

Воденнікова Оксана Сергіївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-0496-5435

Воденнікова Ольга Сергіївна, провідний інженер кошторисного відділу, Запорізький державний медичний університет, ORCID: 0000-0002-3747-2779

Рагалевиц Альона Олександрівна, інженер з метрології служби головного метролога, Відокремлений підрозділ, Запорізька атомна електростанція

ПРОЦЕС КОРОЗІЇ МІДНО-НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ В ТРУБКАХ КОНДЕНСАТОРІВ ДРУГОГО КОНТУРУ АЕС

На сьогодні в умовах АЕС актуальною залишається проблема створення та підтримки фізико-хімічних властивостей теплоносіїв, які б запобігали корозійним пошкодженням конструкційних матеріалів обладнання та утворення відкладень на його поверхнях. Актуальність роботи полягає в тому, що при виборі коригувальної добавки, що є найменш агресивною по відношенню до мідьвмісних сплавів, вдасться уникнути виносу міді з регенеративного тракту низького тиску і осідання її на трубках парогенератора, а, отже, знизити ймовірність виникнення контакту корозії з наступним руйнуванням стін парогенератора. В роботі проведена оцінка впливу корегувальних добавок – морфоліну (C_4H_9NO), етаноламіну (C_2H_7NO) та аміаку (NH_3) на процес корозії мідно-нікелевого сплаву типу МНЖ-5-1, що використовується в трубках конденсаторів другого контуру ВП ЗАЕС. Лабораторні дослідження процесу корозії сплаву МНЖ-5-1 проводили за наступних умов: при кімнатній температурі ($22^\circ C$), наявності кисню та без підтримки величини водневого показнику (рН); при відсутності кисню, температурі розчину $80-90^\circ C$ та підтримці величини рН. Так за умов кімнатної температури, наявності кисню та без підтримки величини рН швидкість корозії зразків при витримці в розчині аміаку в 2,3 рази більше, ніж при витримці в морфоліні. За умов відсутності кисню, температурі розчину $80-90^\circ C$ та підтримці величини рН швидкість корозії зразків при витримці в розчині аміаку в 1,3 рази більше, ніж при витримці в морфоліні. Встановлено, що найбільш агресивною коригувальною добавкою по відношенню до мідьвмісних сплавів є аміак, а найменшою – морфолін. Це зумовлює доцільність застосовувати морфоліновий або етаноламіновий режими в умовах ВП ЗАЕС з великою кількістю обладнання з мідьвмісними сплавами у другому контурі. Застосування морфолінового та етаноламінового водно-хімічних режимів призводить до зниження концентрації заліза у поживній воді у 2-3 рази та підвищення рН у пароводяному контурі.

Ключові слова: корозія металу, швидкість корозії, мідно-нікелеві сплави, рН розчину, водно-хімічний режим

Вступ. На сьогодні проблема корозії металу залишається актуальною в процесі експлуатації металевих конструкцій [1]. Сучасний захист металів від корозії базується на наступних методах [2-5]:

- підвищення хімічного опору конструкційних матеріалів (легування металів);
- ізоляція поверхні металу від агресивного середовища (нанесення металевих (електролітичне осадження, хімічне осадження, гаряче і холодне нанесення, термодифузійна обробка, металізація напиленням, плакірування) або неметалевих (оксидування, фосфатування, пасивування, анодування) покриттів;
- пониження агресивності виробничого середовища;
- зниження корозії накладенням зовнішнього струму (електрохімічний захист).

Заходи з антикорозійного захисту металевих конструкцій можуть значно збільшити термін експлуатації та, як наслідок, знизити витрати на заміну обладнання [6]. Захист металевих конструкцій від корозії повинен відповідати ДСТУ Б В.2.6–193:2013 [7].

Безпосередньо при проведенні експертизи промислової безпеки технічних пристроїв, що застосовуються на небезпечних виробничих об'єктах, одним з найважливіших завдань є визначення швидкості корозії та прогнозування цієї швидкості на запланований період експлуатації [6].

Постановка проблеми. Запобігання корозійного зношування елементів другого контуру АЕС та зменшення росту відкладень на трубній системі парогенераторів (ПГ) в значній мірі визначається організацією водно-хімічного режиму (ВХР) контуру. Водневий показник при робочій температурі (рН) – це основний параметр для попередження корозії обладнання [8]. Також до накопичення продуктів корозії та утворення виразок на внутрішніх поверхнях призводить неякісна консервація обладнання або її відсутність у період виводу другого блоку з роботи [9, 10].

Найбільш радикальним із наявних на сьогодні методів запобігання корозійному зношуванню трубок ПГ є проведення періодичних хімічних промивок з боку другого контуру. Однак хімічні промивки призводять до утворення значних об'ємів рідких відходів, що важко перероблюються [11]. Корозійні пошкодження металу з боку робочого середовища призводять до потоншення трубок, що передають тепло, та їх розриву [12].

Для запобігання корозійного розтріскування конструкційних матеріалів парогенераторів та корозійно-ерозійного зношування обладнання другого контуру з погляду технології ведення водно-хімічного режиму має бути забезпечено: зниження загального солемісту котлової води в ПГ та особливо вмісту хлоридів та сульфатів; еквівалентність концентрацій катіонів та аніонів для стабільної підтримки величини рН продувної води у слаболужній області у всіх режимах роботи ПГ; низький вміст кисню в конденсаті та поживній воді; стабільне підтримання величини рН поживної води [13].

Корегувальна хімічна обробка робочих середовищ другого контуру згідно з СОУ-Н ЯЭК 1.028:2010 [14] повинна, перш за все, забезпечувати: цілісність бар'єрів для радіоактивності (парогенераторів); мінімальну кількість відкладень на теплопередавальній поверхні парогенераторів, в проточній частині турбін; мінімальний досяжний обсяг відходів, що містять шкідливі для довкілля хімічні реактиви.

Слід відмітити, що при виготовленні корпусів реакторів, корпусів і трубчатки теплообмінних апаратів, компенсаторів об'єму (тиску), насосів, трубопроводів, арматури та допоміжного обладнання ядерних енергетичних установок основними конструкційними матеріалами є вуглецеві та спеціальні сталі з особливими фізико-хімічними властивостями (жароміцні, ерозійностійкі, корозійностійкі) [12]. Безпосередньо конденсатори енергоблоків оснащені в основному трубками з мідно-нікелевого сплаву типу МНЖ-5-1 [15], який згідно з ДСТУ ГОСТ 492:2007 [16] містить: 5,0–6,5% Ni+Co; 1,0–1,4% Fe; 90,6–93,7% Cu; 0,3–9,8% Mn; до 0,03% C; до 0,15% Si; до 0,01% S; до 0,04% P та інші домішки.

Удосконалення хімічної корекції робочих середовищ другого контуру неможливе без заміни обладнання, що містить мідь, та підвищення щільності конденсаторів. Істотне зниження швидкості корозії конструкційних матеріалів конденсатно-живильного тракту може бути досягнуто підвищенням рН до 9,8–10,1 од., що можна досягти тільки при повній заміні обладнання, що містить мідь, другого контуру [17].

Для другого контуру енергоблоків АЕС передбачається підтримка ВХР із корегувальною обробкою робочого середовища гідрозин-гідратом, при необхідності аміаком, морфоліном, гідрооксидом літію [18]. Коригувальна добавка (реагент) повинна відповідати наступним вимогам [12]:

- кращі, порівняно з аміаком, лужні властивості (тобто більш висока величина константи дисоціації K_b) та менший ступінь зниження K_b зі зростанням температури;
- коефіцієнт розподілу між паром та водою у двофазному середовищі K_d близький до 1;
- здатність підвищувати рН без шкоди для мідних сплавів;
- сумісність із конструкційними матеріалами;
- стабільність (низька швидкість термічного розкладання);
- забезпечення нормальної експлуатації систем підтримки ВХР-2 (блокові знесолюючі установки (БЗУ) та система очищення продувної води парогенераторів (СВО-5 або РУ);
- мінімальний вплив на навколишнє середовище та здоров'я персоналу;
- економічна доцільність.

Саме тому *метою роботи* є оцінка впливу застосування корегувальних добавок, що використовуються для корекції рН другого контуру на енергоблоках з ВВЕР-1000, на процес корозії сплаву МНЖ-5-1.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:

- проаналізувати залежність зміни рН розчину корегувальної добавки в залежності від часу витримки;
- визначити загальну швидкість корозії сплаву типу МНЖ-5-1 у присутності розчинів морфоліну, етаноламіну та аміаку.

Матеріали та методика дослідження. Експериментальні дослідження процесу корозії мідно-нікелевого сплаву типу МНЖ-5-1 проводилися в лабораторних умовах. Для випробувань були взяті зразки труб (вагою 3–4 г) з конденсаторів, що працюють в умовах другого контуру ВП ЗАЕС. Попередньо проводили механічну (зачищали за допомогою наждакового паперу) та хімічну (поміщали в концентровану сірчану кислоту (H_2SO_4) і витримували протягом 10–30 хв.) очистку зразків для зняття відкладень і зважували на аналітичних вагах типу KERN ACS. Зовнішній вигляд зразків до та після очищення представлено на рис. 1.

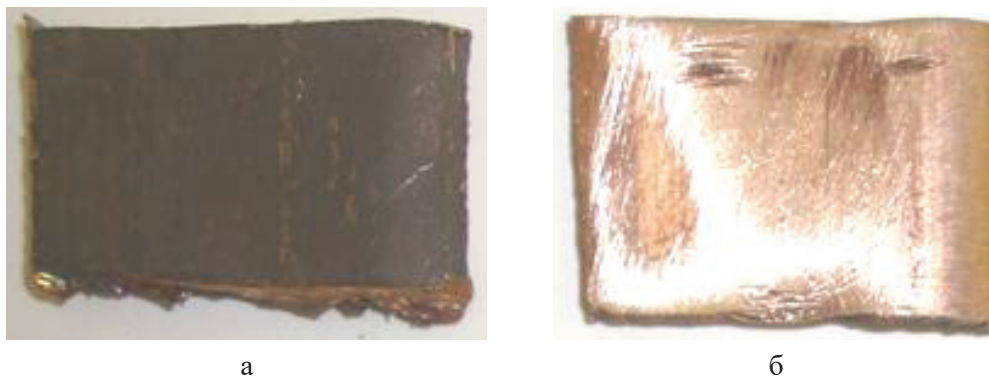


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд зразків сплаву МНЖ-5-1 до очищення (а) та після очищення (б)

В якості корегувальних добавок використовували морфолін (C_4H_9NO), етаноламін (моноеталамін) (C_2H_7NO) та аміак (NH_3). Вибір типу корегувальної добавки був зумовлений прийнятим водно-хімічним режимом другого контуру в проектах АЕС-2006 та ВВЕР-ТОІ.

В дослідженнях використовували 1% розчин морфоліну, 0,1% розчин етаноламіну та 0,24% розчин аміаку. Значення рН доводили до 9,2–9,3 од. шляхом додавання

по краплях лужної добавки у дистильовану воду, рН вимірювали за допомогою лабораторного іономіру И-160М.

Лабораторні дослідження процесу корозії сплаву МНЖ-5-1 проводили за наступних умов:

– режим № 1: кімнатна температура (22 °С), наявність кисню, без підтримки величини рН.

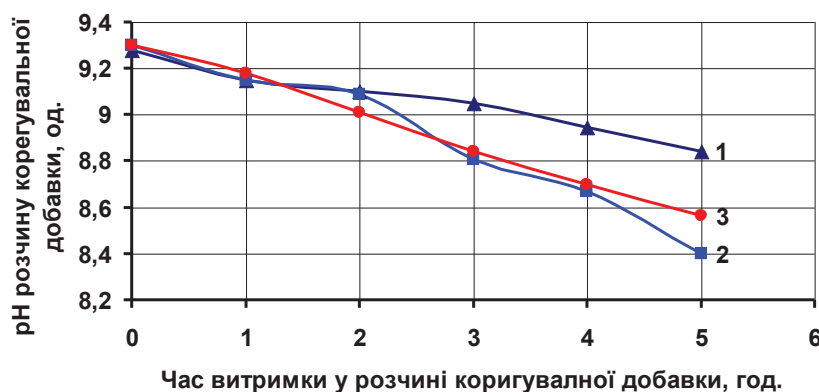
У дев'ять конічних колб ємністю 250 мл кожна вносили по 200 мл заздалегідь приготовлених розчинів морфоліну, етаноламіну та аміаку (по три колби на кожний розчин). Потім у колби опускали заздалегідь підготовлені мідно-нікелеві зразки. Зразки витримували в розчинах протягом 5 годин, при цьому щогодини зі склянки відбирали 20 мл розчину та проводили вимірювання концентрації міді фотометричним методом з купризоном ($C_{14}H_{22}N_4O_2$) та рН. Після закінчення експерименту зразки труб витягали з розчинів і висушували.

– режим № 2: відсутність кисню, що досягається введенням триразового надлишку гідразину (N_2H_4), підтримка температури розчину в межах 80–90 °С та підтримка величини рН.

У дев'ять конічних колб ємністю 250 мл кожна вносили по 200 мл заздалегідь приготовлених розчинів морфоліну, етаноламіну та аміаку (по три колби на кожний розчин). Потім колби поміщали на водяну баню і нагрівали до 80–90 °С (не можна допускати закипання розчину), після чого додавали двократний надлишок гідразин-гідрату ($N_2H_4 \cdot H_2O$) (1,9 мл 9,3 % розчину), для зв'язування розчиненого кисню. Лише після цього опускали мідно-нікелеві зразки. Зразки витримували в розчинах протягом 5 годин, щогодини зі склянки відбирали 20 мл розчину. Після охолодження проводили вимірювання концентрації міді фотометричним методом із купризоном ($C_{14}H_{22}N_4O_2$) та величини рН. Після цього доводили значення рН кожного розчину до 9,2–9,3 од. та продовжували експеримент. Після закінчення експерименту зразки труб витягали з розчинів і висушували.

Загальну швидкість корозії сплаву МНЖ-5-1 при витримці в корегувальних добавках визначали розрахунковим шляхом згідно з методикою [19].

Виклад основного матеріалу. Аналіз зміни рН розчину корегувальних добавок в залежності від часу витримки у розчині за умов режиму № 1 показав, що при протіканні корозії сплаву МНЖ-5-1 спостерігається зниження величини рН в усіх досліджуваних розчинах (рис. 2). Причому в розчині морфоліну цей процес протікає меншою мірою: за п'ять годин рН розчину морфоліну зменшилося з 9,28 до 8,84 од. (рис. 2, крива 1). Найбільш інтенсивне зниження рН розчинів спостерігається у розчині етаноламіну, де значення рН зменшилося з 9,3 до 8,4 од. (рис. 2, крива 2).



1 – витримка у морфоліні; 2 – витримка в етаноламіні; 3 – витримка в аміаку

Рисунок 2 – Зміна рН розчину корегувальних добавок в залежності від часу витримки у розчині

На протязі п'яти годин витримки сплаву МНЖ-5-1 в розчинах корегувальних добавок маса міді змінювалася нерівномірно (таблиця 1).

Таблиця 1 – Маса міді, розчинена в розчинах корегувальних добавок на протязі п'яти годин витримки

Корегувальна добавка	Маса міді, розчинена в розчинах корегувальних добавок, мкг				
	Час витримки в розчинах корегувальних добавок				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Режим № 1					
Морфолін	1,2	1,0	1,5	0,9	1,6
Етаноламін	0,5	2,5	1,4	2,4	3,1
Аміак	0,6	2,0	1,8	1,7	3,9
Режим № 2					
Морфолін	1,7	3,6	1,9	2,3	4,3
Етаноламін	1,9	2,1	2,0	4,2	4,2
Аміак	3,8	3,6	5,2	4,7	7,3

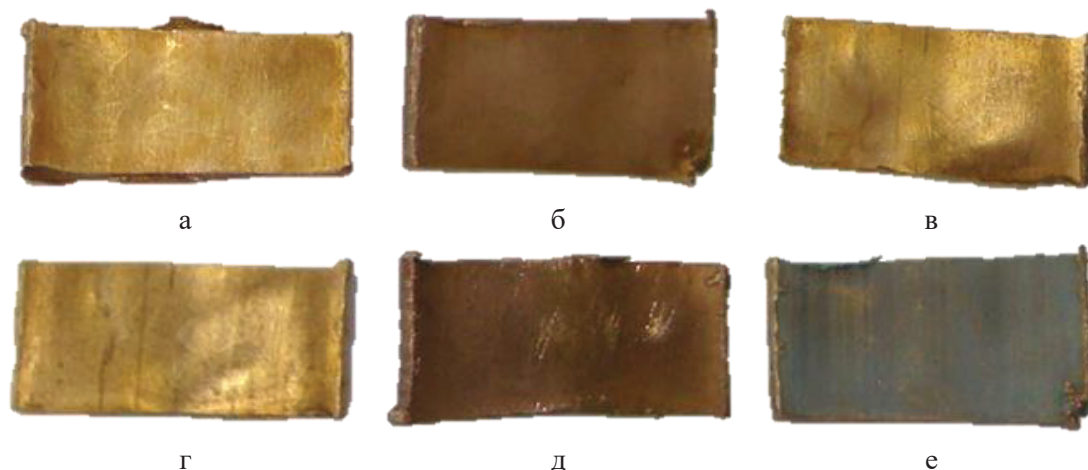
За умов кімнатної температури, наявності кисню та без підтримки величини рН на четвертій годині витримки в розчинах морфоліну та аміаку спостерігається зменшення маси міді до 0,9 мкг та 1,7 мкг відповідно. На п'ятій годині відбувається різке збільшення маси міді при витримці в розчинах морфоліну та аміаку до 1,6 мкг та 3,9 мкг відповідно. За умов же відсутності кисню, температурі розчину 80–90 °С та підтримці величини рН різке зменшення маси міді при витримці в корегувальних добавках відбувається на третій годині: при витримці в морфоліні маса міді зменшується до 1,9 мкг, а при витримці в етаноламіні маса міді зменшується до 2,0 мкг. Зі збільшенням часу витримки в корегувальних добавках до п'яти годин спостерігається лінійна тенденція збільшення маси міді: до 4,3 мкг при витримці у розчині морфоліну, до 4,2 мкг при витримці у розчині етаноламіну та 7,3 мкг при витримці у розчині аміаку.

Слід припустити, що зменшення маси міді в розчинах корегувальних добавок пов'язане з утворенням мідних відкладень на зразках, які спостерігаються при металогрфічному дослідженні (рис. 3 та рис. 4).

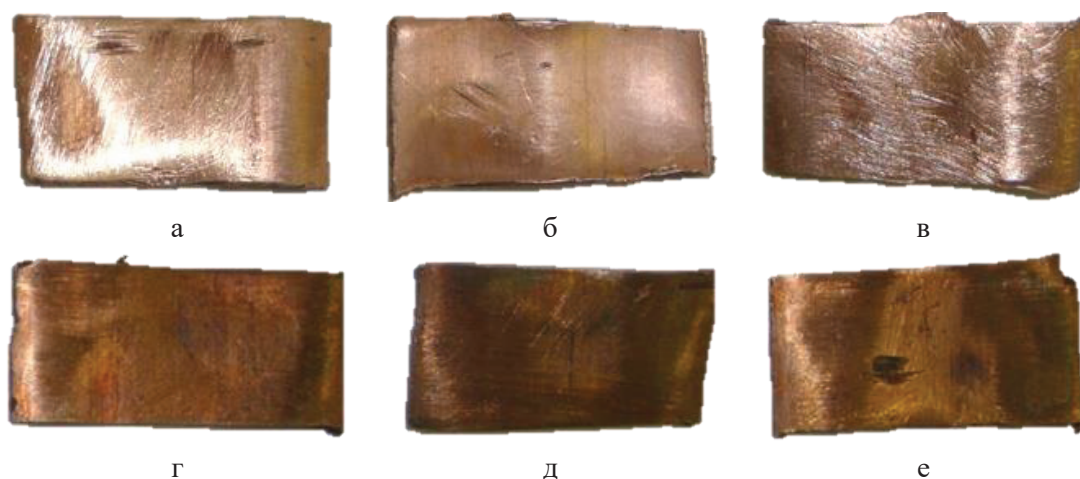
Аналіз розрахункових даних швидкості корозії сплаву МНЖ-5-1 при витримці в корегувальних добавках показав, що найбільш агресивною коригувальною добавкою по відношенню до сплаву є аміак. При застосуванні в якості корегувальної добавки аміаку за умов відсутності кисню, температурі розчину 80–90 °С та підтримці величини рН швидкість корозії в 1,34–2,72 рази більше, ніж за умов кімнатної температури, наявності кисню та без підтримки величини рН (таблиця 2). Відносна похибка розрахункових даних швидкості корозії становить до 4%.

Дослідження макроструктури зразків сплаву МНЖ-5-1, отриманих за умов кімнатної температури, наявності кисню та без підтримки величини рН (рис. 3), показали, що найбільш помітні відкладення у вигляді оксидів міді спостерігаються при витримці в розчині аміаку (рис. 3, е). Аналіз макроструктури зразків, отриманих за умов відсутності кисню, підтримці температури розчину в межах 80–90 °С та підтримці величини рН (рис. 4), показав, що відкладення представлені металевою міддю, що зумовлено наявністю гідразину.

Висновки. Проаналізовано вплив застосування корегувальних добавок (морфоліну, етаноламіну, аміаку), що використовуються для корекції рН другого контуру на енергоблоках з ВВЕР-1000, на процес корозії мідно-нікелевого сплаву МНЖ-5-1. Застосування органічних амінів для корегувальної обробки робочого середовища другого контуру АЕС не призвело до підвищення експлуатаційних витрат на хімічні реагенти.



а – в – зразки сплаву МНЖ-5-1 до початку проведення експерименту; г – зразок сплаву МНЖ-5-1 після витримки у морфоліні; д – зразок сплаву МНЖ-5-1 після витримки в етаноламіні; е – зразок сплаву МНЖ-5-1 після витримки в аміаку
Рисунок 3 – Зовнішній вигляд зразків, отриманих за умов кімнатної температури, наявності кисню та без підтримки величини рН



а – в – зразки сплаву МНЖ-5-1 до початку проведення експерименту; г – зразок сплаву МНЖ-5-1 після витримки у морфоліні; д – зразок сплаву МНЖ-5-1 після витримки в етаноламіні; е – зразок сплаву МНЖ-5-1 після витримки в аміаку
Рисунок 4 – Зовнішній вигляд зразків, отриманих за умов відсутності кисню, підтримці температури розчину в межах 80–90°C та підтримці величини рН

Таблиця 2 – Загальна швидкість корозії сплаву МНЖ-5-1 в розчинах коригувальних добавок

Коригувальна добавка	Швидкість корозії, 103 г/м ² ·год.	
	Режим №1	Режим №2
Морфолін	0,879 ± 0,032	2,391 ± 0,098
Етаноламін	1,668 ± 0,045	2,228 ± 0,076
Аміак	2,066 ± 0,085	3,909 ± 0,078

Встановлено, що найбільш агресивною коригувальною добавкою по відношенню до сплаву МНЖ-5-1 є аміак, а найменшими – морфолін та етаноламін. Так швидкість корозії зразків при витримці в розчині аміаку та морфоліну за умов при кімнатної

температури, наявності кисню та без підтримки величини рН складає $2,066 \cdot 10^{-3}$ г/м²·год. та $0,879 \cdot 10^{-3}$ г/м²·год. відповідно, а за умов відсутності кисню, підтримці температури розчину в межах 80–90⁰С та підтримці величини рН складає $3,909 \cdot 10^{-3}$ г/м²·год. та $2,391 \cdot 10^{-3}$ г/м²·год. відповідно. Це зумовлює доцільність застосовувати морфоліновий або етаноламіновий водно-хімічні режими в умовах ВП ЗАЕС, що призводить до зниження концентрації заліза у поживній воді у 2–3 рази та підвищення рН у пароводяному контурі.

Бібліографічний перелік

1. Дослідження корозійної стійкості перспективних низьколегованих конструкційних сталей / В.І. Большаков, Г.В. Дрожевська, О.В. Узлов, О.В. Пучіков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 7–8 (209). С. 10–21.
2. Хімічна корозія та захист металів : навч. посіб. / П.І. Стоєв, С.В. Литовченко, І.О. Гірка, В.Т. Грицина. Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019. 216 с.
3. Бик М.В., Букет О.І., Васильєв Г.С. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування : підруч. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спец. «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.
4. Біліченко В.В. Матеріали для сервісу та ремонту автомобілів : навч. посіб. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/bilichenko_servis_ta_remont_avto/index.html (дата звернення: 12.01.2023).
5. Антикоровий захист металу. URL: <https://teplointeh.com.ua/antykoroziyniy-zahyst-metalu.htm> (дата звернення: 12.01.2023).
6. Коррозия металлов / О.А. Чепкасова, А.А. Селезнева, А.И. Садилов, С.В. Хмелев. *Молодой ученый*. 2015. № 23 (103). С. 260–261. URL: <https://moluch.ru/archive/103/23845/>
7. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування [Діючий від 2014-01-01]. *Вид. офіц.* Київ : Мінрегіон України, 2013. 70 с.
8. Струй Е.В. Ведение водно-химического режима II контура с дозированием органических аминов на АЭС с ВВЭР-1200. *Актуальные проблемы энергетики – 2016* : материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов (г. Минск, 2017 г.). Минск : БНТУ, 2017. С. 313–317. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/34988>
9. Архипенко А.В. Состояние водно-химических режимов основных и вспомогательных контуров АЭС Украины и основные направления их совершенствования. *Международное научно-техническое совещание «Водно-химический режим АЭС»* (Смоленская АЭС, 13–17 октября 2003 г.). Москва : ВНИИАЭС, 2003.
10. Егорова Т.М., Крицкий В.Г. Анализ ведения водно-химического режима основного технологического контура и вспомогательных систем АЭС с РБМК и основные направления совершенствования ВХР. *Международное научно-техническое совещание «Водно-химический режим АЭС»* (Смоленская АЭС, 13–17 октября 2003 г.). Москва : ВНИИАЭС, 2003.
11. Медведєв Р.Б., Мердух Р.Б. Водно-хімічний режим і математичне моделювання другого контуру АЕС із реактором типу ВВЕР-1000. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2013. № 3 (89). С. 132–139.
12. Хоршева М.И. Водоподготовка, спецхимочистка и химический контроль на АЭС. Севастополь : СИЯЭиП, 2000. 336 с.
13. Тяпков В.Ф. Состояние, основные проблемы и направления совершенствования водно-химического режима АЭС. *Водоочистка*. 2006. № 11. С. 33–41.
14. СОУ-Н ЯЭК 1.028:2010. Водно-химический режим второго контура атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР. Технические требования к качеству рабочей среды второго контура. *Изд. офіц. Министерство топлива и энергетики Украины*. 2010. VI. 82 с.
15. Коррозия медных сплавов. URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/vodno-himicheskie-rezhimy-i-nadezhnost-metalla-energoblokov-500-i-800-mvt-20.html> (дата звернення: 12.01.2023).
16. ДСТУ ГОСТ 492:2007. Нікель, сплави нікелеві та мідно-нікелеві, оброблювані тиском. Марки (ГОСТ 492-2006, ІДТ) [Діючий від 2008-07-01]. *Вид. офіц.* Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 15 с.

17. Влияние коррекционной химической обработки теплоносителя первого контура и рабочих сред второго контура АЭС с ВВЭР, PWR на радиационную безопасность / Т.В. Мальцева, Ю.А. Зинченко, И.Ю. Добровольская, А.В. Архипенко. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. № 4 (56). С. 37–43.

18. Акользин П.А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. Москва : Энергоатомиздат, 1982. 304 с.

19. Коррозия и защита металлов. В 2 ч. Ч. 1. Методы исследований коррозионных процессов : учебно-методическое пособие / Н.Г. Россина, Н.А. Попов, М.А. Жилиякова, А.В. Корелин. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. 108 с.

References

1. Bolshakov V.I., Drozhevskaya G.V., Uzlov O.V., Puchikov A.B. Study of corrosion resistance research of perspective low-alloy structural steels. *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2015. No. 7–8 (209). P. 10–21.

2. Chemical corrosion and protection of metals : training. manual / P.I. Stoev, S.V. Lytovchenko, I.O. Girka, V.T. Hrytsina. Kharkiv : V.N. Karazin KhNU, 2019. 216 p.

3. Byk M.V., Buket O.I., Vasiliev G.S. Methods of protecting equipment from corrosion and protection at the design stage : sub. for students specialty 161 “Chemical technologies”, specialization “Electrochemical technologies of inorganic and organic materials”. Kyiv : KPI named after Igor Sikorskyi, 2018. 318 p.

4. Bilichenko V.V. Materials for the service and repair of cars : training. manual. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/bilichenko_servis_ta_remont_avto/index.html (accessed 12.01.2023).

5. Anti-corrosion protection of metal. URL: <https://teplointeh.com.ua/antykorozivnyi-zahyst-metalu.htm> (accessed 12.01.2023).

6. Corrosion of metals / O.A. Chepkasova, A.A. Selezneva, A.I. Sadilov, S.V. Khmelev. *Young Scientist*. 2015. No. 23 (103). P. 260–261. URL: <https://moluch.ru/archive/103/23845/>

7. DSTU B V.2.6-193:2013. Protection of metal structures from corrosion. Design requirements [Effective from 2014-01-01]. *Official publishing house*. Kyiv : Ministry of the Region of Ukraine, 2013. 70 p.

8. Struy E.V. Conducting the water-chemical regime of the II circuit with the dosing of organic amines at the PWR-1200 nuclear power plant. *Actual problems of energy – 2016 : materials of the scientific and technical conference of students and postgraduates* (Minsk, 2017). Minsk : BNTU, 2017. P. 313–317. <https://rep.bntu.by/handle/data/34988>

9. Arkhipenko A.V. The state of the water-chemical regimes of the main and auxiliary circuits of the Ukrainian NPP and the main directions of their improvement. *International scientific and technical conference “Water-chemical regime of NPP”* (Smolensk NPP, October 13–17, 2003). Moscow : VNIIAES, 2003.

10. Egorova T.M., Krytskyi V.G. Analysis of the management of the water-chemical regime of the main technological circuit and auxiliary systems of NPPs with RBMK and the main directions of improvement of VKR. *International scientific and technical conference “Water-chemical regime of NPP”* (Smolensk NPP, October 13–17, 2003). Moscow : VNIIAES, 2003.

11. Medvedev R.B., Merdukh S.L. Water Chemistry and Mathematical Modeling of the Second Circuit of the NPP with PWR-1000. *KPI Sci News*. 2013. No. 3 (89). P. 132–139.

12. Khorsheva M.I. Water treatment, special chemical treatment and chemical control at the NPP. Sevastopol : SIYAEyP, 2000. 336 p.

13. Tyapkov V.F. Status, main problems and directions for improvement of the water-chemical regime of the nuclear power plant. *Vodoochistka*. 2006. No. 11. P. 33–41.

14. SOU-N Yaek 1.028:2010. Water-chemical mode of the second circuit of nuclear power plants with reactors of the PWR type. Technical requirements for the quality of the working environment of the second circuit. *Official publishing house Ministry of Fuel and Energy of Ukraine*. 2010. VI. 82 p.

15. Corrosion of copper alloys. URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/vodno-himicheskie-rezhimy-i-nadezhnost-metalla-energoblokov-500-i-800-mvt-20.html> (accessed 12.01.2023).

16. DSTU GOST 492:2007. Nickel, nickel and copper-nickel alloys, processed by pressure. Stamps (GOST 492-2006, IDT) [Effective from 2008-07-01]. *Official publishing house*. Kyiv : Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2008. 15 p.

17. Maltseva T., Zinchenko Ju., Dobrovolskaya I, Arhipenko O. Influence of Chemical Correction of the Primary Coolant and Secondary Operating Environment of WWER and PWR NPPs on Radiation Safety. *Nuclear and Radiation Safety*. 2012. No. 4 (56). P. 37–43.

18. Akolzyn P.A. Corrosion and protection of metal of thermal power equipment. Moscow : Energoatomizdat, 1982. 304 p.

19. Corrosion and protection of metals. In 2 parts. Part 1. Corrosion research methods processes : a teaching and methodological manual / N.G. Rossyna, N.A. Popov, M.A. Zhilyakova, A.V. Korelin. Yekaterinburg : Ural University Publishing House, 2019. 108 p.

Vodennikova Oksana, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhia National University, ORCID: 0000-0003-0496-5435

Vodennikova Olga, Leading Engineer of the Estimation Department, Zaporizhzhia State Medical University, ORCID: 0000-0002-3747-2779

Rahalevych Alona, Metrology Engineer of the Chief Metrologist Service, Zaporizhzhia Nuclear Power Plant, Separate Division

CORROSION PROCESS OF COPPER-NICKEL ALLOY IN PIPES CAPACITORS OF THE SECOND CIRCUIT OF THE NPP

Currently, in the conditions of Nuclear Power Plants, the problem of creating and maintaining the physical and chemical coolant properties, which would prevent corrosion damage to the structural materials of the equipment and the formation of deposits on its surfaces, remains relevant. The relevance of the work lies in the fact that when choosing a corrective additive that is the least aggressive in relation to copper-containing alloys, it will be possible to avoid the removal of copper from the low-pressure regenerative path and its deposition on the tubes of the steam generator, and, therefore, to reduce the probability of corrosion contact with subsequent destruction walls of the steam generator. The work evaluates the effect of corrective additives such as morpholine (C_4H_9NO), ethanolamine (C_2H_7NO) and ammonia (NH_3) on the corrosion process of a copper-nickel alloy of the MNZh-5-1 type, which is used in the second circuit condenser tubes of the ZNPP VP. Laboratory studies of the corrosion process of the MNZh-5-1 alloy were carried out under the following conditions: room temperature ($22\text{ }^\circ\text{C}$), in oxygen presence and without maintaining the amount of hydrogen indicator (pH); oxygen absence of solution temperature from 80 to $90\text{ }^\circ\text{C}$ and pH value support. Yes, under the conditions of room temperature, the presence of oxygen and without pH value support, the rate of corrosion of samples during exposure in ammonia solution is 2,3 times higher, than when it is kept in morpholine. In the absence of oxygen, the temperature of the solution is from 80 to $90\text{ }^\circ\text{C}$ and maintaining the pH value, the rate of corrosion of the samples during exposure in an ammonia solution in 1,3 times more than, it is when kept in morpholine. It was established that ammonia is the most aggressive corrective additive in relation to copper-containing alloys, and morpholine is the least aggressive. This determines the expediency of using morpholine or ethanolamine regimes in the conditions of the SD ZNPP with a large amount of equipment with copper-containing alloys in the second circuit. The use of the morpholine and ethanolamine water-chemical regime leads to a 2–3 fold decrease in iron concentrations in the nutrient water and an increase in pH in the steam-water circuit.

Keywords: metal corrosion, corrosion rate, copper-nickel alloys, solution pH, water-chemical regime

Стаття надійшла до редакції 05.05.2023 р.