось, це ж випаровування є причиною концентрування солей в оборотній воді та зв'язаного з ним виділенням  $\text{CaCO}_3$  [1–4]. Взимку винос теплоти випаровування зменшується і споживання свіжої води та концентрування солей теж знижується. Тобто якість ОВ та її здатність до виділення відкладень має сезонний характер як і режим роботи ОСО.

Вода підживлення має нижчий солеміст, ніж оборотна, тому для його зниження оборотну воду скидають в оточення, поповнюючи систему водою підживлення (продувка ОСО) з витратою  $G_{\text{ж}}$ . За скиди продувних вод підприємствам доводиться платити, особливо при перевищенні ГДС, тому пошук способів мінімізації об'ємів продувки є актуальним завданням.

Звернемо увагу на це, що продувка в ОСО ділиться на контрольовану та неконтрольовану у вигляді краплинного виносу та фільтрації. В подальшому говорячи про витрату продувки матимемо на увазі повну продувку.

Враховуючи практично однорідний розподіл солей по тракту ОВ, динамічний баланс розчинних солей представимо рівнянням [3],

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\varphi \cdot T_{\text{ж}}} \cdot (\varphi \cdot C_0 - C), \quad T_{\text{ж}} = \frac{V}{G_{\text{ж}}}, \quad \varphi = \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{ж}} - G_{\text{вп}}}, \quad (1)$$

якщо  $V = \text{Const}$ , то

$$G_{\text{ж}} = G_{\text{вп}} + G_{\text{пр}}, \quad (2)$$

і відповідно до (1) та (2) можемо отримати корисні співвідношення між потоками ОСО,

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{пр}}}, \quad T_{\text{пр}} = \frac{V}{G_{\text{пр}}} = \varphi \cdot T_{\text{ж}}; \\ G_{\text{вп}} &= \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \cdot G_{\text{ж}}; \\ G_{\text{пр}} &= \frac{G_{\text{ж}}}{\varphi} = \frac{G_{\text{вп}}}{\varphi - 1}. \end{aligned} \quad (3)$$

У виразі (3)  $T_{ж}$  – час заміщення водного об'єму ОСО водою підживлення;  $T_{пр}$  – час опорожнення водного об'єму ОСО продувкою;  $\varphi$  – **динамічний параметр** ОСО, його фізичний зміст стає зрозумілим, якщо концентрація розчинних солей в ОСО досягає рівноваги (умовно при  $t \rightarrow \infty$ ). Тобто,

$$\varphi_{\infty} \rightarrow k = C_{\infty}/C_0, \quad (4)$$

Співвідношення (3) є дуже корисними оскільки дозволяють узгоджувати водообмін в ОСО та контролювати, наприклад, якість роботи градирні. До речі, часто експлуатаційний персонал прагнути економити забір свіжої водив впроваджує дорогу заміну водоуловлювачів у градирнях, знижуючи неконтрольовану продувку з краплинним виносом, і буває вимушений на величину зекономленої води збільшувати величину продувки, або, див. (3) та (4), погоджуватися на ріст солемісту в ОВ з усіма наслідками.

При сталих режимних параметрах ОСО ( $G_{ж}$ ,  $V$ ,  $C_0$  та  $\varphi$ ) рівняння (5) інтегрується і отримуємо залежність  $C(t)$  [4], яка описує режим накопичення розчинних солей в ОСО,

$$C(t) = C_0 \cdot \left[ \varphi_{\infty} - (\varphi_{\infty} - 1) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{T_{пр}}} \right], \quad (5)$$

при великих часах з (5) отримуємо, що  $C_{\infty} = C_0 \cdot \varphi_{\infty}$  з якого випливає (4).

З (5) бачимо, що характерним часовим параметром в ОСО є величина

$$T = T_{пр} = \varphi_{\infty} \cdot T_{ж},$$

За час  $(t - t_0) > 4 \cdot T_{пр}$  відхилення  $C(t)$  від стаціонарного стану не **перевищує 2%** і концентрація розчинних солей в ОСО стає **практично рівною**  $C_{\infty} = C_0 \cdot \varphi_{\infty}$ . Тому використовувати наближення  $dC/dt \rightarrow 0$  потрібно з обережністю особливо для змінних режимів роботи ОСО.

Перейдемо до аналізу динаміки солей, що зазнають в ОСО фазових перетворень, наприклад, карбонату кальцію.

**Зуважимо**, що в нормативних документах, які регулюють роботу ОСО пропонують для оцінки ймовірності відкладень розглядати загальну жорсткість (твердість) ОВ, а не кальцієву [5, 6]. Карбонат магнію, маючи майже на два порядки більшу розчинність ніж карбонат кальцію, в ОСО практично не виділяється з ОВ (за винятком процесу змішаної кристалізації  $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$ ). Іони магнію, подібно до трасерів, накопичуються в ОВ, і тому використовувати загальну жорсткість для оцінки можливості відкладень в ОСО не коректно.

Щоб простежити за виділенням  $\text{CaCO}_3$  з оборотної води слід сформулювати кінетичне рівняння для активної концентрації іонів кальцію.

Якщо не брати до уваги інші канали зміни концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , то рівняння для цих іонів формально отримується з (1) додаванням у праву частину (5) члена, який описує виділення  $\text{CaCO}_3$ ,

$$\frac{dC_{Ca}}{dt} = \frac{1}{\varphi \cdot T_{ж}} \cdot (\varphi \cdot C_{Ca0} - C_{Ca}) - \frac{dC_{CaCO_3}}{dt}. \quad (6)$$

Перший член правої частини (9) представляє водообмін в ОСО і аналогічний (1), а другий зміну активної концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$  внаслідок їх переходу в  $\text{CaCO}_3$ . Існує багато фізико-хімічних моделей кінетики виділення  $\text{CaCO}_3$  [4]. Проте тут приймаємо найпростіший варіант [7]. Вважаємо, що процес перетворення  $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3$  відбувається за схемою



Цій реакції відповідає вираз для швидкості утворення  $\text{CaCO}_3$

$$\frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = K \cdot C_{\text{HCO}_3^-} \cdot C_{\text{Ca}^{2+}}. \quad (8)$$

Отже кінетичне рівняння для іонів  $\text{Ca}^{2+}$  в ОВ приймає вигляд,

$$\frac{dC_{Ca}}{dt} = \frac{1}{\varphi \cdot T_{ж}} \cdot (\varphi \cdot C_{Ca0} - C_{Ca}) - K \cdot C_{\text{HCO}_3^-} \cdot C_{Ca}. \quad (9)$$

Якщо залежності від часу параметрів (9) відомі, то величину  $C_{Ca}(t)$  можна визначити чисельним інтегруванням. Проте нас цікавить усталений режим роботи ОСО в якому  $\frac{dC_{Ca}}{dt} \approx 0$ . Якщо використати цю умову то (9) перетворюється в алгебраїчне рівняння з якого визначаємо концентрації іонів кальцію в ОВ для режиму роботи, коли концентрація  $\text{Ca}^{2+}$  підтримується сталою внаслідок компенсації переходу іонів кальцію в  $\text{CaCO}_3$  його подачею в ОСО з водою підживлення. Такий режим роботи ОСО **назвемо квазістаціонарним**.

Отже гранична концентрація іонів кальцію у квазістаціонарному режимі,

$$C_{Ca_{\infty}} = \frac{\varphi \cdot C_{Ca0}}{1 + \varphi \cdot T_{ж} \cdot K \cdot C_{\text{HCO}_3^-}} = \frac{G_{ж} \cdot C_{Ca0}}{G_{пр} + K \cdot V \cdot C_{\text{HCO}_3^-}}. \quad (10)$$

Отриманий вираз разом з (8) дозволяє визначити швидкість виділення  $\text{CaCO}_3$  у **квазістаціонарному процесі**, що реалізується в ОСО, на підставі даних про режимні параметри ОСО та якість ОВ [8],

$$\frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = G_{ж} \cdot \frac{K \cdot C_{Ca0} \cdot C_{\text{HCO}_3^-}}{G_{пр} + K \cdot V \cdot C_{\text{HCO}_3^-}}. \quad (11)$$

**Зуважимо**, що наближення  $\frac{dC_{Ca}}{dt} = 0$  яке відповідає сталій концентрації кальцію в ОСО,

насправді не вимагає незмінності в часі швидкості виділення  $\text{CaCO}_3$  оскільки параметри режиму роботи ОСО, див (11), можуть змінюватися.

З (11) випливає, що зменшити швидкість виділення  $\text{CaCO}_3$  з ОВ (підвищити її стабільність щодо виділення  $\text{CaCO}_3$ ) можна змінюючи вміст іонів  $\text{Ca}^{2+}$  у воді підживлення (пом'якшення води), переведенням тимчасової твердості (концентрації бікарбонатів) у постійну шляхом підкислення та застосуванням інгібіторів відкладень (регулювання величини К) [8].

#### Приклад

Застосуємо отримані результати до ОСО ТЕС потужністю  $4 \times 300$  МВт у якій використовують пом'якшення води підживлення.

Приймаємо величини:  $\phi = 3.5$ ;  $T_{\text{ж}} = 42$  год.;  $K = 1.33 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{г-іон}) \cdot \text{год.}$ ;  $C_{\text{Ca0}} = 0.7$  (г-іон)/ $\text{м}^3$ ,  $C_{\text{HCO}_3} = 3$  (г-іон)/ $\text{м}^3$ ,  $G_{\text{ж}} = 3320 \text{ м}^3 / \text{год.}$ ,  $G_{\text{пр}} = 920 \text{ м}^3 / \text{год.}$

Тоді за (10) отримуємо граничну величину концентрації іонів в усталеному режимі роботи ОСО

$$C_{\text{Ca oo}} = 1.54 (\text{г-іон}) / \text{м}^3 = 2.20 \cdot C_{\text{Ca0}},$$

що менше від концентрації іонів кальцію, яка була б при відсутності виділення карбонату кальцію,

$$\phi \cdot C_{\text{Ca0}} = 3.5 \cdot 0.7 = 2.45 \text{ (г-іон)} / \text{м}^3.$$

Визначимо зміну концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$  оборотної води, яка виникає впродовж часу виходу на квазістаціонарний стан, внаслідок перетворення в  $\text{CaCO}_3$ ,

$$\Delta C_{\text{CaCO}_3} = \phi \cdot C_{\text{Ca0}} - 2.20 C_{\text{Ca0}} = 0.91 C_{\text{Ca0}} \text{ г-моль} / \text{м}^3, \quad (12)$$

що становить 37% від концентрації іонів кальцію, яка вноситься в ОСО з водою підживлення.

За формулою (11) розраховуємо швидкість виділення  $\text{CaCO}_3$  з ОВ [9]. Вона за вказаних умов рівна

$$9.8 \cdot 10^{-3} (\text{г-моль}) / (\text{м}^3 \cdot \text{год.}).$$

Маючи величину концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$  в усталеному (квазістаціонарному) режимі роботи ОСО можемо розрахувати індекс стабільності оборотної води [10]

$$\psi = C_{\text{Caoo}} / (\phi \cdot C_{\text{Ca0}}) = 63\%.$$

Він, звичайно, недостатній для задовільної роботи ОСО і стабільність ОВ необхідно підвищити, наприклад, підкисленням води підживлення чи застосуванням інгібіторів відкладень

(регулювання концентрації бікарбонатних іонів та величини К). Такий спосіб стабілізації ОВ використовують на Рівненській АЕС, забезпечуючи стабільність ОВ на рівні 85–90%.

#### Висновки

1. Отримано рівняння для динаміки концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$  в оборотній воді, яке враховує водообмін та фізико-хімічний процес утворення карбонату кальцію.

2. Показано, що часом, який характеризує перехідні процеси в ОСО як для трасерів, так і для накипінів, є добуток  $\phi \cdot T_{\text{ж}}$ , якщо  $V_{\text{ОСО}} = \text{Const}$ , то  $\phi \cdot T_{\text{ж}} = T_{\text{пр}}$  – часу опорожнення водного об'єму ОСО продувкою.

3. Наближення стаціонарності процесів в ОСО, яке часто використовується в розрахунках більшістю авторів, справедливе (дає похибку меншу від 2%) лише для процесів, які змінюються з характерними часами більшими  $4 \cdot \phi \cdot T_{\text{ж}}$ . Оцінка цієї величини для ОСО електростанцій залежно від ступеня випарювання змінюється в межах  $T \approx (25-160)$  діб. Тому для процесів з меншими характерними часами наближення стаціонарності потрібно використовувати з обережністю.

4. Потрібно мати на увазі, що вирази (3), які описують співвідношення між потоками в ОСО, справедливі за умови сталості в часі водного об'єму ОСО. Проте основних рівнянь, динаміки трасерів (1) та накипінів (6), це обмеження не стосується.

5. Отримано вираз для оцінки граничної концентрації іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , яка встановлюється в оборотній воді у квазістаціонарному наближенні, див. (10). Порівнюючи величину граничного  $\text{Ca}^{2+}$  з концентрацією  $\phi \cdot C_{\text{Ca0}}$ , яка була б за відсутності виділення твердого  $\text{CaCO}_3$ , можна судити про очікувану інтенсивність виділення  $\text{CaCO}_3$  та ріст відкладень в ОСО.

6. Кількість  $\text{CaCO}_3$ , яка виділяється в ОСО у *квазістаціонарному* режимі роботи ОСО залежить від концентрації іонів кальцію у воді підживлення, інтенсивності підживлення та динамічного фактору  $\phi$ , див. (11).

7. Слід розуміти, що засоби протидії відкладенням: стабілізація, підкислення чи ін. не можуть повністю усунути відкладення, а лише забезпечують їх прийнятний рівень.

#### Список літератури:

1. Кучеренко Д.И., Гладков В.А. Обратное водоснабжение. (Системы водяного охлаждения). Москва : Стройиздат. 1980. 169 с.
2. Кочмарский В.З., Поспелов Д.Н. Состояние проблемы противонакипной обработки воды в СССР. – Київ: Знання. 1986. 20 с.
3. Кочмарський В.З. Кінетична модель карбонатної системи в умовах оборотного водопостачання // Вісник Укр. державної акад. водного господарства. Рівне. 1998. Вип. 1, ч. 1. С. 236–243.



4. Гаєвський В.Р., Кочмарський В.З. Підвищення ефективності оборотних систем охолодження мінімізацією кальцій-карбонатних відкладень. Рівне: НУВГП, 2018. 154 с. ISBN 978-966-327-383-9
5. ДБН В.2.5-74:2013. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування.
6. Методические указания по предотвращению минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке: РД 34.22.501-87. офиц. Изд. Москва : СПО Союзтехэнерго СССР. 1988. 41 с.
7. Plummer L. N. Critical review of the kinetics of calcite dissolution and precipitation. In Jenne E., ed., Chemical Modeling – Speciation, Sorption, Solubility, and Kinetics in Aqueous Systems. / L. N. Plummer, D. L. Parkhurst . M. L. Wigley // Am. Chem. Soc.: Washington, D.C. 1979. P. 537–575.
8. Кочмарський В.З., Трофимчук І.П., Куба В.В. Особливості поведінки трасерів та виділення твердого  $\text{CaCO}_3$  в оборотних системах охолодження.// ВіВТ. НТвісті. № 1(22), 2018. Ст. 39–49. <https://doi.org/10.20535/22189300221201814442>
9. Кочмарський В.З. Контроль стабілізаційної обробки охолодної води.// Енергетика і електрифікація. № 2. 2020. Ст. 24–30.
10. Кочмарський В.З., Костюк О.П., Тимейчук О. Ю., Куба В.В. Динаміка відкладень та вплив на їх ріст імпульсного режиму течії охолодної води.// Вч. зап. Таврійського нац. універ. ім. В.І. Вернадського. Сер.: Техн. науки. Том 33 (72) № 5, 2022. Ст. 216–221. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-941/2022.5/32>

### **Kochmarskii V.Z., Kostyuk O.P., Tymeychuk O.Yu., Kuba V.V. ALGORITHM FOR CALCULATING THE RATE OF $\text{CaCO}_3$ RELEASE IN THE QUASI-STATE MODE OF RCS OPERATION**

*Low-temperature deposits are considered, in particular, solid  $\text{CaCO}_3$ , which is the main component of contamination of heat exchangers at power plants and enterprises, especially those that use circulating cooling systems (RCS). To analyze the conditions for the release of  $\text{CaCO}_3$  from recycled water, kinetic equations for soluble salts and the active concentration of calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) were formulated. It is shown that the characteristic time of transient concentration processes for both soluble salts and  $\text{Ca}^{2+}$  ions is equal to the product of the dynamic parameter  $\varphi = G_f/(G_f - G_{ev})$  for the period of replacement of water in RCS with feed water ( $T_\rho$ ),  $T = \varphi \cdot T_f$ .*

*The obtained relations between water flows in RCS and the dynamic parameter  $\varphi$ , which are valid under the condition of constancy of the water volume of RCS. These ratios make it possible to control the amounts of blowdown and evaporation flows, to determine the required amount of cooling water supply and to evaluate the efficiency of cooling towers.*

*The concept of the quasi-stationary mode of operation of the RCS is formulated. In this approximation, an expression for the rate of  $\text{CaCO}_3$  release as a function of water quality and RCS operation mode is obtained. An algorithm for calculating the limit concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  ions, which is set in circulating water in a quasi-stationary mode, has been developed.*

*The obtained expressions are used to analyze the stability of the circulating water of a specific RCS in which softening of the feed water by lighting is used. Based on the calculated level of circulating water stability, a conclusion is made about the need for additional measures to reduce the rate of  $\text{CaCO}_3$  release, for example, by acidification and addition of sediment inhibitors.*

*The method of calculating the limit concentration of calcium ions can also be used to create a control algorithm in the scheme of automating the operation of the RCS to achieve its maximum efficiency.*

**Key words:** circulating water, feeding, kinetic equations, release rate, calcium carbonate, quasi-stationary regime, dynamic parameter.