

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБОРОТНИХ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

С. А. Концевой

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

e-mail: serkon157@ukr.net

Розроблено спосіб визначення складу циркуляційної води в оборотних системах в залежності від рівня продування на основі вперше визначеного фактичного коефіцієнту випаровування на охолоджувальному елементі. Наведено формули для визначення цього коефіцієнту (відношення витрати води, що випаровується, до витрати з крапельним віднесенням) у стаціонарних умовах. Запропоновано розрахунково підтверджену математичну модель та порівняно її з чинною, яка не дозволяє прогнозувати коефіцієнт концентрування циркуляційної води. Запропоновано можливість реалізації стабілізованої системи автоматичного регулювання з використанням цієї моделі. Визначено допустимий коефіцієнт концентрування за CaSO_4 і наведено методику визначення раціонального коефіцієнту концентрування в системі.

Ключові слова: коефіцієнт випаровування, охолоджувальна система, математична модель, коефіцієнт концентрування, регулювання витрати, дозування кислоти.

Вступ

Визначення параметрів водно-хімічного режиму (ВХР) оборотних охолоджувальних систем (ООС) є однією з важливих задач сучасної енергетики та хімічної промисловості. Оптимальний ВХР повинен забезпечувати безнакипний режим роботи всього обладнання і, насамперед, нагрівального елемента схеми: конденсатору турбіни на ТЕС (ТЕЦ) або різноманітних теплообмінників. Основні положення в оцінюванні складу циркуляційної води, за якого не відбувається накипоутворення, розроблено у 30-40 роках 20-го сторіччя Ланжельє та його послідовниками [1]. Індекс Ланжельє (LSI) і на цей час використовується для визначення допустимого складу води в залежності від температури (до 90°C), твердості, лужності та загального солемісту [2]. Проте, залежність складу циркуляційної води від її витрати на продування досить неоднозначна, що не дозволяє прогнозувати її склад і, як наслідок, призводить до суттєвих проблем в регулюванні складу води в умовах зміни режимів. Це обумовлено суттєвою інерційністю ООС, витрати циркуляційної води в яких складають десятки тисяч кубічних метрів на годину. Така ситуація призводить або до недостатнього продування (можливе накипоутворення), або до суттєвих витрат продувної води (економічні витрати). Рішення цієї проблеми і представлено у цій роботі.

Мета роботи – розробити математичну модель визначення складу циркуляційної води в залежності від складу води, що додається, параметрів охолоджувального елемента та витрати води на продування. На основі такої моделі визначити мінімальну витрату продувної води в умовах дозування сульфатної кислоти, що попередить утворення як карбонатного, так і сульфатного накипу на теплообмінній поверхні обладнання системи за мінімальної собівартості обробки води.

Функціонування оборотної охолоджувальної системи

Особливість функціонування охолоджувальних систем полягає в тому, що нагрівання води відбувається без контакту з повітрям, а її охолодження – при контакті з повітрям у градирні (бризкальному басейні) та перебігає з випаровуванням частини води, що викликає збільшення її солемісту. Це створює можливість пересичення води по будь-якій малорозчинній сполуці і, перш за все, зі зворотною температурною залежністю, в залежності від йонного складу додаткової води (CaCO_3 , CaSO_4).

Склад циркуляційної води ООС змінюється в залежності від витрати на продування, а дозування сульфатної кислоти або антискаланта дозволяє мінімізувати таке продування та, як результат, ці засоби дозволяють уникнути карбонатного накипоутворення на поверхні нагрівального елемента (конденсатору турбіни на ТЕС або теплообміннику в хімічних виробництвах).

Слід зазначити, що рівень продування системи залежить від необхідності зменшення температури циркуляційної води (у літній період) за рахунок збільшення витрати додаткової води з більш низькою температурою.

Таким чином, існує два способи регулювання складу циркуляційної води (ЦВ):

- регулюванням витрати продувної води (ПВ). Вихідним сигналом системи автоматизації є значення рН ЦВ;

- регулюванням дозування сульфатної кислоти у додаткову воду (ДВ). Вихідним сигналом системи автоматизації є значення рН ДВ і/або ЦВ.

Дозування сульфатної кислоти може призвести до пересичення ЦВ за CaSO_4 , тому потрібна надійна методика розрахунку ступеня концентрування (S_k) в залежності від витрати на продування, яка визначається за фіксованої величини примусового продування:

$$S_k = C_{ci} / C_{di}, \quad (1)$$

де C_{ci} – концентрація йону в циркуляційній воді; C_{di} – концентрація йону в додатковій воді. Зазвичай в експлуатаційних умовах визначається загальна твердість (Тв) у воді і за цих значень визначається коефіцієнт S_k .

Хоча в ООС максимально допустима твердість циркуляційної води і, відповідно, допустимий коефіцієнт концентрування за карбонатом кальцію (надалі $S(\text{CaCO}_3)$), зазвичай визначається за індексом Ланжелє, нами було запропоновано власний спосіб такого визначення на основі лабораторної методики [3], який включає термостатування проб води за даної температури (до 190°C) та визначення рН та Тв до і після термостатування, незалежно від способу визначення $S(\text{CaCO}_3)$. Вихідними даними для визначення необхідного рівня продування системи є саме цей коефіцієнт.

Необхідність продування системи та/або дозування кислоти обумовлена також збільшенням рН ЦВ внаслідок процесів, що перебігають у воді при контакті з повітрям в охолоджувальному елементі:

- зменшення концентрації CO_2 (температура води більше температури повітря);

- розкладання гідрокарбонатних йонів (ГКІ), яке завжди протікає з підвищенням рН.

Раніше запропоновано [4] використати рівняння реакцій за ОН- та Н- механізмами для визначення механізму розкладання ГКІ при нагріванні:



Аналізуючи відповідні рівняння в контексті розкладання йонів HCO_3^- , можна прийти до висновку, що в умовах вільного контакту з повітрям реакція (2) за ОН-механізмом є первинною. Дійсно:

- в умовах нагрівання води зменшується концентрація CO_2 (внаслідок зменшення його розчинності), що призводить до зсуву рівноваги реакції за ОН-механізмом у бік утворення йонів OH^- ;

- накопичення у воді необхідної (критичної) кількості OH^- призводить до розкладання HCO_3^- відповідно до реакції (3) за Н-механізмом і утворення H_2O ($\text{H}^+ + \text{OH}^-$) за реакцією 4.

Таким чином, збільшення рН в процесі розкладання є наслідком накопичення йонів OH^- , що утворились в результаті первинної реакції за ОН-механізмом та не вступили у реакцію з йонами H^+ , що утворились за реакцією (3).

Сумарне рівняння (4) розкладання гідрокарбонатних іонів є наближеним, оскільки кількість CO_2 , що утворилася, більша ніж кількість CO_3^{2-} . Доказом тому є збільшення рН (утворилось іонів гідроксиду більше, ніж іонів гідрогену).

Киснева корозія (корозія з кисневою деполяризацією) в охолоджувальних системах в умовах прийнятого режиму (рН у діапазоні від 6,5 до 8,5) перебігає без утворення виразок, але залізооксидний шлам, що утворюється при цьому, слабо зв'язаний з поверхнею обладнання і утворює вторинний накіп на поверхні теплообміну. Тому в цих системах використовують інгібітори корозії, які утворюють захисну плівку, і реагенти, які стабілізують шлам в об'ємі води, що попереджує їх осадження на поверхні системи.

Для нових ООС, що проектуються, доцільно використовувати трубопроводи з полімерних матеріалів, оскільки температурний режим (зазвичай до 80°C) дозволяє застосування обладнання з таких матеріалів. Враховуючи компактність розташування ООС, є цілком реальною і реконструкція існуючих систем. Заміна теплообмінних апаратів на апарати з нержавіючої сталі також не представляє технічної проблеми.

Фактичний коефіцієнт випаровування циркуляційної води

На сьогоднішній день терміни «коефіцієнт концентрування» та «коефіцієнт випаровування» використовуються як синоніми. Вочевидь, концентрування обумовлено випаровуванням, проте інтенсивність випаровування ніяк не може бути обумовлена витратою на продування, оскільки ця інтенсивність визначається співвідношенням витрат води, що випаровується (G_B), до витрати з краплинним віднесенням (G_K):

$$S_{\text{vap}} = G_B / G_K, \quad (5)$$

де S_{vap} – коефіцієнт випаровування (“vaporization”).

Вочевидь, запропонований коефіцієнт залежить від конструкції охолоджувального елемента, температури самої циркуляційної води та температури навколишнього середовища. Взимку, наприклад, випаровування менш інтенсивне і S_{vap} зменшується, а в умовах бризкального басейну краплинне винесення завжди більше, ніж у градирнях і, відповідно, S_{vap} завжди більше у градирнях.

Як не дивно, це відношення введено нами вперше, хоча значення відповідних витрат води було визначено у відсотках до витрати циркуляційної води в залежності від типу охолоджувального елемента [5].

Мабуть, наведений “фактичний” коефіцієнт випаровування ніколи раніше не визначався, оскільки не існує способу визначення витрат G_B і G_K приладами (витратомірами) на градирні. Нижче наведено спосіб їх визначення у стаціонарних умовах на основі простих балансових рівнянь з використанням параметрів, які визначаються в експлуатаційних умовах (витрата та твердість води). Оскільки визначається залежність S_{vap} від S_K , то вирішується і зворотня задача (залежність S_K від S_{vap}).

Для визначення складу циркуляційної води в залежності від витрати на примусове продування використано рівняння сольового балансу ОС та матеріального балансу по воді у системі. Слід зазначити, що значення рН та концентрації ГКІ не будуть визначені за представленою нижче методикою, оскільки їх значення залежать не тільки від процесу випаровування, але й від інтенсивності реакції розкладання ГКІ (рН збільшується, а концентрація ГКІ - зменшується).

Сольовий баланс охолоджувальної системи визначається за наступним балансовим рівнянням [6] за фіксованого продування:

$$G_B \cdot \text{CB}_\Pi + G_D \cdot \text{CB}_Д = G_D \cdot \text{CB}_\Pi, \quad (6)$$

де CB_Π – солеміст циркуляційної води; $\text{CB}_Д$ – солеміст додаткової води; G_D – витрата додаткової води.

Без суттєвої похибки (якщо CaCO_3 не утворюється) можна замінити у цьому рівнянні значення солемісту на твердість води.

Цікаво, що відоме базове рівняння матеріального балансу (6) не є таким в канонічному сенсі: кількість солей що поступає в систему дорівнює кількості, що виходить з системи. Проте, рівняння (6) виводиться з такого дійсно матеріального балансу:

$$G_d \cdot CB_d = G_k \cdot CB_{\text{ц}} + G_{\text{п}} \cdot CB_{\text{ц}}, \quad (7)$$

де G_k – витрата води з крапельним віднесенням, $G_{\text{п}}$ – витрата продувної води.

Роботу охолоджувальної системи саме в частині власне охолоджувальній (градирня або бризкальний басейн) характеризують два параметри - витрата води, що випаровується при контакті з повітрям, та витрата води з краплинним винесенням (природне продування системи). Баланс по воді має вигляд:

$$G_d = G_b + G_k + G_{\text{п}}, \quad (8)$$

де $G_{\text{п}}$ – витрати води на продування.

Коефіцієнт випаровування не важко визначити експериментально, оскільки значення витрат додаткової та продувної води контролюється приладами, а значення витрати води, що випаровується при контакті з повітрям, можна вивести з сольового балансу (6):

$$G_b = G_d \cdot (CB_{\text{ц}} - CB_d) / CB_{\text{ц}} = G_d \cdot (1 - 1/S_k). \quad (9)$$

Витрата води з краплинним віднесенням визначається з рівняння (8) як:

$$G_k = G_d - G_b - G_{\text{п}} \quad (10)$$

Таким чином, після відповідних перетворень за фіксованої витрати на продування, коефіцієнт випаровування дорівнює:

$$S_{\text{в}} = (S_k \cdot G_d - G_d) / (G_d - S_k \cdot G_{\text{п}}). \quad (11)$$

З цього рівняння (11), враховуючи, що $S_{\text{в}} > 0$, якщо $G_d - S_k \cdot G_{\text{п}} > 0$:

$$S_k < G_d / G_{\text{п}}. \quad (12)$$

Це й можна використовувати як критерій точності визначення концентрацій у додатковій та циркуляційній воді, або витрати додаткової та води на примусове продування.

Наступним кроком необхідно було визначити із рівняння (11) залежність коефіцієнту концентрування від коефіцієнту випаровування та витрат на продування:

$$S_k = G_d \cdot (1 + S_{\text{в}}) / (G_d + S_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}) \quad (13)$$

За відсутності примусового продування ($G_{\text{п}}=0$) максимальний коефіцієнт концентрування дорівнює:

$$S_{\text{max}} = 1 + S_{\text{в}}. \quad (14)$$

Тобто:

$$S_k = G_d \cdot S_{\text{max}} / (G_d + S_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}}). \quad (15)$$

Те ж значення S_{max} можна отримати на основі сольового та водного балансу (за $G_{\text{п}} = 0$; $G_d = G_b + G_k$):

$$S_{\text{max}} = CB_{\text{ц}} / CB_d = G_d / (G_d - G_b) = (G_k + G_b) / G_k = 1 + S_{\text{в}}. \quad (16)$$

Виходячи з сольового балансу (замінюючи $CB_{\text{ц}}$ і CB_d на $C_{\text{ц}}$ і C_d , відповідно) і коефіцієнту випаровування, максимальна концентрація йонів у циркуляційній воді визначається наступним чином:

$$C_{\text{цmax}} = C_d \cdot (1 + S_{\text{в}}). \quad (17)$$

Розрахункова перевірка методики визначення коефіцієнту випаровування

Розглянемо існуючу методику розрахунку згідно прикладу, наведеному у [7]. Для визначення S_k , згідно відповідних таблиць [5], отримують значення G_b ($p_1=1,4\%$) та G_k ($p_2=0,1\%$), задаються $G_{\text{п}}$ ($p_3=1,5\%$) та G_d ($p=3,0\%$) у відсотках від витрат циркуляційної води ($G_{\text{ц}} = 19600 \text{ м}^3/\text{год}$), де p_i – відсоток витрати води від $G_{\text{ц}}$ в існуючій методиці. Ці відсотки обумовлено конструкцією охолоджувального елементу.

Коефіцієнт випаровування за цими даними (S'_{vap}) дорівнює 14 (1,4/0,1), проте ніколи не визначається, а коефіцієнт концентрування визначається як:

$$S'_k = p / (p - p_1) = 3 / (3 - 1,4) = 1,875. \quad (18)$$

Витрата води визначено як:

$$G_i = G_{\text{ц}} \cdot p_i / 100. \quad (19)$$

Відповідно, $G'_b = 274,4 \text{ м}^3/\text{год}$, $G'_k = 19,6 \text{ м}^3/\text{год}$, $G'_n = 294 \text{ м}^3/\text{год}$, $G'_d = 588 \text{ м}^3/\text{год}$.

Розглянемо, як розроблена методика відповідає існуючій. Вихідними даними є $S_k = S'_k$ (1,875), $G_n = G'_n$ (294 $\text{м}^3/\text{год}$) та $G_d = G'_d$ (588 $\text{м}^3/\text{год}$), тобто дані, що визначають на реальній установці, а конкретні значення отримані для перевірки з рівнянь (18, 19).

Коефіцієнт випаровування і витрати води ($\text{м}^3/\text{год}$) визначаємо згідно рівнянь (11, 9, 10), які, вочевидь, принципово відрізняються від рівнянь (18, 19):

$$\begin{aligned} S_{\text{vap}} &= (1,875 \cdot 588 - 588) / (588 - 1,875 \cdot 294) = 14,0, \\ G_b &= 588 \cdot (1 - 1/1,875) = 274,4, \\ G_k &= 588 - 274,4 - 294 = 19,6. \end{aligned}$$

Зазначимо, що $S_{\text{vap}} = S'_{\text{vap}}$, $G_b = G'_b$, $G_k = G'_k$. Таким чином, результати, отримані за запропонованою методикою, точно відповідають контрольним значенням з існуючої методики.

Суттєва відмінність запропонованої методики від існуючої полягає у наступному:

- дозволяє визначати параметри реальної системи G_b та G_k за стаціонарного режиму роботи, а не за табличними (довідковими) даними [5]. Це дозволяє врахувати всі фактори, що впливають на значення S_{vap} в даний момент;

- застосування коефіцієнту випаровування дозволяє визначити склад води (завдяки визначенню S_k) в залежності від витрати на продування.

Таким чином, в умовах інерційної ООС розроблена модель дозволяє дискретно переходити до нового режиму з незначними відхиленнями S_k від заданого значення. Наприклад, початковий режим без додаткової обробки води (S_k зазвичай в діапазоні 1,05÷1,35), а кінцевий режим з дозуванням антискалантів (S_k близько 3,0). Розрахунок витрати на продування виконується за розробленою моделлю з попереднім визначенням коефіцієнта випаровування в даний момент. Коригування витрати на продування реалізується за звичайною схемою (наприклад, за значенням рН циркуляційної води).

Максимально допустимий коефіцієнт концентрування за CaSO_4

Природно, що продування охолоджувальної системи неминуче, якщо максимально можливий коефіцієнт концентрування (S_{max}) більше максимально допустимого, значення якого можливо визначити через добуток розчинності малорозчинної речовини.

Оскільки S_k за катіоном дорівнює S_k за аніоном, то максимально допустимий коефіцієнт концентрування малорозчинної речовини (MP) визначається як:

$$S(\text{MP}) = ((S_{\text{кат}_{\text{доп}}} \cdot S_{\text{ан}_{\text{доп}}}) / (S_{\text{кат}_{\text{д}}} \cdot S_{\text{ан}_{\text{д}}}))^{0,5}, \quad (20)$$

де $S_{\text{кат}_{\text{доп}}}$ – допустима концентрація катіону (Ca^{2+}) в циркуляційній воді; $S_{\text{ан}_{\text{доп}}}$ – допустима концентрація аніону (SO_4^{2-}) в циркуляційній воді; $S_{\text{кат}_{\text{д}}}$ – концентрація катіону (Ca^{2+}) в додатковій воді; $S_{\text{ан}_{\text{д}}}$ – концентрація аніону (SO_4^{2-}) в додатковій воді.

При цьому:

$$(S_{\text{кат}_{\text{доп}}} \cdot S_{\text{ан}_{\text{доп}}}) = \text{ДК} = \text{ДР}/f^2, \quad (21)$$

де ДК – добуток концентрацій, ($\text{моль}/\text{дм}^3$)²; ДР – добуток розчинності погано розчиненої речовини (кальцію сульфату, ($\text{моль}/\text{дм}^3$)²) за даної температури;

f – коефіцієнт активності двовалентного іона (0,4÷0,5 залежно від іонної сили розчину).

Доцільно використовувати добуток активності іонів у циркуляційній та додатковій воді:

$$DA_d = a(k_d) \cdot a(a_d) = DK \cdot f^2. \quad (22)$$

Отже, максимально допустимий коефіцієнт концентрування за $CaSO_4$:

$$S(CaSO_4) = (DP(CaSO_4) / DA_d)^{0,5}. \quad (23)$$

Питома витрата кислоти визначить концентрацію SO_4^{2-} в додатковій воді, а також значення рН додаткової води в залежності від її лужності. Вочевидь, дозування сульфатної кислоти буде зменшувати значення $S(CaSO_4)$, а її доза буде визначена за встановленим нормативно значенням рН додаткової води.

Визначимо $S(CaSO_4)$ для Дніпровської води: $C(Ca^{2+})=2$ ммоль/дм³, $C(SO_4^{2-})=0,5$ ммоль/дм³ (активності цих іонів менші за концентрації у 2 рази), $DP(CaSO_4)=35,75$ (ммоль/дм³)² ($35,75 \cdot 10^{-6}$ (моль/дм³)²) за температури 60°C:

$$S(CaSO_4) = (35,75 / (1 \cdot 0,25))^{0,5} = 11,96. \quad (24)$$

Згідно вищевказаному розрахунку максимально можливий коефіцієнт випаровування S_{max} дорівнює 15. Тобто, за таких значень коефіцієнтів ($S_{max} > S_{доп}(CaSO_4)$) необхідне примусове продування системи (навіть без дозування H_2SO_4), а витрата на продування повинна забезпечити умову $S_k < S(CaSO_4)$.

Співвідношення коефіцієнтів $S(CaSO_4)$ та $S(CaCO_3)$ зазвичай більше 1, оскільки добуток розчинності за сульфатом кальцію більше, ніж за карбонатом кальцію, або менше значення $S(CaCO_3)$, отриманого згідно LSI. В результаті дозування сульфатної кислоти це співвідношення буде наближатись до одиниці, за якої подальше дозування не має сенсу. Іншими словами, допустимий S_k визначається за меншим з вказаних двох коефіцієнтів, тобто зазвичай лімітований за $S(CaCO_3)$.

Висновки

Розроблено методику визначення залежності коефіцієнта концентрування від витрати на продування оборотної охолоджувальної системи на основі вперше запропонованого фактичного коефіцієнта випаровування, який визначається в експлуатаційних умовах. Завдяки цьому стає можливою реалізація автоматичного регулювання значення коефіцієнту концентрування шляхом зміни витрати води на примусове продування системи з мінімізацією відхилення заданого коефіцієнту. Це дозволяє мінімізувати як додаткові втрати води, так і накипоутворення за недостатнього продування. Також визначено допустимий коефіцієнт концентрування за $CaSO_4$ і наведено методику визначення раціонального коефіцієнту концентрування в системі.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОРОТНЫХ ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

С. А. Концевой

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев

e-mail: serkon157@ukr.net

Разработан способ определения состава циркуляционной воды в оборотных системах в зависимости от уровня продувки на основе впервые предложенного фактического коэффициента испарения охладительного элемента. Представлены формулы для определения этого коэффициента (отношение расхода воды на испарение и расхода с капельным уносом) в стационарных условиях. Предложена расчётно подтвержденная математическая модель, которая сравнена с существующей, не позволяющей прогнозировать коэффициент концентрирования циркуляционной воды. Представлена возможность реализации стабилизированной системы автоматического регулирования с использованием этой модели. Определён допустимый коэффициент концентрирования по $CaSO_4$ и представлена методика определения рационального коэффициента концентрирования в системе.

Ключевые слова: коэффициент испарения, охладительная система, математическая модель, коэффициент концентрирования, регулирование расхода, дозировка кислоты.

MATHEMATICAL MODEL OF RECYCLING COOLING SYSTEMS

S.A. Kontsevoi

National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev

e-mail: serkon157@ukr.net

A method for determining the composition of any circulating water in cooling systems was developed basing of the proposed actual evaporation rate. The evaporation rate is a flow of evaporated water divided by a flow of loss drops at the cooling unit. The formulas for the determination of this rate in stationary conditions are given. The proposed mathematical model is confirmed by calculation comparing to the existing one, which does not allow predicting concentration factor of circulating water. The opportunity to implement stable system of automatic control using this model is given. An admissible concentration factor for CaSO_4 and the method for determination of rational concentration factor for system are presented.

Keywords: evaporation rate, cooling system, mathematical model, concentration factor, flow control, acid dosing.

Список літератури

1. *Langelier, W. F.* Chemical equilibria in water treatment / W. F. Langelier // Journal of the American Water Works Association. – 1946. 38, P. 169–178.
2. W-index. Water index calculations. Version 5.0 for Excel [Електронний ресурс] / Marvin Silbert and associates. 23 Glenelia Avenue, Toronto, Ontario, Canada. – 2006. – Режим доступу: www.silbert.org/W-index-Spreadsheet.pdf
3. *Концевой, С.А.* Патент України на корисну модель “Спосіб визначення складу водного теплоносія”, № 68398 / С.А. Концевой, І.М. Астрелін // від 26.03.2012.
4. *Kontsevoi, A.L.* Unified Water Chemistry for Circulation Heat-Transfer Systems / A.L. Kontsevoi, S.A. Kontsevoi // Thermal Engineering. – 2006. – V. 53. – № 8. – p. 639–643.
5. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
6. *Громогласов, А.А.* Водоподготовка: процессы и аппараты [Текст]: Учеб. пособие для вузов / А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков. Под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
7. Обработка охлаждающей воды. Предупреждение карбонатных отложений [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Water/acidation.xmcd>