

**ЕНЕРГЕТИКА**  
**ТЕПЛОТЕХНІКА**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**  
**ENERGETICS**  
**HEAT ENGINEERING**  
**ELECTRICAL ENGINEERING**

УДК 621.182.12:628.16.094.3

**О.Б. Гуляєнко**, канд. хім. наук, доц.,

**В.В. Чиченін**, канд. техн. наук, доц.,

**В.Г. Ахрамєєв**

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, 65044 Одеса, Україна; e-mail: ahvitalchik@mail.ru

**ВПЛИВ ПІДКИСЛЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ  
НА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ**

*О.Б. Гуляєнко, В.В. Чиченін, В.Г. Ахрамєєв.* **Вплив підкислення циркуляційної води на диференціальний розподіл дисперсної фази.** Робота присвячена аналізу зв'язку технології обробки циркуляційної води оборотних систем охолодження з коагуляційно-агрегаційними властивостями грубодисперсних і колоїдних частинок дисперсної фази. В оборотних системах охолодження при освітленні додаткової води знижуються концентрації іонів  $\text{HCO}_3^-$  і  $\text{CO}_3^{2-}$  і підвищується рН. Поглинання в градирні циркуляційної водою атмосферної вуглекислоти компенсує це підвищення. Проведено оцінку ймовірності адгезії на поверхні дисперсної фази, розподіленої в об'ємі циркуляційної води, і на теплообмінній поверхні конденсатора за різних ступенів упарювання теплоносія. Розподіл мікродисперсних частинок охолоджуючої води, сорбованих на теплообмінних поверхнях конденсатора (формування відкладень) і на поверхні більших частинок (агрегація частинок), відзеркалює ефективність використаної технології підготовки води. Показано, що підкислення додаткової води сприяє розчиненню найбільш дрібнодисперсних фракцій, еквівалентно збільшує жорсткість обробленої води.

*Ключові слова:* циркуляційна вода, додаткова вода, оборотна система охолодження.

*O.B. Gulyaenko, V.V. Chichenin, V.G. Ahrameev.* **Influence of acidification of circulating water on differential distribution of dispersed phase.** The paper analyzes the connection between processing technologies of circulating water cooling tower and coagulation-aggregation properties of colloidal particles of the dispersed phase. In circulating water cooling tower when clarifying additional water the reduction of  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{CO}_3^{2-}$  concentrations happens with corresponding pH increase. Absorption of atmospheric carbon dioxide by cooling tower circulating water offsets this increase. The estimation of the probability of adhesion to the surface of the dispersed phase, distributed in the volume of circulation water, and the heat exchange surface of the condenser for different degrees of evaporation of the coolant is made. The distribution of cooling water micro-disperse particles which are adsorbed on the heat exchange surfaces of the condenser (deposit formation) and on the surface of larger particles (particle aggregation) reflects the efficiency of applied water treatment technology. It is shown that acidification of additional water facilitates solution of most fine fractions and increases hardness of treated water.

*Keywords:* circulating water, additional water, reverse cooling system.

**Вступ.** Проблеми формування відкладень на внутрішній поверхні труб конденсатора широко висвітлюються в науковій літературі [1]. Більша частина робіт присвячена технологіям

DOI 10.15276/opus.2.46.2015.14

© 2015 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

антинакипної протидії, фізикохімії формування накипної плівки, кінетиці утворення накипоутворюючих мікрокристалів і їх взаємодії з поверхнею підкладки. Однак, в літературі не розглядався зв'язок технології обробки води з коагуляційно-агрегаційними властивостями частинок дисперсної фази.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У оборотних системах охолодження, що використовують технології підготовки додаткової води, наприклад освітлення, для видалення карбонат- і гідрокарбонат-іонів, вміст іонів  $\text{Ca}^{2+}$  в додатковій воді може бути навіть вище, ніж у вихідній воді, оскільки відсутність іонів  $\text{HCO}_3^-$  і  $\text{CO}_3^{2-}$  робить утворення  $\text{CaCO}_3$  формально неможливим. Однак поглинання в градирні циркуляційною водою атмосферної вуглекислоти  $\text{CO}_2$  компенсує відсутні іони і веде до втрати фазової стійкості. Від моменту втрати стійкості до стадії осадження еволюція дисперсної фази супроводжується рухом уздовж ланцюга кінетичних явищ: перокінез — ортокінез — глобулярна агломерація — адгезія. На перших двох ступенях формуються мікродисперсні частинки ( $\delta_{ri} < 1$  мкм), а два останні етапи формують шламові частинки ( $\delta_{ri} < 1 \dots 10^4$  мкм).

Еволюційному розвитку дисперсної фази сприяє також проскакування мікродисперсних і колоїдних фракцій через освітлювач до  $10 \text{ мг/дм}^3$  або до  $2 \text{ мг/дм}^3$  при механічній фільтрації освітленої води. Колоїдні частинки проскакування стають центрами кристалізації в нестійкому, схильному до коагуляції розчині, а мікрокристали є основою для утворення шламових частинок.

**Метою роботи** є визначення впливу підкислення циркуляційної води в системі охолодження конденсатора турбоагрегату на диференціальний розподіл частинок дисперсної фази, їх агрегацію (укрупнення) і сорбцію (осадження) на теплообмінних поверхнях.

**Викладення основного матеріалу.** Диференціальні розподіли дисперсних частинок досліджувалися в пробах води, відібраних в ході тривалого (до 600...800 годин) експерименту, на напірній ділянці (вхід в конденсатор) масштабної теплогідравлічної моделі оборотної системи охолодження (ОСО). Проби, що відбиралися, розрізнялися типом і режимами технологічної обробки води в ОСО, коефіцієнтами упарювання і т.п.

Для аналізу використано метод мікрооптичного сканування шару води між предметними скельцями, що застосовується для дослідження дисперсних частинок в діапазоні розмірів  $1 \dots 100$  мкм в іонізованих середовищах [2]. Суть методу полягає в підрахунку кількості  $n$  частинок  $i$ -го розміру в сканованому шарі відомого обсягу і в подальшому розрахунку диференціальних значень площ їх поверхні і маси (у припущенні про сферичну форму частинок) відповідно

$$S_i = n_i \pi \delta_{ri}^2 \cdot 10^{-12}, \text{ м}^2/\text{дм}^3, \quad (1)$$

$$m_i = 0,166 n_i \pi \delta_{ri}^3 \bar{\rho}_{pi}, \text{ кг/дм}^3, \quad (2)$$

де  $n_i$  — концентрація  $i$ -х частинок ( $\text{дм}^{-3}$ ) розміру  $\delta_{ri}$  (мкм) з усередненою щільністю  $\bar{\rho}_{pi}$  ( $\text{кг/м}^3$ ).

Проінтегрувавши вирази  $S_i = f_1(\delta_{ri})$  і  $m_i = f_2(\delta_{ri})$ , отримаємо інтегроване значення  $S$  і  $m$  у діапазоні розмірів  $\delta_{ri}^{\min} \dots \delta_{ri}^{\max}$ .

Значення  $\bar{\rho}_{pi}$  визначені методом седиментаційного осадження. На підставі вимірювання швидкості осадження великих колоїдних ( $\delta_{ri} = 1 \dots 3$  мкм), агломерованих ( $3 < \delta_{ri} < 10$  мкм) і шламових ( $10 < \delta_{ri}$  мкм) частинок, що сформувалися під час двогодинного вапнування води,  $\bar{\rho}_{pi}$  набули відповідних значень [3]:

— для  $\delta_{ri} < 3$  мкм —  $\bar{\rho}_{pi} \approx 1,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

— для  $3 < \delta_{ri} < 10$  мкм —  $\bar{\rho}_{pi} \approx 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

— для  $10 < \delta_{ri}$  мкм —  $\bar{\rho}_{pi} \approx 1,04 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

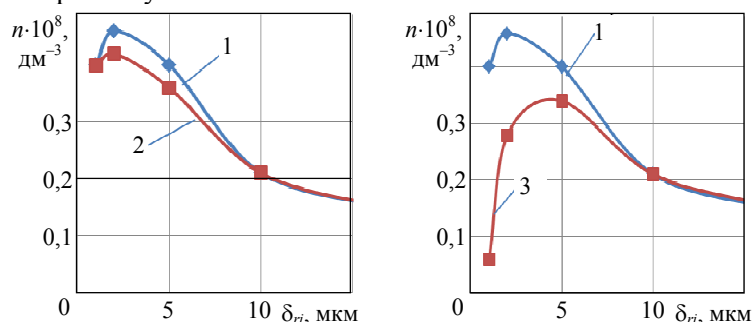
При кінетичних вимірах, кількість і розміри  $i$ -х мікрочастинок визначалися на фіксованій відстані від вхідного перетину в седиментаційну колону.

У відповідності з мікроскопічними спостереженнями шламові частинки являють собою структурно неоднорідні згущення безлічі мікрокристалів і колоїдних частинок, що притягують-

ся один до одного [2, 3]. У центрі частинки або в її ядрах щільність згущення вище, ніж на периферії. Технологічні процеси трансформують, насамперед, зовнішню розріджену оболонку частинки. Так, при підкисленні сірчаною кислотою основні зміни диференціального розподілу сумарних значень маси і площі поверхні частинок відбуваються за рахунок розчинення периферійних дрібнодисперсних фракцій.

На рисунку наведені криві змін концентрації дисперсних частинок при підкисленні циркуляційної води сірчаною кислотою  $H_2SO_4$ . Зони між кривими 1 — 2 і 1 — 3 визначають інтегральні зменшення концентрації частинок дисперсної фази в діапазоні розмірів  $1 \dots 17$  мкм при підкисненні (зміни концентрації більших частинок в експерименті не спостерігалося).

У поєднанні з (1) і (2) площа зони між кривими 1 і 2 відповідає інтегральному розчиненню питомої маси дисперсної фази, що дорівнює  $7,3$  мг/дм<sup>3</sup>, що еквівалентне збільшенню загальної жорсткості  $J_0$  на  $0,15$  мг-екв/дм<sup>3</sup>, і інтегральному зменшенню питомого значення сумарної площі поверхні частинок на  $4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup> в теплоносії, що був упарений до  $K_y = 3,5 \dots 4,0$  і підкислений  $H_2SO_4$ . Аналогічно, площа між кривими 1 — 3 відповідає інтегральній втраті питомої маси дисперсної фази на рівні  $18,4$  мг/дм<sup>3</sup>, що еквівалентне збільшенню загальної жорсткості  $J_0$  на  $0,42$  мг-екв/дм<sup>3</sup>, і зменшенню питомого значення сумарної площі поверхні частинок на  $9,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup> в теплоносії, що був упарений до  $K_y = 5,5 \dots 6,0$  і підкислений  $H_2SO_4$ . Такі зміни, що супроводжуються еквівалентною зміною жорсткості і лужності теплоносія, змінюють співвідношення сумарної площі поверхні частинок дисперсної фази і площі поверхні металів циркуляційного контуру (зокрема теплообмінної поверхні), на яких відбувається адгезія мікрочастинок, що випадають з пересиченого розчину.



*Зміна концентрації дисперсних частинок при підкисленні: вода вапняна ( $D_a = 20$  мг-екв/дм<sup>3</sup>), упарена ( $K_y = 3,5 \dots 4,0$ ) і інгібувана ACUMER 1000 ( $D_{Ac} = 1,5$  мг-екв/дм<sup>3</sup>) (1); та ж вода ( $D_a = 20$  мг-екв/дм<sup>3</sup>;  $K_y = 3,5 \dots 4,0$ ;  $D_{Ac} = 1,5$  мг-екв/дм<sup>3</sup>) після підкислення сірчаною кислотою  $H_2SO_4$  з дозою підкислення ( $D_k = 1,5$  мг-екв/дм<sup>3</sup>) (2); вода (1) після додаткового упарення і підкислення ( $K_y = 5,5 \dots 6,0$ ;  $D_k = 2,5$  мг-екв/дм<sup>3</sup>) (3)*

**Результати.** У таблиці наведено значення коефіцієнта  $K_{адг}$  (ймовірності адгезії на поверхні розподіленої в об'ємі циркуляційної води дисперсної фази і на теплообмінній поверхні конденсатора) при різних характеристиках теплоносія. Значення  $K_{адг}$  отримані в припущенні незалежності коефіцієнта адгезії від матеріалу адгезиву.

З матеріалу таблиці випливає, що відношення ймовірності адгезії мікрочастинок на частинках дисперсної фази в об'ємі потоку (агрегація частинок) до ймовірності їх адгезійного поглинання теплообмінної поверхнею (поверхнева сорбція, накипоутворення) падає з  $51,08$  (в упареній до  $K_y = 3,5 \dots 4,0$  інгібуваній воді) до  $33,6$  (в упареній до  $K_y = 3,5 \dots 4,0$  інгібуваній і підкисленій воді) і до  $8,62$  (в упареній до  $K_y = 5,5 \dots 6,0$  інгібуваній і додатково підкисленій воді).

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що дозуюча кислота витрачається на збільшення карбонатної лужності, на розчинення дисперсної фази, яке супроводжується зростанням загальної жорсткості, на збільшення вмісту аніону  $SO_4^{2-}$  і на зменшення сумарної площі поверхні частинок.

Коефіцієнт  $K_{адг}$  при різних характеристиках циркуляційної води

Величина, що визначається	Розрахункові формули	Відповідність води характеристикам кривої (рис. 1)		
		1	2	3
Одинична труба конденсатора, $l=12$ м, $d_{вн}=1,6 \cdot 10^{-2}$ м				
Площа внутрішньої поверхні, м <sup>2</sup>	$S_{конд} = \pi d_{вн} l$ $S_{конд} = \pi d_{вн} l$	0,603		
Об'єм однієї труби, дм <sup>3</sup>	$V_{тр} = 0,25 \pi d_{вн}^2 l$	2,5		
Дисперсійна фаза				
Питома площа поверхні частинок, м <sup>2</sup> /дм <sup>3</sup>	$S = n \pi d_{рт}^2 10^{-12}$	12,3	8,1	5,2
Загальна площа поверхні частинок, м <sup>2</sup>	$S_{д.ф.} = S V_{тр}$	30,75	20,25	13
Ймовірності адгезії на поверхні				
Труби конденсатора	$K_{адг}^{конд} = S_{конд} (S_{конд} + S_{д.ф.})^{-1}$	0,0192	0,0289	0,1039
Дисперсійних частинок	$K_{адг}^{д.ф.} = S_{д.ф.} (S_{конд} + S_{д.ф.})^{-1}$	0,9808	0,9711	0,8961
Відношення ймовірностей адгезії	$\alpha = K_{адг}^{д.ф.} (K_{адг}^{конд})^{-1}$	51,08	33,6	8,62

**Висновки.** Отримані висновки підтверджуються матеріалами двох серій промислових випробувань, які проводилися в 2009 і 2010 рр. на РАЕС, відповідно до методики, запропонованої В. Кишневським. Методи дослідження застосовувалися стандартні для енергопідприємств. У 2009 р. після припинення підкислення з дозою  $D_k = 12 \dots 25$  мг/дм<sup>3</sup> спостерігалось зменшення загальної жорсткості  $J_0$  на 0,5 мг-екв/дм<sup>3</sup>, карбонатної жорсткості  $J_k$  на 0,08...0,1 мг-екв/дм<sup>3</sup> і зростання гідратної лужності  $L_r$  на 0,05 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Аналогічні результати отримані в серії промислових випробувань в 2010 р. Припинення підкислення додаткової води з дозою  $D_k = 12 \dots 25$  мг/дм<sup>3</sup> спричинило зменшення  $J_0$  на 0,1...0,2 мг-екв/дм<sup>3</sup> і  $J_k$  на 0,5...0,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>, зростання  $L_r$  на 0,02...0,04 мг-екв/дм<sup>3</sup> і зростання відповідного вмісту зважених речовин на 3...4 мг/дм<sup>3</sup>.

## Література

1. Кишневский, В.А. Отложение накипеобразователей в оборотных системах охлаждения / В.А. Кишневский, В.И. Ковальчук, А.В. Наумов // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2006. — Вип. 1(25). — С. 69 — 71.
2. Исследование дисперсного состава и характеристик твердофазных частиц в циркуляционной воде оборотных систем охлаждения / А.Б. Гуляенко, Е.В. Кишневский, О.М. Малиновский, В.Ф. Очков // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2010. — Вип. 1-2. — С. 70 — 75.
3. Чиченин, В.В. Кинетические этапы формирования шламовых частиц в известкованной воде / В.В. Чиченин, И.Л. Козлов, А.Б. Гуляенко // Вісн. Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури. — 2011. — Вип. 42. — С. 78 — 84.

## References

1. Kishnevsky, V.A., Kovalchuk, V.I. and Naumov, A.V. (2006). Scale deposit in circulation cooling systems. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 1, 69-71.
2. Gulyayenko, A.B., Kishnevsky, E.V., Maleenovsky, O.M. and Ochkov, V.F. (2010). Research of dispersion composition and characteristics of solid-phase particles in circulation water of the circulating systems of cooling. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 1-2, 70-75.
3. Chichenin, V.V., I.L. Kozlov and Gulyaenko, A.B. (2011). Kinetic phases of formation of slurry particles in lime-water. *Herald of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 42, 78-84.

Надійшла до редакції 25 травня 2015 р.