

ЗАСТОСУВАННЯ КОРОЗИМЕТРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ РЕАГЕНТНОЇ ВОДОПІДГОТОВКИ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

Г. С. ВАСИЛЬЄВ, Ю. С. ГЕРАСИМЕНКО

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Реагентний метод водопідготовки з використанням приладів корозійного контролю випробувано на районній котельні міста Києва. На прямому та зворотному трубопроводах тепломережі та на лінії підживлення встановлено давачі швидкості корозії. Визначено протинакипну ефективність реагенту вимірюванням зміни твердості води до та після нагрівального обладнання. Результати корозійного моніторингу показали, що швидкість корозії в тепломережі підтримується на рівні 0,1 mm/year, а на лінії підживлення внаслідок реагентної обробки вона знизилася до 0,03 mm/year у недеаерованій воді. Розрахунок економічної ефективності показав, що реагентний спосіб підготовки води для теплових мереж на 13% дешевший від традиційного підходу і може слугувати альтернативою традиційному, особливо в умовах енергозбереження.

Ключові слова: маловуглецева сталь, поляризаційний опір, корозиметр, теплова мережа, внутрішня корозія, накип.

Testing of the reagent method of water treatment with the use of corrosion control devices was carried out at the district boiler house of Kyiv city. To control the corrosion rate, corrosion rate probes were installed on the forward and reverse pipelines of the heating network, and on the supply line. The anti-scale efficiency of the reagent was determined by measuring the change in the hardness of water before and after the heating equipment. The results of corrosion monitoring showed that the corrosion rate in the heating network is maintained at 0.1 mm/year. The corrosion rate on the feed line due to reagent water treatment was reduced to 0.03 mm/year in non-deaerated water. The calculation of economic efficiency has shown that the reagent method of water treatment for heating networks is 13% cheaper than traditional approach and can serve as an alternative to traditional, especially regarding energy conservation.

Keywords: mild steel, polarization resistance, corrometer, heating network, internal corrosion, scaling.

Вступ. Щоб забезпечити надійну та ефективну роботу теплових мереж, традиційно застосовують методи хімічного очищення та деаерування підживлювальної води. Така вода у системі не утворює осадів на поверхнях нагріву та не викликає внутрішньої корозії сталевих трубопроводів. Проте внаслідок зниження температури теплоносія, понаднормові об'єми підживлення та потрапляння "сирої" води в систему через несправні теплообмінні апарати систем гарячого водопостачання виникає ризик розвитку внутрішньої корозії трубопроводів та накипоутворення в котлах.

Альтернативою традиційним методам водопідготовки може бути реагентний підхід [1]. Його суть полягає у тому, що солі твердості та розчинені гази не вилучають з води, а у воду додають реагенти, які запобігають осадженню накипу та розвитку корозії. В промисловій водопідготовці набули поширення синтетичні інгібітори на основі фосфатів, молібдатів, поліфосфатів тощо [2, 3]. В останні роки

використання цих хімічних сполук як інгібіторів обмежено санітарними та екологічними нормами. Через це багато досліджень спрямовано на отримання нових екологічно безпечних інгібувальних рецептур, названих “зелені інгібітори” [4, 5]. Особливістю “зелених” реагентів є можливість їх отримання без будь-якого шкідливого хімічного синтезу [6–9]. Одним із джерел сировини є відходи переробки рослинних культур у сільському господарстві та харчовій промисловості [10, 11].

Застосування реагентного методу водопідготовки вимагає корозійного контролю в режимі реального часу. Відома низка корозиметрів, розроблених різними фірмами на основі методу поляризаційного опору. Всі засоби корозійного моніторингу можна розділити на портативні та стаціонарні прилади. Портативні – поширеніші, оскільки дешевші та дають змогу обслуговувати декілька точок збору даних. Серед них слід виділити прилади західних фірм “Cormon”, Англія [12], “Metal samples”, США [13], а серед вітчизняних – прилад УИСК, розроблений Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України [14].

Мета роботи – встановити протикорозійну та протинакипну ефективність реагентної технології обробки теплоносія на квартальній котельній міста Києва засобом протинакипним протикорозійним “ЛВХ-1.1В” (ТОВ “Лабораторія водної хімії”, Черкаси) із використанням індикаторів швидкості корозії ІК-4с та давачів корозії ДК-2.

Методика досліджень. Дозування реагенту. Для введення реагенту пропорційно об’єму підживлення змонтували вузол його дозування (рис. 1). Трубопровід сирій води з’єднали з трубопроводом хімічно очищеної води. У з’єднувальному трубопроводі встановили турбінний фланцевий лічильник Ду50 (Apator PoWoGaz) з імпульсним виходом. Витрати пом’якшеної води фіксували стаціонарним лічильником, розташованим у котельній, а сирій води, яку обробляли реагентом, – встановленим імпульсним лічильником. Пропорцію “підмісу” вираховували за показниками обох лічильників і регулювали за допомогою засувок.

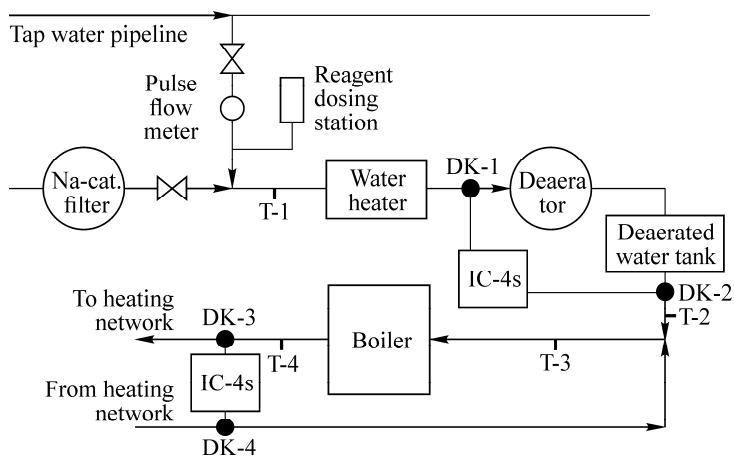


Рис. 1. Схема розміщення обладнання. Т-1...4 – точки відбору проб; ДК-1...4 – давачі корозії до та після деаератора, перед та після котла, відповідно.

Fig. 1. The scheme of equipment placement. T-1...4 – probe points, ДК-1...4 – corrosion sensor before and after deaerator, before and after boiler, respectively.

Дозували реагент в автоматичному режимі пропорційно проходженню сирій води станцією дозування за допомогою насоса-дозатора ТЕКНА АРГ 603. Доза реагенту становила 7,5 ml/pulse, що відповідає 75 ml на 1 m³ води. Вона рекомендована розробником реагенту на основі показників складу підживлювальної води.

Реагент дозували у лінію підживлення після натрій-катіонітових фільтрів. Засувками регулювали співвідношення хімічно очищеної та обробленої реагентом води. В трубопроводі підживлення після змішування вод встановлений пробовідбірник для аналізу складу води, яку подавали на деаерацію. Після деаератора вода із трубопроводу підживлення змішується із водою зворотного трубопроводу та подається в котел. Перед входом у котел встановлений додатковий пробовідбірник для контролю твердості води перед нагріванням.

Щоб мінімізувати можливі ризики переведення роботи обладнання з хімічно пом'якшеної води на водопровідну, оброблену реагентом, заміщували поступово трьома етапами: 50 на 50%; 30 на 70%; 100% сирі води, обробленої реагентом. За перший місяць насичували систему активними речовинами. Оскільки були планові та позапланові зупинки котельної, під час поновлення роботи виконували так зване “залпове” дозування реагенту, після чого насос-дозатор налаштували на автоматичне дозування.

Контролювали ефективність реагенту за показниками якості води. Крім наявних точок відбору проб (трубопроводу підживлення, прямий, зворотний), обладнали два додаткових місця (перед деаератором та безпосередньо перед входом у котел). Проби води відбирали кожні два дні та передавали до сертифікованої лабораторії ТОВ “НВП “ЛВХ” (Черкаси). Аналізували воду за показниками загальної твердості та заліза. Розміщення обладнання, засобів корозійного контролю та точок відбору проб показано на схемі (рис. 1).

Контроль накипоутворення. Контролювали накипоутворення за реагентного способу водопідготовки за допомогою хімічного аналізу води на вміст солей твердості. Суть підходу така. Вода, яку подають для нагрівання (точка відбору перед котлом), містить концентрацію солей твердості (загальна твердість) T_1 , а яку вже нагріли (точка відбору після котла), – T_2 . Якщо $T_1 < T_2$, то вимиваються раніше осаджені солі твердості з внутрішньої поверхні апарата; якщо $T_1 = T_2$, то солі твердості на внутрішній поверхні апарата не осаджуються; якщо $T_1 > T_2$, то в апараті відбувається осадження солей твердості з води.

Такий підхід дає змогу безперервно слідкувати за станом поверхні нагріву і вживати заходи зі зменшення накипоутворення до досягнення граничного перепаду тиску. Відбирали та аналізували проби води на двох апаратах – деаераторі та котлі. Відсутність перепаду твердості впродовж двох тижнів за певного співвідношення хімічно очищеної та сирі води, обробленої реагентом, є підставою для збільшення рівня сирі води, обробленої реагентом. Заміщували воду за програмою, наведеною у таблиці.

Програма заміщення хімічно очищеної води на оброблену реагентом для підживлення теплової мережі

Вода	Період		
	09.06.20–18.07.20	20.07.20–03.08.20	05.07.20–02.10.20
Хімічно очищена, %	50	30	0
Оброблена реагентом, %	50	70	100

Корозійний моніторинг. Для корозійного моніторингу в режимі реального часу використовують електрохімічний метод визначення швидкості корозії за поляризаційним опором металу. Цей метод набув розвитку завдяки роботам фахівців КПІ ім. Ігоря Сікорського та реалізований в обладнанні корозійного контролю [15], який використано під час випроб. Двохелектродний давач корозії ДК-2 – первинний перетворювач системи корозійного моніторингу, який монтується безпосередньо в трубопровід. Спеціальна конструкція давача дає змогу йо-

го вилучати без зупинки тепломережі. Його чутливими елементами є електроди, виготовлені із вуглецевої сталі Ст20.

Стационарний корозиметр ІК-4с з модулем дистанційної передачі результатів вимірювання, який призначений для автоматичного корозійного моніторингу, працює в комплекті з двома датчиками корозії ДК-2. Розташований у захисній шафі котельної, підключається до електричної мережі.

Всього для випробувань залучили чотири датчики та два корозиметри. Датчики корозії ДК-2 встановили на лінії подачі та зворотній мережі для контролю швидкості корозії, до і після деаератора для контролю корозії на лінії підживлення. Результати визначення миттєвої швидкості корозії (mm/year) через модуль дистанційної передачі одразу записували на сервер, звідки дистанційно зчитували через мережу інтернет.

Результати досліджень та їх обговорення. Протинакинна ефективність реагентної обробки. Твердість на лінії підживлення зростає пропорційно співвідношенню хімічно очищеної та обробленої реагентом води. Коли співвідношення вод на рівні 50%, твердість на лінії підживлення становить 2...3 mmol/l. Зростання вмісту водопровідної води, обробленої реагентом, призводить до підвищення твердості до 3,5...4,5 mmol/l. Твердість води у мережі має тенденцію до монотонного зростання через суттєвий її об'єм, тому вода заміщується поступово. В кінці випробувань твердість на лінії підживлення стабілізується на рівні 4,5 mmol/l (вихідна твердість сирі води) і в мережі також досягає цього значення.

Розрахований перепад твердості наведений на рис. 2. Зниження твердості на нагрівальному обладнанні практично не фіксують. Впродовж усього терміну випробувань перепад значень дорівнює нулю, що свідчить про стабілізацію солей твердості у розчиненому вигляді компонентами реагенту. Періодично спостерігаємо зростання вмісту солей твердості після нагрівального обладнання внаслідок вимивання осадів. Також зростає показник перепаду під час зупинки дозувального обладнання, коли система живиться хімічно очищеною водою. Аналіз твердості на нагрівальному обладнанні показує, що реагент утримує солі твердості у розчиненому вигляді до концентрації 4,5 mmol/l, перешкоджаючи їх осіданню на поверхнях нагріву.

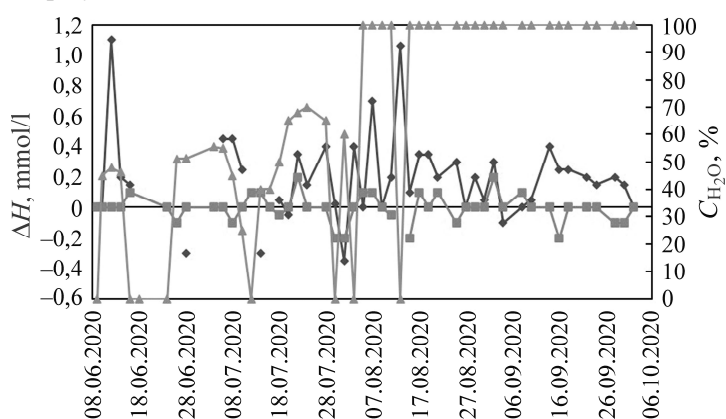


Рис. 2. Перепад твердості на нагрівальному обладнанні:
 ◆ – перед деаератором; ■ – перед бойлером; ▲ – вміст сирі води.

Fig. 2. Hardness drop on heat-exchanging equipment:
 ◆ – before deaerator; ■ – before boiler; ▲ – tap water content.

Дозування реагенту дає змогу відмовитись від пом'якшення мережної води і система заповнюється водою із твердістю 4,5 mmol/l. Коли в мережі пом'якшена вода, контроль твердості дозволяє виявляти несправні водопідігрівачі систем

гарячого водопостачання. Перехід на реагентний спосіб водопідготовки потребує впровадження і нових рішень. Шукали несправні підігрівачі, щоб запобігти потраплянню сирій води, яка містить кисень та солі твердості, у теплову мережу. За дозування реагенту кисень і солі твердості не є проблемою, оскільки реагент знижує корозію та запобігає осіданню накипу.

Для контролю стабілізації солей твердості у воді робили вирізки екранних труб з котла та їх обстежували. Аналізували вирізки труби у лабораторії хімічної служби. В протоколі вказано, що осади світло-коричневого кольору, пухкі, бугристі, легко знімаються, на поверхні незначна кількість окремих точкових виразок. За кількістю осадів котел придатний для подальшої експлуатації.

Вимивання залізоокисних осадів у тепловій мережі. На початку випробувань вміст заліза в мережі становив 2 mg/l (рис. 3). Від початку дозування реагенту показник заліза поступово зростає і досягає максимального значення 5...5,5 mg/l через вплив реагенту на вимивання раніше утворених осадів продуктів корозії. Високий вміст заліза у воді призводить до зниження її прозорості. Так, прозорість знижується до 2...4 cm за нормативного значення 30 cm.

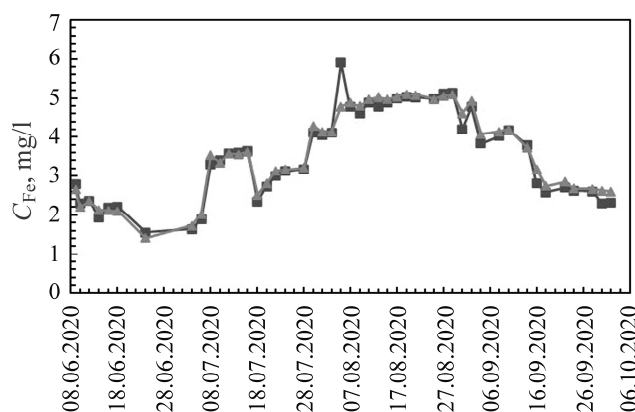


Рис. 3. Вміст заліза у мережі: ■ – прямий трубопровід; ▲ – зворотний.

Fig. 3. Iron content in a heating network: ■ – direct pipeline; ▲ – reverse.

Залізо накопичується в системі через те, що реагент розчиняє раніше утворені осади без можливості їх видалення. Однією із властивостей реагенту є розчинення та вимивання багаторічних залізоокисних осадів з внутрішньої поверхні теплових мереж та котельного обладнання. Це призводить до понаднормового зростання заліза в тепловій мережі та зниження прозорості. Для зменшення його вмісту спочатку знизили дозування реагенту (зменшенням дози) з 27.08.20 по 18.09.20. У цей період фіксують зниження вмісту заліза з 5 до 4 mg/l.

Позбутись накопичених у системі дрібнодисперсних сполук заліза можливо, виконуючи регулярні продувки котельного обладнання. Режимною картою котельні не передбачено таких продувок на регулярній основі, що призвело до сильного забруднення води. Враховуючи необхідність очищення води теплової мережі від зважених частинок заліза, а також для приведення показника прозорості до нормативного, розробили рекомендації і налагодили продувки з 11.09.20. Це знизило вміст заліза з 4 до 3 mg/l.

Таким чином, дозування реагенту пов'язане із утворенням шламу, який складається із диспергованих оксидів та гідроксидів заліза. Ці сполуки знаходяться у зваженому стані, знижують якість мережної води. Для їх видалення потрібно продувати котли одночасно з початком дозування реагенту.

Промивання системи – це тривалий процес, оскільки у ній міститься значна кількість раніше сформованих осадів продуктів корозії труб та карбонатів. Коли починається дозування реагенту, осаді поступово розчиняються. Частково осаді переходять у повністю розчинний стан, а частково – у дисперсний, коли частинки шламу рухаються з потоком рідини. При цьому зростає вміст заліза у воді, вона стає каламутною, з'являється характерний колір, знижується прозорість. У випробуванні показник заліза досягає 5 mg/l, а прозорість 3 см. Осаді не можуть знову осісти, оскільки реагент підтримує їх у розчиненому стані і їх необхідно видаляти зі системи. Це можливо завдяки встановленню додаткового обладнання на зворотних лініях – шламовідокремлювачів. Простіше регулярно продувати котельне обладнання. Під час цього частина шламу, накопичена в трубках котла, видаляється зі системи. Критерієм промивання є нормалізація показників вмісту заліза та прозорості. Коли прозорість води та вміст заліза повертаються на рівень, який був до початку процесу, і знаходяться на ньому незалежно від дозування реагенту, систему можна вважати очищеною від осадів. Промивання системи, залежно від її вихідного стану та встановленої дози реагенту, може займати від декількох місяців до 1...2 років. Звичайно, для цього потрібні додаткові витрати на воду, водопідготовку та персонал. Але це не постійний захід, а додаткові роботи з переведення системи на новий спосіб водопідготовки.

Протикорозійна ефективність реагенту. Оцінювали протикорозійну ефективність реагенту за показниками миттєвої швидкості корозії, визначеної методом поляризаційного опору за допомогою індикатора корозії ІК-4с. Криві зміни швидкості корозії в часі впродовж січня–травня наведено на рис. 4. За роботи деаератора під час опалювального сезону швидкість корозії тримається на рівні 0,05 mm/year. Після закінчення опалювального сезону (квітень 2020 р.) температура теплоносія знижується, що призводить до неповного деаерування води та деякого зростання швидкості корозії на подачі (до 0,1 mm/year) і поступового її збільшення на зворотній лінії. Зупинка котельні на гідравлічні випробування призвела до подальшого пришвидшення корозії.

Швидкість корозії під час дозування реагенту в літній період знаходиться на рівні 0,1...0,15 mm/year. У серпні вона починає зростати. Пришвидшення корозії узгоджується в часі зі зростанням вмісту заліза у воді, оскільки розчинні сполуки заліза осідають на електродах давача корозії [16]. Після того як налагодили продувки котлів та вміст заліза почав знижуватись, 22.09.20 замінили електроди давачів корозії і корозиметрами зафіксували зниження її швидкості (рис. 4).

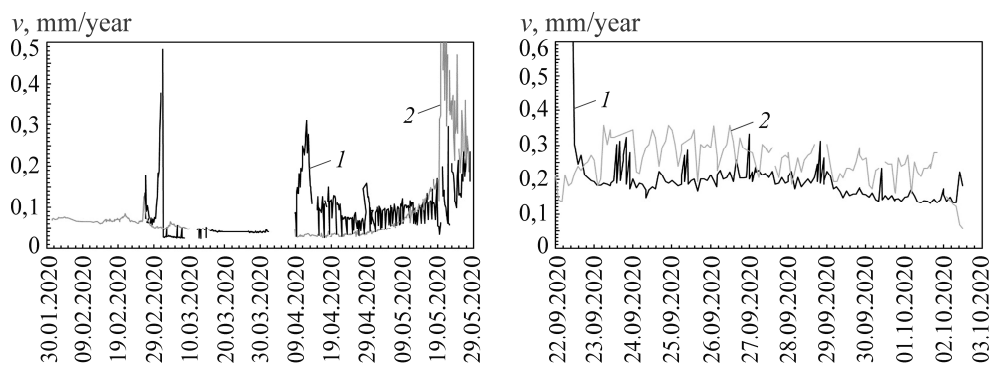


Рис. 4. Миттєва швидкість корозії в мережі: 1 – прямий трубопровід; 2 – зворотний.

Fig. 4. Instantaneous corrosion rate in a heating network: 1 – direct pipeline; 2 – reverse.

Швидкість корозії контролювали також на лінії підживлення (рис. 5). У літній період після деаератора вона знаходилась на рівні 0,1 mm/year і нижче. На

відміну від цього, швидкість корозії до деаератора була дуже високою – 0,4... 0,6 mm/year, а іноді навіть 0,9 mm/year. Така висока швидкість корозії не характерна для міської води Києва, тому виконали ревізію давачів корозії. В результаті огляду встановили, що на поверхні електродів є шар металічної міді, яка потрапляє у воду внаслідок корозії латунних трубок водопідігрівачів на лінії водопідготовки. Електроди очистили від осадів і повернули в трубопровід. Оскільки реагент “ЛВХ-1.1В” має поліметалічні протикорозійні властивості, з часом швидкість корозії латунних трубок знизилась, а відповідно і швидкість корозії на давачі.

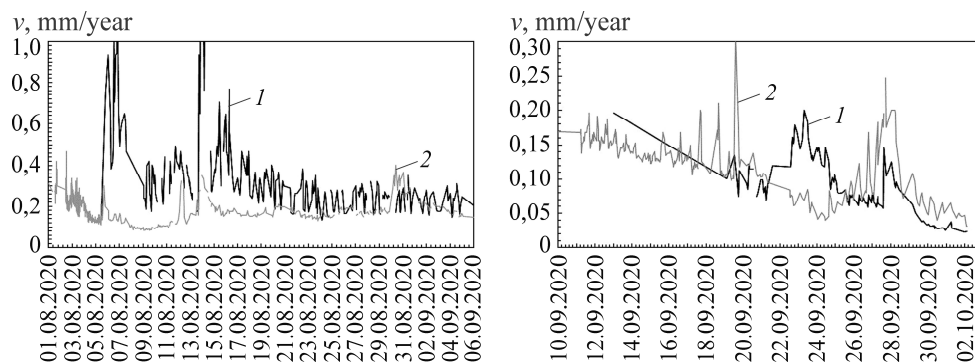


Рис. 5. Миттєві значення швидкості корозії на лінії підживлення:
1 – перед деаератором; 2 – після деаератора.

Fig. 5. Instantaneous corrosion rate in a supply pipeline:
1 – before deaerator; 2 – after deaerator.

Після 20.09.20 внаслідок дозування реагенту ЛВХ на лінії підживлення швидкість корозії до деаератора знизилась до значень, нижчих, ніж після деаератора – 0,03 mm/year. Це свідчить про те, що протикорозійний вплив реагенту не поступається за ефективністю деаеруванню води для зниження швидкості корозії.

Реагентний спосіб водопідготовки разом із приладами неперервного корозійного контролю – це новий комплексний підхід до експлуатації теплових мереж. Економічний ефект за переходу до реагентного способу водопідготовки складно визначити за час випробувань, оскільки реагент впливає на велику кількість параметрів, а деякі потребують аналізу масиву даних за тривалий період експлуатації котельної. За час випробувань вдалося встановити, що вартість реагентної водопідготовки нижча на 13% за традиційну. Економія на водопідготовці в тому, що можна не пом’якшувати воду, не потрібно ремонтувати йонообмінні фільтри, замінювати або відновлювати йонообмінні смоли.

ВИСНОВКИ

Визначили протикорозійну та протинакипну ефективність реагентної технології обробки теплоносія засобом протинакипним протикорозійним “ЛВХ-1.1В” під час дослідно-експлуатаційних випробувань на районній котельні м. Києва. Цей засіб показав високу ефективність. За результатами аналізу води до та після нагрівального обладнання відсутнє зменшення вмісту солей твердості, що говорить про їх повну стабілізацію у розчиненому вигляді компонентами реагенту, аж до твердості 4,5 mmol/l. Досягнуто зниження швидкості корозії у недеаерованій воді до 0,03 mm/year. Це дозволяє виконувати лише реагентну підготовку теплоносія перед його введенням в теплову мережу. Собівартість підготовки 1 m³ води знижується на 13%. Обладнання корозійного моніторингу на основі електрохімічного методу (стаціонарний індикатор корозії ІК-4с з давачами ДК-2) дає змогу визначати швидкість корозії трубопроводу в режимі реального часу. Завдяки дистанційній передачі результатів налагодили контроль за її швидкістю з віддаленого робочого місця. Конструкція давача дозволяє оперативно здійснювати

його ревізії або заміну електродів без зупинки системи. Дозування реагенту в теплову мережу призводить до розчинення та переведення у дисперсний стан осадів продуктів корозії та солей твердості. Для вилучення шламу зі системи рекомендуємо продувати котли одночасно з реагентною обробкою теплоносія. Контролювати якість води слід за показниками вмісту заліза та прозорості. Після промивання системи можливий перехід на лише реагентний спосіб водопідготовки. Критеріями промивання системи є вміст заліза та прозорість на рівні підживлювальної води. Застосування обладнання корозійного моніторингу за допомогою корозиметра ІК-4с дає змогу виявляти локальні пошкодження в системі водопідготовки, зокрема корозійне руйнування латунних водопідігрівачів. В результаті корозії латунних трубок у воду потрапляють йони міді, що призводить до зростання швидкості корозії, а застосування реагенту дає змогу зупинити їх корозію.

1. Васильєв Г. С., Потапенко О. В., Олійник В. В. Застосування фосфоровмісного інгібітору для захисту від корозії котельного обладнання в системах з контактними водонагрівачами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – Спец. вип. № 11. – С. 243–249.
2. Saremi M., Dehghanian C., and Sabet M. M. The effect of molybdate concentration and hydrodynamic effect on mild steel corrosion inhibition in simulated cooling water // Corros. Sci. – 2006. – **48**, № 6. – P. 1404–1412.
3. Sabet Bokati K., Dehghanian C., and Yari S. Corrosion inhibition of copper, mild steel and galvanically coupled copper-mild steel in artificial sea water in presence of 1H-benzotriazole, sodium molybdate and sodium phosphate // Corros. Sci. – 2017. – **126**. – P. 272–285.
4. Modelling of delay effect of calcium carbonate deposition kinetics on rotating disk electrode in the presence of green inhibitor / Z. Belarbi, B. Sotta, L. Makhloufi, B. Tribollet, and J. Gamby // Electrochimica Acta. – 2016. – **189**. – P. 118–127.
5. Mohammadi Z. and Rahsepar M. The use of green Bistorta Officinalis extract for effective inhibition of corrosion and scale formation problems in cooling water system // J. of Alloys and Compounds. – 2019. – № 770. – P. 669–678.
6. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article / M. Chaussemier, E. Pourmohtasham, D. Geluset, and N. Pécoul // Desalination. – 2015. – **356**. – P. 47–55.
7. Hasson D., Shemer H., and Sher A. State of the art of friendly “green” scale control inhibitors: a review article // Industrial & Eng. Chemistry Research. – 2011. – № 50. – P. 7601–7607.
8. Scale formation and control in oil and gas fields: A review / J. Li, M. Tang, Z. Ye, L. Chen, and Yu. Zhou // J. of Dispersion Sci. and Technol. – 2017. – № 38. – P. 661–670.
9. Menzri R., Ghizellaoui S., and Tlili M. Calcium carbonate inhibition by green inhibitors: thiamine and pyridoxine // Desalination. – 2017. – № 404. – P. 147–154.
10. Self-assembled monoterpene phenol as vapor phase atmospheric corrosion inhibitor of carbon steel / V. Vorobyova, O. Chygyrynets, M. Skiba, I. Kurmakova, and O. Bondar // Int. J. Corros. Scale Inhib. – 2017. – **6**, № 4. – P. 485–503.
11. Investigation of the efficiency of inhibitors of atmospheric corrosion / O. E. Chygyrynets, V. I. Vorobyova, G. Yu. Galchenko, and I. G. Roslik // Metall. Min. Ind. – 2012. – **4**, № 2. – P. 100–106.
12. Cormon Data Transmitters and Receivers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.teledyneoilandgas.com/_document/TDY_317_DataTransmitter_IFS344988_RevB_1
13. MS1000 Corrosion Meter [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.alspi.com/manuals/ms1000manual.pdf>
14. Polyakov S. G. and Kotlov Yu. G. Using corrosion meters of polarization resistance in laboratory and industrial practice // Soviet Materials Science. – 1989. – **24**, № 5. – P. 528–529.
15. Vasylyev H. and Herasymenko Yu. Corrosion meters of new generation based on the improved method of polarization resistance // Materials Science. – 2017. – **52**, № 5. – P. 722–731.
16. Vasylyev G. Polarization resistance measurement in tap water: the influence of rust electrochemical activity // J. of Mater. Eng. and Performance. – 2017. – **26**, № 8. – P. 3939–3945.

Одержано 14.11.2022