

РОЗРОБКА РЕАГЕНТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ВІД СОЛЕВІДКЛАДЕННЯ ТА КОРОЗІЇ

Шуриберко М. М., Гомеля М. Д., Шаблій Т. О., Чупрова К. А.

1. Вступ

На діючих підприємствах в процесах модернізації систем водокористування, зокрема, систем охолодження, досить часто переходять на використання інгібіторів корозії металів та накипоутворення. Проте, після тривалого періоду експлуатації даних систем повної заміни трубопроводів та апаратури не проводиться. Внутрішні поверхні теплообмінного обладнання та трубопроводи вкриті продуктами накипоутворення та корозії [1], які значно знижують ефективність теплопереносу та практично повністю нівелюють ефективність інгібіторів корозії та стабілізаторів накипоутворення.

Для забезпечення належної ефективності реагентів необхідно або збільшувати їх концентрації в десятки-сотні разів, або проводити попереднє очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів та теплообмінників від відкладень. Перший варіант є недоцільний як з екологічної, так і з економічної точки зору. В разі вдалого підбору композиції для очищення поверхонь трубопроводів від відкладень результат подальшого використання інгібіторів є економічно доцільним та тривалим.

Тому актуальними є дослідження в області захисту металевих конструкцій від корозії та накипоутверення. Зокрема, створення комплексних та недорогих інгібіторів корозії та осадковідкладень, які є ефективними в широкому температурному діапазоні та універсальними для різних видів металів та різних за хімічним складом розчинів.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – екологічно безпечні водоциркуляційні теплообмінні системи в енергетиці, промисловості та комунальних господарствах.

В промисловості та енергетиці приблизно 80 % води використовуються у водоциркуляційних системах охолодження. При відсутності попередньої обробки води для систем охолодження з метою підтримки сольового балансу в системі щодоби в гідросферу скидається від 8 до 30 % води. При цьому спостерігається фізичне (теплове) та хімічне (іонами міді і цинку, що вимиваються з мідних і латунних конденсаторів) забруднення водою.

З іншого боку, важливим питанням залишається захист металевих конструкцій від корозії у воді та водних розчинах. Висока корозійна агресивність середовищ призводить до значних витрат матеріалів, води та енергії.

Тому першочерговим завданням є створення ефективних способів кондиціонування води. Це дозволить перейти до замкнених систем охолодження, що, в свою чергу, забезпечить скорочення забору свіжої води для потреб промислових об'єктів та зменшення об'ємів промислових стічних вод [2].

Одним зі шляхів вирішення цього завдання є застосування в процесах водопідготовки інгібіторів корозії металів та стабілізаторів накипоутворення. Основними вимогами до сучасних композицій є їх висока ефективність, комплексність дії та нетоксичність [3]. Тобто інгібітори, які застосовуються в циркуляційних системах, повинні забезпечувати захист металів від корозії й одночасно зменшувати відкладення накипу на поверхні теплообмінного обладнання.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення ефективності композицій на основі неорганічних кислот в якості корозійноагресивних травильних розчинів для відновлення поверхонь металевих труб, а також композицій для перманентного використання в процесах кондиціонування води.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Оцінити корозійну агресивність композицій травильних розчинів для очищення металевих поверхонь масоетричним методом та методом поляризаційного опору.
2. Встановити залежності розчинності сульфату кальцію в кислих середовищах, які відрізняються хімічним складом та концентраціями.
3. Оцінити ефективність використання запропонованих композицій в якості стабілізаторів накипоутворення через визначення стабілізаційного та протинакипного ефектів водних розчинів різного складу.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В результаті тривалого використання теплообмінного обладнання на промислових об'єктах металеві поверхні трубопроводів, котлів тощо вкриваються шаром продуктів корозії та карбонатно-сульфатним накипним осадом [4, 5]. Самим простим та доступним способом відновлення поверхонь трубопроводів, теплообмінників, котлів є промивання їх кислими розчинами [6, 7].

Проте використання чистих кислот для промивки труб має ряд недоліків. Автори робіт [8, 9] підкреслюють небезпечність використання неорганічних кислот як травильних розчинів. Зокрема, застосування сірчаної кислоти [8] призводить до утворення нерозчинного сульфату кальцію, а соляної кислоти [9] через присутність хлоридів – до підвищення агресивності середовища.

Альтернативним варіантом є застосування органічних кислот. Відомо, що сульфамінова кислота (10 % розчин) є ефективним реагентом для очищення труб від продуктів корозії та накипу. Проте, цей розчин є корозійно агресивним по відношенню до сталі 20. Середній поляризаційний опір (Rp_{cp}) становить 70 Ом [10].

На сучасному етапі фосфонові кислоти є найбільш ефективними стабілізаторами накипоутворення [2, 11]. А їх цинкові солі є найбільш ефективними інгібіторами корозії металу [3, 11]. Проте, невирішеним питання залишається використання даних кислот в якості травильних розчинів.

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновок про те, що, не дивлячись на тривалий час використання водооборотних систем в промисловості [1], питання відновлення металевого обладнання залишається не до кінця вирішеним. Зокрема, існує дефіцит

ефективних і одночасно корозійно неагресивних травильних розчинів для очищення металевих поверхонь від осадів.

5. Методи дослідження

В проведених попередніх дослідженнях [10] було показано, що композиція тіокарбаміду та уротропіну виявляє синергічний ефект при захисті поверхні металу від корозії. Тому в роботі були використані композиції травильних розчинів на основі соляної, сірчаної, фосфорної кислот в присутності уротропіну або уротропіну з тіокарбамідом.

Оцінку корозії запропонованих композицій здійснювали двома способами: методом поляризаційного опору та масометричним методом.

Визначення поляризаційного опору проводили за допомогою індикатора поляризаційного опору P5126 (Україна) та двохелектродного датчика від корозійно-індикаторної установки УК-2 (Україна) з електродами із сталі 20, попередньо оброблених та зважених. Датчик встановлювали в ємність, об'ємом 150 см³, і через певні проміжки часу протягом двох годин за допомогою індикатора P5126 вимірювали поляризаційний опір R_p (Ом). Величина поляризаційного опору обернено-пропорційна швидкості корозії металу.

Масометричне визначення швидкості корозії визначали за різницею мас зразку, що кородує, в грамах до та після корозії. Тривалість дослідів становила 18–23 години.

Досліди проводили в нерухомих середовищах при температурі 15–20 °С у вільному контакті води з повітрям.

Масометричний показник корозії, г/(м²·год):

$$K_m = \frac{(m_1 - m_2)}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

де m_1 – первісна маса зразка, г;

m_2 – маса зразка після випробування, г;

S – площа зразка, м²;

τ – тривалість випробувань, год.

Глибинний показник корозії, мм/рік:

$$П = \frac{K_m \cdot 8,76}{d_{me}}, \quad (2)$$

де K_m – масометричний показник корозії, г/(м²·год):

d_{me} – густина металу, г/см³;

8,76 – коефіцієнт, розрахований з кількості годин на рік (8760), поділеного на 1000.

Оцінку ефективності розроблених композицій в якості стабілізаторів накипоутворення визначали за зміною жорсткості води при її нагріванні. Визначення стабілізаційного ефекту (СЕ) проводили у закритих ємностях при температурі 90–100 °С протягом 5 годин. Протинакипний ефект визначали при

температурі 40–60 °С у відкритих склянках при упарюванні води 37,5 % (коефіцієнт упарювання 1,6).

Стабілізаційний ефект, %:

$$CE = \left(1 - \frac{Ж_{поч} - Ж_{зал}}{Ж_{поч} - Ж_0} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

де $Ж_{поч}$, $Ж_{зал}$ – відповідно початкова та залишкова жорсткість води, мг-екв/дм³;
 $Ж_0$ – залишкова жорсткість води без застосування стабілізатора, мг-екв/дм³.

Протинакипний ефект, %:

$$PE = \frac{Ж_{зал}}{Ж_{поч}} \cdot 100. \quad (4)$$

Залишкову концентрацію кальцію в пробах визначали за допомогою трилонометрії з індикатором еріохромом чорним Т.

6. Результати дослідження

Досить поширеним сплавом, який застосовується в машинобудівній галузі протягом тривалого періоду, є сталь 20. Зокрема, її механічні властивості визначають широке поширення застосування цієї марки в котлобудуванні, виготовленні труб і нагрівальних елементів різного призначення. Тому всі дослідження в роботі проводили саме зі сталлю 20.

Як видно з приведених результатів (рис. 1), в статичних умовах поляризаційний опір водопровідної води м. Києва (Україна) незначний і складає 305–316 Ом. Розчини соляної, сірчаної, фосфорної кислот, у концентраціях 10 %, викликають суттєву корозію сталі 20. Поляризаційний опір даних розчинів складає відповідно 5,3; 8,4 та 15,1 Ом. Адсорбуючись на поверхні металу, дані аніони утворюють сполуки, які мають гарну розчинність. Це призводить до збільшення швидкості корозії сталі. Найбільш агресивними є хлорид-аніони, які здатні легко проникати через захисні поверхневі плівки металу.

Наявність у розчині уротропіну у концентрації 5 г/дм³ призводить до зростання поляризаційного опору, тобто до зростання захисного ефекту. Максимальний захисний ефект через дві години спостерігається:

- для суміші соляної кислоти та уротропіну у співвідношенні 100:5, і поляризаційний опір зростає до 164,5 Ом;
- для сірчаної кислоти з уротропіном (100:5) даний показник підвищується до 75,3 Ом;
- для суміші фосфорної кислоти та уротропіну (50:5) він досягає 94,5 Ом.

Проте, швидкість корозії в даних середовищах більша в порівнянні з водопровідною водою.

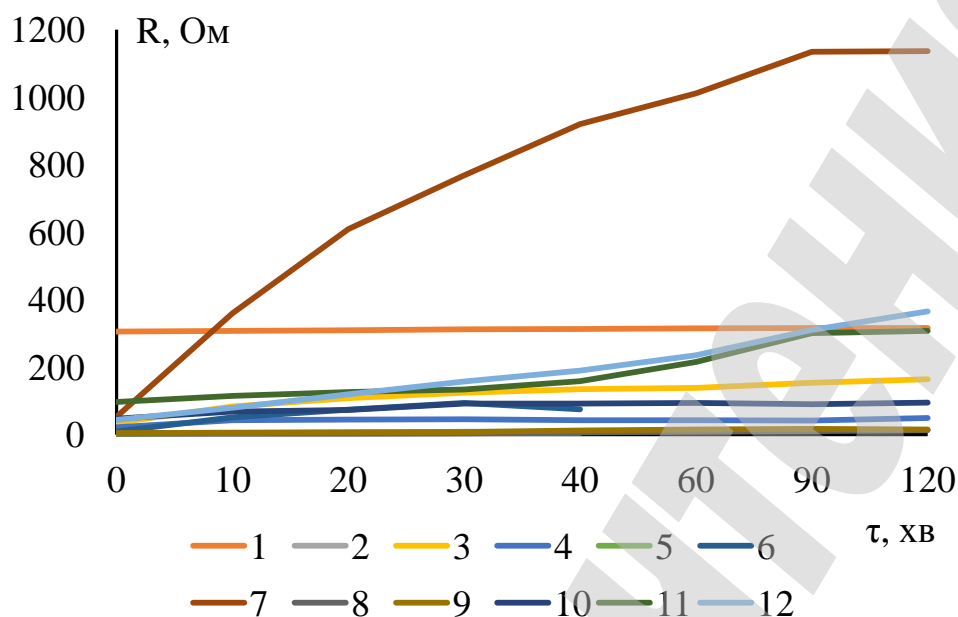


Рис. 1. Залежність поляризаційного опору від складу вихідного розчину в статичних умовах: 1 – водопровідна вода (м. Київ, Україна); 2 – HCl (100 г/дм³); 3 – HCl:уротропін (100:5); 4 – HCl:уротропін:тіокарбамід (100:5:1); 5 – H₂SO₄ (100 г/дм³); 6 – H₂SO₄:уротропін (100:5); 7 – H₂SO₄:уротропін:тіокарбамід (100:5:1); 8 – H₃PO₄ (50 г/дм³); 9 – H₃PO₄ (100 г/дм³); 10 – H₃PO₄:уротропін (50:5); 11 – H₃PO₄:уротропін:тіокарбамід (50:5:1); 12 – H₃PO₄:уротропін:тіокарбамід (100:5:1)

Результат додавання тіокарбаміду не є однозначним. Так, застосування його в суміші з соляною кислотою та уротропіном (100:5:1) спостерігається негативний ефект – поляризаційний опір знижується до 49,8 Ом. В присутності фосфорної кислоти за тих же умов даний показник досягає значень водопровідної води і становить 365 Ом. Вражаючий ефект спостерігається в разі застосування в суміші сірчаної кислоти: поляризаційний опір зростає до 1136 Ом.

Достовірність отриманих результатів підтверджується дослідями, проведеними масометричним методом (табл. 1).

Таблиця 1

Корозія сталі в розчинах кислот та кислотних композиціях

№	Розчин	Концентрація, г/дм ³	Показник корозії	
			масометричний, г/(м ² ·год)	глибинний, мм/рік, (масометричний метод/метод поляризаційного опору)
1	2	3	4	5
1	Водопровідна вода	–	0,014012	0,015618
2	HCl	50	2,903103	3,229766
3	HCl	100	5,192697	5,776991/10,63869

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
4	HCl уротропін	50 5	0,203566	0,226472
5	HCl уротропін	50 10	0,247372	0,275206
6	HCl уротропін	100 5	0,324675	0,361209/0,392655
7	HCl уротропін	100 10	0,373634	0,415676
8	H ₃ PO ₄	50	2,591353	2,882938/2,734004
9	H ₃ PO ₄	100	3,865855	4,300849/2,898746
10	H ₃ PO ₄ аміак	100 5	0,302843	0,336919
11	H ₃ PO ₄ аміак тіокарбамід	100 5 1	0,131168	0,145927
12	H ₃ PO ₄ аміак тіокарбамід	50 5 1	0,183512	0,204161
13	P-29	(pH=1,66)	0,106881	0,118907

Як видно з приведених у табл. 1 результатів, всі композиції мають більшу корозійну агресивність, ніж водопровідна вода, глибинний показник корозії якої складає 0,015618 мм/рік. Найменшою корозійною агресивністю серед розглянутих варіантів характеризується композиція P-29. Масометричний показник корозії даної композиції становить 0,106881 г/(м²·год), глибинний показник корозії відповідно – 0,118907 мм/рік. Суміш P-29, яка створена на основі ортофосфорної кислоти, застосовується в якості реагента для зняття продуктів накипоутворення – карбонатів та сульфатів кальцію. Його показник руйнування хімічно осадженого гіпсу складає не менше 90 %. Тому можна вважати, що композиція P-29 є ефективним корозійнонеагресивним реагентом для очищення обладнання систем водопостачання від солевідкладення та корозії.

На багатьох підприємствах досить гостро стоїть проблема накипоутворення на нагріваючих поверхнях теплообмінного обладнання. Разом з попередньою стабілізаційною обробкою води для водоциркуляційних систем болючим питанням залишається видалення накипу з поверхонь трубопроводів та обладнання. Особливого занепокоєння викликають осади сульфату кальцію, розчинність яких в кислотах значно менше в порівнянні з карбонатом кальцію, як це показано на прикладі ортофосфорної кислоти (табл. 2).

Так, в діапазоні концентрацій ортофосфорної кислоти 10–100 г/дм³, розчинність карбонату кальцію в 4,5 рази більша, ніж розчинність сульфату кальцію.

Таблиця 2

Розчинність карбонату та сульфату кальцію в ортофосфорній кислоті різної концентрації

Концентрація H_3PO_4 , г/дм ³	Розчинність, г/дм ³	
	CaCO_3	CaSO_4
10	10,3–10,9	5,9–6,4
20	20,4–20,8	6,5–6,9
30	31,4–32	7,2–7,7
50	43,1–43,6	10,4–10,9
100	49,8–50,3	11,4–11,9

Слід відмітити, що ортофосфорна кислота має значно меншу здатність до розчинення сульфату кальцію в порівнянні з іншими неорганічними та органічними кислотами і становить 11,4–11,9 г/дм³ для 10 % розчину (табл. 3).

Таблиця 3

Розчинність сульфату кальцію в різних середовищах

Реагент	Концентрація, г/дм ³	Розчинність CaSO_4 , г/дм ³
Водопровідна вода	–	1,76
H_3PO_4	30	7,2–7,7
	50	10,4–10,9
	100	11,4–11,9
HCl	30	24,5–24,9
	50	30,3–30,8
	100	36,2–36,7
Оксиетилендифосфонова кислота (ОЕДФК)	30	12,1–12,6
	50	13,4–13,9
	100	18,0–18,5
Нітрилтриметилфосфонова кислота (НТМФК)	30	9,3–9,8
	50	11,7–12,2
	100	17,7–18,2
Сульфамінова кислота	30	7,5–8,0
	50	10,2–10,7
	100	17,6–18,1
H_3PO_4 NH_4OH НТМФК	50 5 5	7,0–7,5

Найбільшу розчинність по сульфату кальцію має соляна кислота. Так, для соляної кислоти з концентрацією 30 г/дм³ даний показник складає 24,5–24,9 г/дм³. В більш концентрованому розчині (10 %) розчинність зростає до 36,2–36,7 г/дм³.

Розчинність сульфату кальцію в фосфонових кислотах в 2,0–2,5 рази менша, ніж в соляній кислоті. Для їх розчинів в концентраціях 10 % даний показник становить приблизно 18 г/дм³. Проте їх використання для відмивання обладнання є доцільним, так як дані сполуки є ефективними стабілізаторами накипоутворення та інгібіторами корозії металу [11].

Створення композицій на основі розглянутих кислот, наприклад, $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{OH} + \text{НТМФК}$, не завжди призводить до підвищення ефекту розчинення, як це спостерігається у випадку композиції Р-29. Хоча, як видно з рис. 2, існує певна кореляція між інтенсивністю (часом) розчинення і співвідношенням композиція:сульфат кальцію. Так, при збільшенні об'єму травильного розчину за умов однакової маси сульфату кальцію спостерігається скорочення часу розчинення останнього.

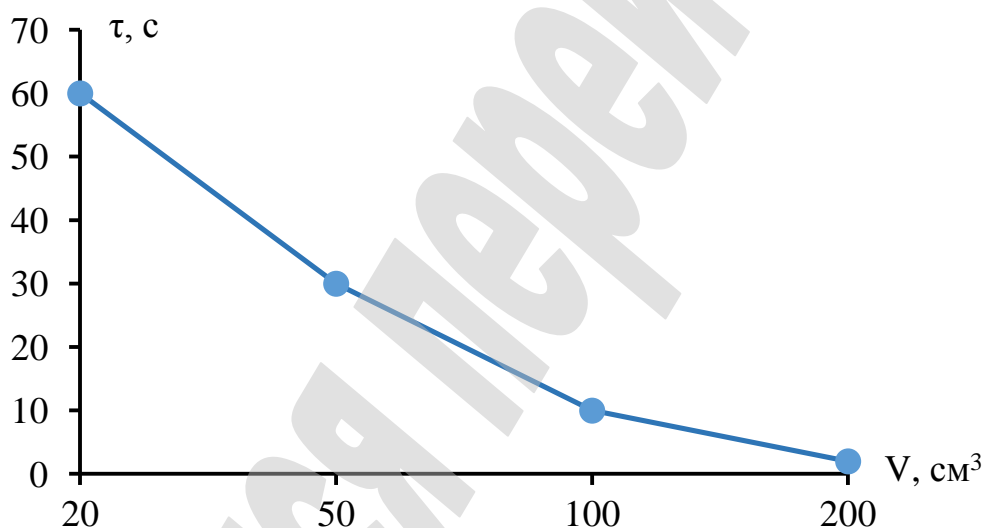


Рис. 2. Залежність інтенсивності розчинення сульфату кальцію від об'єму травильного розчину

Запорукою ефективного та тривалого використання нового та відновленого теплообмінного обладнання є постійне застосування інгібіторів корозії та накипоутворення. Метою сучасних розробок в області водокориставання є створення реагентів з високою ефективністю та комплексністю дії як в якості інгібіторів корозії металів, так і стабілізаторів накипоутворення.

Серед відомих інгібіторів самими ефективними є фосфонові та нітрилфосфонові кислоти. ОЕДФК та НТМФК є ефективним стабілізаторами накипоутворення [11]. Їх стабілізаційні ефекти для водопровідної води при 90 °С складають 69,9 % і 86,7 % відповідно. Але вони є дорогими і їх використання для крупних систем охолодження економічно не вигідне.

На основі даних кислот була розроблена нова композиція Р-33 – реагент для запобігання осадоутворення. Дана суміш показала чудові результати при таких же суворих умовах ($T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=5$ год), але в більш жорстких середовищах (табл. 4).

Таблиця 4

Залежність стабілізаційного та протинакипного ефектів від концентрації реагенту Р-33 та складу вихідного розчину

Концентрація Р-33, мг/дм ³	Жорсткість води, мг-екв/дм ³		Стабілізаційний ефект, %	Протинакипний ефект, %
	<i>Ж_{поч}</i>	<i>Ж_{зал}</i>		
дистильована вода, 73 г/дм ³ NaCl, 10 г/дм ³ MgSO ₄ , 10 г/дм ³ CaCl ₂ * **				
0	230	212	–	–
20		228	88,9	99,1
50		230	100	100
100		230	100	100
водопровідна вода, 73 г/дм ³ NaCl, 10 г/дм ³ MgSO ₄ , 10 г/дм ³ CaCl ₂				
0	284	254	–	–
20		282	93,3	99,3
50		284	100	100
100		284	100	100
водопровідна вода, 73 г/дм ³ NaCl, 20 г/дм ³ MgSO ₄ , 20 г/дм ³ CaCl ₂				
0	490	440	–	–
20		468	56	95,5
50		490	100	100
100		490	100	100
водопровідна вода, 100 г/дм ³ NaCl				
0	5,5	5,1	–	–
10		5,5	100	100
20		5,5	100	100
50		5,5	100	100

Примітка: * – масометричний показник корозії, Р-33 мг/дм³ – г/(м²·год): 0 – 0,148423; 2 – 0,097403; 5 – 0,104259; 10 – 0,097604;

** – глибинний показник корозії, Р-33 мг/дм³ – мм/рік: 0 – 0,165439; 2 – 0,108570; 5 – 0,116212; 10 – 0,108794

Навіть при таких високих вихідних жорсткостях води (230–490 мг-екв/дм³) реагент Р-33 в концентрації 20 мг/дм³ забезпечує стабілізаційний ефект на рівні 56,0–93,3 %, а протинакипний ефект – 95,5–99,3 %. З підвищенням концентрації реагенту до 50 % стабілізаційний та протинакипний ефекти сягають 100 % значення.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Розроблені композиції для очищення трубопроводів, поверхонь теплообмінного обладнання на основі доступних недорогих реагентів, які переважають аналоги за ефективністю, характеризуються низькою корозійною активністю та забезпечують видалення з поверхні металу навіть малорозчинних хімічно стійких речовин, включаючи відкладання гіпсу. В нейтральних середовищах основні компоненти реагенту Р-29 є інгібіторами солевідкладень та корозії. Створена композиція Р-33 переважає аналоги тим, що забезпечує стабілізацію щодо осадковідкладень у висококонцентрованих розчинах гіпсу в присутності карбонатів кальцію та магнію при високих температурах. Комплексне використання реагентів для очищення трубопроводів та

застосування стабілізаторів накипоутворення дозволить підвищити ефективність та надійність експлуатації обладнання в системах теплопостачання, в водоциркуляційних системах охолодження при захисті трубопроводів в газо- та нафтодобувній галузі.

Weaknesses. Застосування кислих розчинів для очищення трубопроводів передбачає дотримання ряду заходів із безпечного проведення технологічних операцій, використання спеціальної кислотостійкої тари, стійких до дії кислот дозуючих насосів та іншого обладнання. Відпрацьовані розчини необхідно обов'язково нейтралізувати та утилізувати згідно існуючих правил. При застосуванні інгібіторів осадковідкладень необхідно застосовувати високоточні дозуючі прилади.

Opportunities. В разі ефективного очищення металевих поверхонь теплообмінного обладнання з подальшим застосуванням інгібіторів корозії та осадковідкладень у водоциркуляційних системах можливо в 5–10 разів збільшити термін експлуатації теплообмінних агрегатів. Крім того, в системах охолодження можливо перейти на безстічний режим та відмовитись від скиду оборотних вод на продувку систем.

Threats. В разі кислотного очищення від відкладень поверхонь існує загроза їх недостатньо ефективної промивки від залишків кислих реагентів, що може вплинути на процеси корозії обладнання, коли реакція середовища у працюючих системах буде кислою. За нормальних умов експлуатації систем ця загроза нереальна. При застосуванні стабілізаторів осадковідкладень рівень жорсткості води у водоциркуляційних системах може зрости у кілька разів. Це сприяє зниженню корозійної активності води, але в разі неналежного контролю дозування інгібітора осадковідкладень можливе інтенсивне відкладення осаду на теплообмінних поверхнях. Можлива також загроза перевищення допустимих концентрацій реагентів при скиді води під час продувки системи.

8. Висновки

1. В результаті проведених експериментальних та розрахункових досліджень зроблено оцінку корозійної агресивності композицій травильних розчинів для очищення металевих поверхонь масометричним методом та методом поляризаційного опору. Показано, що всі композиції, створені на основі соляної, сірчаної, фосфорної кислот в присутності уротропіну або уротропіну з тіокарбамідом, мають більшу корозійну агресивність, ніж водопровідна вода. Найменшою корозійною агресивністю серед розглянутих варіантів характеризується композиція Р-29. Масометричний показник корозії даної композиції становить $0,106881 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, глибинний показник корозії відповідно – $0,118907 \text{ мм}/\text{рік}$. Суміш Р-29, яка створена на основі ортофосфорної кислоти, застосовується в якості реагента для зняття продуктів накипоутворення – карбонатів та сульфатів кальцію. Його показник руйнування хімічноосадженого гіпсу складає не менше 90 %. Тому можна вважати, що композиція Р-29 є ефективним корозійноагресивним реагентом для очищення обладнання систем водопостачання від солевідкладення та корозії.

2. Встановлено залежності розчинності гіпсу в кислих середовищах, які характеризуються різними хімічними складами та концентраціями. Доведено, що розчинність карбонату кальцію і сульфату кальцію суттєво відрізняються. При вихідних концентраціях ортофосфорної кислоти 10–100 г/дм³, розчинність карбонату кальцію в 4,5 рази більша, ніж розчинність сульфату кальцію. Якщо порівнювати ефективність розчинення гіпсу різними кислотами, то найбільшу розчинність по сульфату кальцію серед розглянутих кислот має соляна кислота. Для соляної кислоти з концентрацією 30 г/дм³ даний показник складає 24,5–24,9 г/дм³. В більш концентрованому розчині (10 %) розчинність зростає до 36,2–36,7 г/дм³. Незважаючи на меншу розчинність сульфату кальцію в фосфонових кислотах (2,0–2,5 рази) в порівнянні з соляною кислотою, їх використання для відмивання обладнання є доцільним, так як дані сполуки є ефективними стабілізаторами накипоутворення та інгібіторами корозії металу. Існує певна кореляція між інтенсивністю (часом) розчинення і співвідношенням композиція:сульфат кальцію: при збільшенні об'єму травильного розчину за умов однакової маси сульфату кальцію спостерігається скорочення часу розчинення останнього.

3. Зроблено оцінку ефективності використання розробленої композиції Р-33 в якості стабілізаторів накипоутворення. Дана суміш показала чудові результати в суворих умовах (жорсткість води 230–490 мг-екв/дм³, $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=5$ год). Реагент Р-33 в концентрації 20 мг/дм³ забезпечує стабілізаційний ефект на рівні 56,0–93,3 %, а протинакипний ефект – 95,5–99,3 %. З підвищенням концентрації реагенту до 50 % стабілізаційний та протинакипний ефекти сягають 100 % значення.

Література

1. An overview of problems and solutions for components subjected to fireside of boilers / Singh A. et. al. // *International Journal of Industrial Chemistry*. 2017. Vol. 9, Issue 1. P. 1–15. doi: <http://doi.org/10.1007/s40090-017-0133-0>
2. Vitkovskiy V. S., Hlamazdin P. M., Naba K. O. Perspektivy rozvytku novykh metodiv pidhotovky vody dlia system tsentralizovanoho teplopostachannia // *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. 2016. Issue 27. P. 55–62.
3. New corrosion inhibition approach under high corrosive condition in cooling water systems / Kuribara T. et. al. // *NACE – International Corrosion Conference Series: Collaborate. Educate. Innovate. Mitigate*. Dallas, 2015. 12 p.
4. Paher S. M., Herasymenko Yu. S. Modyfikatsiia karbonatno-nakypnykh osadiv dlia zakhystu vid korozii teploobminnoi poverkhni // *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 2013. Issue 13. P. 54–65.
5. Corrosion failure analysis and anticorrosion measures for a tube bundle in a packing-type evaporative air cooler / Guo E. et. al. // *Harbin Gogcheng Daxue Xuebao/Journal of Harbin Engineering University*. 2016. Vol. 37, Issue 5. P. 743–746. doi: <http://doi.org/10.11990/jheu.201507034>
6. Sharma P., Roy H. Mill Scale Corrosion and Prevention in Carbon Steel Heat Exchanger // *High Temperature Materials and Processes*. 2015. Vol. 34, Issue 6. P. 571–576. doi: <http://doi.org/10.1515/htmp-2014-0115>

7. Corrosion inhibition of N80 steel simulated in an oil field acidification environment / Du J. et. al. // International Journal of Electrochemical Science. 2018. Vol. 13, Issue 6. P. 5810–5823. doi: <http://doi.org/10.20964/2018.06.69>

8. Deyab M. A. Corrosion inhibition of heat exchanger tubing material (titanium) in MSF desalination plants in acid cleaning solution using aromatic nitro compounds // Desalination. 2018. Vol. 439. P. 73–79. doi: <http://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.005>

9. Synthesis, surface properties and inhibition behavior of novel cationic gemini surfactant for corrosion of carbon steel tubes in acidic solution / Hegazy M. A. et. al. // Journal of Molecular Liquids. 2015. Vol. 211. P. 126–134. doi: <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.06.051>

10. Nosachova Yu. V. Stvorennia novykh zasobiv i tekhnolohii dlia zabezpechennia resursozberezhennia u promyslovomu vodospozhyvanni: PhD thesis. Kyiv: Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichniy instytut», 2006. 166 p.

11. New inhibitors of corrosion and depositions of sediments for water circulation systems / Gomelya N. D. et. al. // Journal of Water Chemistry and Technology. 2017. Vol. 39, Issue 2. P. 92–96. doi: <http://doi.org/10.3103/s1063455x17020060>