

**Олексій НАРІВСЬКИЙ¹, Сергій БЄЛІКОВ², Роман МАРДАРЕВИЧ³,
Василь ІВАШКІВ³, Максим ЖУРАВСЬКИЙ⁴, Євген РУДКОВСЬКИЙ³,
Мар'ян ЧУЧМАН³**

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ГАЗООХОЛОДЖУВАЧІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТБВ-1000-4УЗ

¹ *Машинобудівне підприємство ТОВ “Укрспецмаши”
вул. Мурзи, 16, смт. Мангуш, Донецька обл., 87400, Україна. E-mail: amz309@ukr.net*

² *Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна.*

³ *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна.*

⁴ *ВП “Запорізька АЕС”
вул. Промислова, 133, м. Енергодар, Запорізька обл., 71504, Україна.*

**Oleksiy NARIVSKYI¹, Sergiy BELIKOV², Roman MARDAREVYCH³, Vasyl IVASHKIV³,
Maksym ZHURAVSKYI⁴, Yevhen RUDKOVSKIY³, Marian CHUCHMAN³**

INCREASING DURABILITY GAS COOLERS OF TBB-1000-4U3 TURBOGENERATOR

¹ *Engineering Company “Ukrspetsmash”
16, Murzi st., Mangush, Donetsk region, 87400, Ukraine. E-mail: amz309@ukr.net*

² *National University “Zaporizhia Polytechnic”
64, Zhukovsky st., Zaporizhya, 69063, Ukraine.*

³ *Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS of Ukraine
5, Naukova st., Lviv, 79060, Ukraine.*

⁴ *Zaporizhzhia NPP
133, Promyslova st., Energodar, Zaporizhzhya region, 71504, Ukraine.*

ABSTRACT

In order to improve the resource performance of gas coolers, the feasibility of replacing cupronickel tubes with copper or brass was investigated. For this purpose, the currents of copper - steel and cupronickel - steel and the mass losses due to contact corrosion of the studied materials and the concentration of hydrogen after corrosion tests were determined. It was found that the concentration of hydrogen in copper is 0.5 ppm, which is 35 times less than in steel 09Г2С, and 17 and 4 times less than respectively in cupronickel and in brass. Copper - steel and cupronickel - steel currents for 338 h the tests are close to each other and are 0.039 and 0.07 mA, and the corrosion rate of the steel specimens in these pairs is practically the same, 0.1781 and 0.1766 g / (m² · h).

KEY WORDS: *gas cooler, heat transfer tube, hydrogen corrosion-fatigue crack, local corrosion.*

ВСТУП

Для забезпечення технологічних процесів у промисловості використовують різні типи теплообмінників, зокрема пластинчасті, кожухотрубчасті, “труба в трубі” та з різноманітним оребренням теплообмінних труб. Вони працюють у різних умовах щодо тиску, температури та корозійного середовища, які і визначають різні види їх корозійного чи корозійно-механічного руйнування. Наприклад, пластинчасті і кожухотрубчасті теплообмінники піддаються пітинговій, виразковій і щілинній корозії у хлоридвмісних середовищах [1–4], міжкристалітній – у розчинах різних кислот [5], корозійному розтріскуванню – у середовищі сірководню та хлоридів на нафтопереробних підприємствах [6, 7], а апарати повітряного охолодження в

атмосферному середовищі та газоохолоджувачі (ГО) у водні – щільній та контактній корозії у місцях розвальцювання труб у трубних дошках.

На вітчизняних атомних електростанціях (АЕС) працюють турбогенератори ТВВ-1000-4УЗ, укомплектовані газоохолоджувачами ГО-1800/5453-УЗ для охолодження магнітопроводів генераторів. Водень, що циркулює в турбогенераторах через міжтрубні порожнечі ГО, передає тепло оребреним алюмінієвим сплавом теплопередавальним трубкам з мельхіору. Від трубних порожнин ГО тепло відводиться водою. Після більш, ніж 25- річної експлуатації ГО, на теплообмінних трубках, у місцях між трубними дошками та оребренням труб утворюються повздовжні наскрізні тріщини. Причиною їх зародження та розвитку є напруження в місцях розвальцювання, вібрація при роботі турбогенератора та виділення водню, який утворюється внаслідок катодних електрохімічних реакцій у щілині між мельхіоровими трубками та трубою дошкою зі сталі 09Г2С. Водень системи охолодження, що циркулює у турбогенераторі, містить близько 1,2 % O_2 і до 20 % вологи за нормальних умов [8].

Це сприяє конденсації вологи і розвитку корозійного процесу з виділенням водню у вказаних щілинах та подальшому наводнюванню і розтріскуванню мельхіорових трубок. Тому, метою роботи стало підвищення надійності та довговічності ГО внаслідок вибору іншого матеріалу теплообмінних трубок, тривкішого до наводнювання за даних умов експлуатації.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З конструктивних міркувань згідно [9] теплообмінні трубки у трубних дошках ГО недовальцюються на 1,5 mm до їх кінця з боку міжтрубної порожнини, тому в цих місцях між отворами у трубних дошках і трубками утворюються щілини розміром 0,01 mm (рис. 1). В такий спосіб між мельхіоровими трубками і трубою дошкою зі сталі 09Г2С утворюється контактна гальванічна пара, оскільки при експлуатації ГО в щілинах конденсується волога з водневого охолоджувального середовища, що циркулює у турбогенераторі. Тому, під час експлуатації ГО може розвиватися контактна корозія у парі мельхіор – сталь 09Г2С та щільна – між мельхіоровими трубками та поверхнею отворів під них у трубних сталевих дошках. У цих парах поверхня трубок служить катодом, на якій в результаті електрохімічної реакції виділяється атомарний водень, здатний дифундувати в матеріал трубок і трубої дошки.

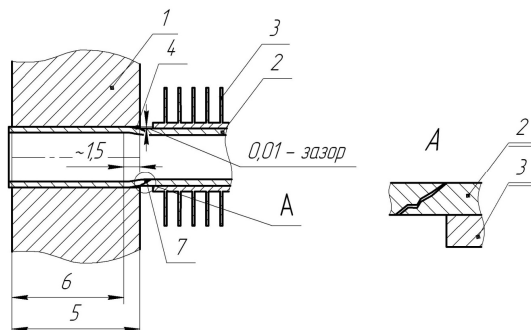


Рис. 1. Теплопередавальна оребрена трубка ГО, розвальцювана у трубній дошці.

1 - трубна дошка ГО (сталь 09Г2С); 2 - теплопередавальна трубка ГО (мельхіор); 3 - оребрення теплопередавальної трубки стрічкою алюмінієвого сплаву АД-1; 4 - зазор між теплопередавальною трубою ГО та поверхнею отвору трубої дошки у недовальцюваному місці; 5 - товщина трубої дошки ГО, mm; 6 - глибина розвальцювання теплопередавальної трубки у трубої дошці ГО, mm; 7 - наскрізна корозійно- механічна тріщина.

Fig. 1. Heat transfer ribbed tube GO flared in a tube board.

1 - pipe board GO (steel 09G2S); 2 - heat transfer tube GO (cupronickel); 3 - finning of the heat transfer tube with a tape of aluminum alloy AD-1; 4 - gap between the heat transfer tube GO and the surface of the hole of the tube board in the under-rolled place; 5 - thickness of a pipe board of GO, mm; 6 - depth of flaring of the heat transfer tube in the tube board GO, mm; 7 - through corrosion- mechanical crack.

Проводили порівняльні дослідження абсорбції водню різними металами (мідь М2, латунь, мельхіор МНЖМц 30-1-1, сталь 09Г2С) та швидкостей контактної і щільної корозії контактних пар вказаних металів. Вміст водню в досліджуваних металах визначали на шліфованих зразках циліндричної форми ($\varnothing = 9$ mm, $H = 30$ mm) методом вакуумної екстракції за температури 200 °C [10]

після їх електролітичного наводнювання у розчині 0,5 М H₂SO₄ з домішкою 10 г/л (NH₂)₂CS за густини струму 10 А/дм².

Швидкість контактної корозії визначали масовим методом [11] у 3% розчині NaCl, а гальванічні струми контактних пар встановлювали згідно [12]. Дослідження проводили на прямокутних зразках площею 10 см² (0,001 м²), занурених в електролітичні комірки. Визначали початок встановлення гальванічних струмів, періодично вимірювали зміну їх значень та замінювали розчин. Після закінчення цих випробувань зразки чистили від продуктів корозії та зважували.

Щільну корозію контактних пар досліджували на зразках, які затискали між собою і занурювали у 3% розчин NaCl. Час експозиції становив 14 days. Швидкість корозії розраховували за формулою:

$$K_m = \frac{m_0 - m}{S \cdot \tau},$$

де: m₀, m – маси зразка до і після експерименту, відповідно, g;

S – площа зразка, м²;

τ – час витримки зразків у корозивному середовищі, h.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати екстракції водню з електролітично наводнених зразків вказують на широкий діапазон його вмісту – 0,5 ppm у мідних зразках, 2,0 ppm у латунних, 8,5 ppm у мельхіорових, 17,5 ppm – сталевих. Важливо відзначити, що концентрація водню в зразках з мельхіору МНЖМ_Ц 30-1-1, з якого виготовляються теплопередавальні трубки становить 8,5 ppm, що в 17 разів більше, ніж у міді та в 4,25 рази, ніж у латуні. Це узгоджується з літературними даними результатів експериментальних досліджень [13] та теоретичним аналізом залежності розчинності водню від електронної конфігурації зовнішніх підрівнів атомів металів [14].

Дослідження корозійної тривкості матеріалів показали, що корозійні втрати зразків зі сталі 09Г2С у досліджуваному розчині становлять 3,58 · 10⁻² g. В контактних парах металів корозійні втрати сталі 09Г2С звичайно вищі (табл. 1). Зокрема, найвищі корозійні втрати сталі 09Г2С виявлені в парі з міддю, оскільки вони становлять 6,02 · 10⁻², а в парах з латунню і мельхіором 5,60 · 10⁻² та 5,97 · 10⁻² g відповідно.

Таблиця 1. Втрати маси зразків за контактної корозії досліджуваних матеріалів
Table 1. Mass loss of samples due to contact corrosion of the investigated materials

Матеріал	(m) _{поч.} , g	(m) _{к.} , g	Δ(m), g
мідь	5,1371	5,1367	0,0004
сталь	19,4710	19,4108	0,0602
латунь	4,7393	4,7391	0,0002
сталь	18,0544	17,9984	0,056
мідь	5,0734	5,0714	0,002
латунь	4,6703	4,6581	0,0122
мельхіор	5,2362	5,2350	0,0012
сталь	18,1469	18,0872	0,0597
сталь (корозія)	4,4246	4,3888	0,0358

При цьому слід відзначити, що корозійні втрати сталі 09Г2С в контактних парах з міддю і мельхіором практично однакові. Це зумовлено тим, що мідь і мельхіор, який відноситься до групи мідно-нікелевих сплавів, у ряді напруг складеному Ла-Ке і Коксом в порядку облагородження потенціалу, розташовані практично поруч [15]. З нього виходить, що чим даліше метали розташовані один від іншого, тим сильніший вплив контакту за однакових поляризаційних характеристик. У запропонованому ряді латунь і мідь розташовані поряд, але від'ємніший (- 0,11 V) потенціал латуні спричиняє у контактній парі з міддю корозійні втрати латунних зразків в 6,1 рази більші, ніж у мідних.

Разом з тим, аналіз даних показав, що в контактних парах міді, латуні та мельхіору зі сталлю 09Г2С корозійні втрати мельхіору в 6 разів більші, ніж у латуні та у 3 разів, ніж у міді. Встановлено, що в усіх досліджуваних контактних парах після 14 days випробувань слідів локальної корозії не виявлено (рис. 2).

Узагальнюючи, слід зазначити, що в досліджуваних контактних парах сталі 09Г2С з міддю, латунню і мельхіором її корозійні втрати практично однакові, водночас корозійні втрати мельхіорових зразків суттєво вищі, ніж мідних і латунних.

Аналіз гальванічних струмів контактних пар показав, що в свіжому розчині у контактній парі міді зі сталлю 09Г2С він у двічі вищий, ніж у пари мельхіор - сталь (табл. 2).

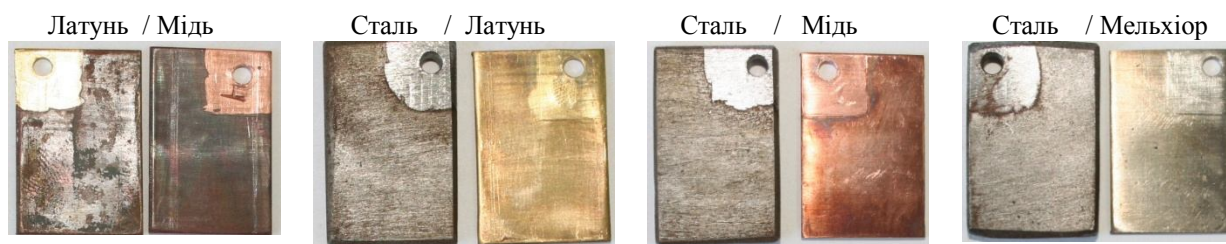


Рис. 2. Поверхня зразків, досліджуваних контактних пар після 14 days випробувань.
Fig. 2. The surface of the samples of the investigated contact pairs after 14 days of testing.

Таблиця 2. Гальванічний струм контактних пар
Table 2. Galvanic current of contact pairs

Стан розчину	τ , h	мідь - латунь	латунь-сталь	мідь - сталь	мельхіор-сталь
		Струми гальванічних пар, mA			
свіжий розчин	0	0,014	0,25	0,4	0,2
	7	0,016	0,19	0,2	0,16
	25	0,007	0,047	0,066	0,02
	28	0,02	0,059	0,055	0,054
зміна розчину	53	0,026	0,144	0,16	0,16
	73	0,008	0,039	0,039	0,041
зміна розчину	97	0,014	0,15	0,152	0,21
	104	0,01	0,075	0,13	0,109
	121	0,013	0,092	0,092	0,061
	145	0,006	0,043	0,061	0,068
зміна розчину	169	0,006	0,146	0,172	0,248
	194	0,005	0,041	0,051	0,048
	199	0,004	0,043	0,036	0,041
	218	0,005	0,041	0,048	0,043
зміна розчину	219	0,008	0,24	0,19	0,164
	243	0,006	0,0285	0,035	0,066
зміна розчину	248	0,008	0,151	0,16	0,17
	273	0,009	0,036	0,031	0,039
зміна розчину	274	0,012	0,109	0,145	0,128
	298	0,012	0,036	0,053	0,052
зміна розчину	318	0,011	0,188	0,182	0,108
	338	0,013	0,03	0,039	0,07

Водночас у контактній парі латуні зі сталлю цей струм в 1,25 рази більший, ніж у мельхіору зі сталлю. Найменший гальванічний струм 0,014 mA спостерігається в парі мідь - латунь, очевидно через сусідство цих металів в ряді Ла-Ке. Через 7 h випробувань загальна тенденція залишилася незмінною, але різниця гальванічного струму між контактними парами значно зменшилася, а через 28 h практично нівелювалася.

Після зміни розчину через 53 h випробувань встановлено, що гальванічні струми контактних пар міді зі сталлю та мельхіору зі сталлю однакові (0,16 mA), а латуні зі сталлю близькі до цього значення (0,144 mA). Слід відзначити, що струми гальванопар у свіжому розчині після 53 h випробувань менші, ніж у свіжому розчині на їх початку. При цьому найбільше зниження струму гальванопар спостережено в парі між міддю і сталлю, оскільки струм між ними знизився в 2,5 рази, а між мельхіором і сталлю та латунню і сталлю в 1,25 та 1,74 рази відповідно. Разом з тим, струм між міддю і латунню навпаки зріс у 1,86 рази. Однак через 73 h випробувань струми гальванопар суттєво знизилися. Зокрема між міддю і латунню в 3,25 рази, між латунню, міддю, мельхіором і сталлю в 3,69; 4,10; та 3,9 рази відповідно. Таким чином, струми гальванопар між латунню і сталлю та міддю і сталлю знизилися до 0,039 mA, а мельхіором і сталлю до 0,041 mA. Виявлено, що після заміни розчину через 97 h випробувань струми гальванопар між латунню, міддю, мельхіором і сталлю не суттєво відрізняються від тих, що встановлено між ними після заміни розчину через 53 h випробувань.

Через 150 h випробувань встановилася загальна тенденція зміни струмів гальванопар. Зокрема, струми гальванопари між міддю і латунню після заміни розчинів змінювалися від 0,006 mA після 169 h випробувань до 0,012 і 0,011 mA після 274 та 318 h відповідно. З часом після заміни розчинів струми цієї гальванопари практично не зазнавали змін, оскільки знаходилися в інтервалі від 0,006 mA після 243 h випробувань, до 0,013 mA після 338 h. Для гальванопар латуні, міді, мельхіору зі сталлю загальна тенденція зміни струмів після заміни розчинів та через деякий час випробувань залишилася не змінною, зокрема після заміни розчинів струми в цих гальванопарах були вищими за ті, що встановлювалися через деякий час випробувань. До того ж струми від 53 до 338 h випробувань мали близькі значення. Вище було встановлено, що мідь в 17 разів менше наводнюється, ніж мельхіор, з якого виготовляють теплопередавальні трубки газоохолоджувачів. При цьому з аналізу даних (табл. 1; 2) встановлено, що корозійні втрати сталі 09Г2С в контактних парах міді та мельхіору з цією сталлю та гальванічні струми після тривалих випробувань дуже близькі. Отже, мідь після цих випробувань можна розглядати як альтернативний мельхіору матеріал для виготовлення теплопередавальних трубок газоохолоджувачів. Заключні рекомендаційні висновки можна зробити після дослідження тривкості цих матеріалів до щільної корозії, оскільки у вальцювальних з'єднаннях теплопередавальних трубок ГО в отворах трубних решіток є щілина (рис. 1), а в ній присутнє корозивне середовище.

За результатами корозійних випробувань зразків на тривкість до щільної корозії, встановлено, що швидкість корозії сталі 09Г2С у щілині в парі з латунню є найвищою, а в парі міддю – найменшою (табл. 3).

Таблиця 3. Швидкість щільної корозії металевих пар
Table 3. Slit corrosion rate of metallic pairs

Металева пара у щілині	Мідь/Латунь	Латунь/Сталь	Мідь/Сталь	Мельхіор/Сталь
$K_m, g/m^2 \cdot h$	$8,9 \cdot 10^{-3} / 19 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3} / 0,1378$	$1,5 \cdot 10^{-3} / 0,1190$	$0,6 \cdot 10^{-3} / 0,1256$

При цьому найменші (0,0002 g) корозійні втрати виявлено у мельхіорових зразків та найбільші (0,0008 g) – у латунних. Візуально на поверхні досліджуваних зразків ознаки локальної корозії не спостерігаються (рис. 3).

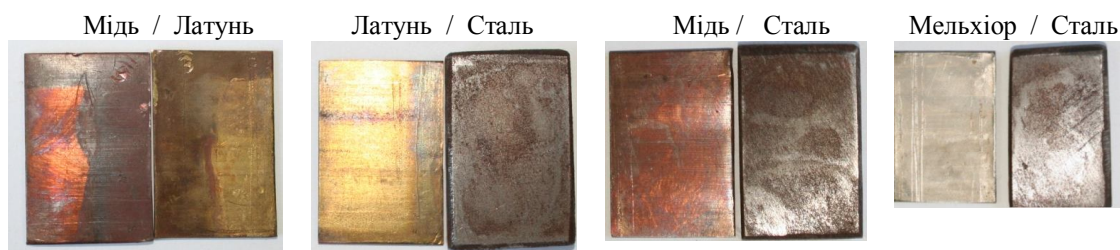


Рис. 3. Вигляд поверхні зразків після щільної корозії у 3% розчині NaCl.
Fig. 3. Surface view of samples after slit corrosion in 3% NaCl solution.

Досвід тривалої експлуатації ГО показав, що тріщини, які зароджувалися в щілині між мельхіоровими теплопередавальними трубками та поверхнею отворів трубних дощок зі сталі 09Г2С, не пов'язані зі зменшенням товщини трубок, а отже з втратою їхньої ваги.

Узагальнюючи вищенаведене можна зазначити, що серед досліджуваних матеріалів (латунь, мідь і мельхіор) мідь більше ніж на порядок менше наводнюється, ніж мельхіор. При цьому в контактних парах між міддю, мельхіором зі сталлю 09Г2С корозійні втрати сталі та струми у них практично однакові. До того ж у цих контактних парах корозійні втрати сталі також близькі, а слідів локальної корозії на поверхні зразків не виявлено (рис. 4, 5). Таким чином враховуючи, що тріщини на поверхні мельхіорових теплопередавальних трубок ГО можуть бути зумовлені їх наводнюванням у щільних і вібрацією, мідь можна рекомендувати як матеріал теплообмінних трубок, який підвищить надійність та довговічність ГО.

ВП «Запорізька АЕС» рекомендовано замовляти ГО з мідними теплопередавальними трубками. В 2018 році на одному турбогенераторі цього підприємства проведено заміну чотирьох ГО на охолоджувачі з мідними теплопередавальними трубками, виготовленими ТОВ «Укрспецмаш» м. Бердянська.

ВИСНОВКИ

За результатами абсорбції водню зразками зі сталі 09Г2С, латуні, мельхіору МНЖМ_ц-30-1-1 та міді М2 встановлено, що мідь в 17 разів менше наводнюється, ніж мельхіор та в 4,5 рази – ніж латунь. При цьому в контактних парах між латунню, міддю, мельхіором зі сталлю 09Г2С виявлено практично однакові, не суттєві корозійні втрати сталі та цих матеріалів без ознак локальної корозії. Випробування цих контактних пар на тривкість до щільної корозії також не виявило ознак локальної корозії. Тому, враховуючи домінуючий вплив наводнення на зародження тріщин в теплопередавальних трубках в процесі їх тривалої експлуатації, промисловості рекомендовано виготовляти ГО з мідними теплопередавальними трубками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нарівський О.Е. Кінетика корозійних процесів та швидкість пітінгування сплаву 06ХН28МДТ у слабких кислотних хлоридовмісних середовищах // Наукові нотатки. – 2011. – Вип. 31. – С. 214-220.
2. Нарівський О.Е. Закономірності корозійного розчинення та швидкість пітінгування сплаву 06ХН28МДТ у нейтральних хлоридовмісних розчинах // Наукові нотатки. – 2011. – Вип. 31. – С. 214-220.
3. Наривский А.Э., Беликов С.Б. Характерные особенности селективного растворения питтингов на поверхности стали AISI 321 в модельных оборотных водах // Новые материалы и технологии в металлургии та машинобудуванні. – 2015. - № 1. – С. 24-32.
4. Nariv's'kyi O.E. Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media // Materials Science. – 2008. – 44, № 4. – P. 573-580.
5. Закономірності і механізми локальної корозії корозійнотривких сталей і сплаву аустенітного класу для емнісної та теплообмінної апаратури : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : спеціальність 05.17.14 Хімічний опір матеріалів та захист від корозії / О.Е. Нарівський, Львів, 2015. – 42 с.
6. Зубченко А.С. Коррозионное растрескивание хромоникелевых сталей в воде высоких параметров // Автоматическая сварка. – 2008. – № 12. – С. 208-212.
7. Хома М.С. Теоретичні основи початкової стадії корозійно-втомного розтріскування сталей і сплавів та розробка методів прогнозування їх границь витривалості : дис. д-ра техн. наук : 05.17.14 / Хома Мирослав Степанович; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Л., 2003. – 292 с.
8. Технічні вимоги та умови постачання «Газоохолоджувачі турбогенератора ТВВ-1000-4У3» 123456.ЭЦ.ГТ.ТТ.68-67 / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Запорізька АЕС». Енергодар, 2017. – С. 22.
9. ГСТУ 3-071-2004 «Апарати кожухотрубчасті теплообмінні та повітряного охолодження» Кріплення труб у трубних решітках. Міністерство промислової політики України. Київ. 2004. – С. 45.
10. ISO 3690: 2000, Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in ferritic steel arc weld metal.
11. ГОСТ 9.912-89. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии. – Издательство стандартов.
12. ASTM G71-81 (2019). Standart guide for conducting and evaluating galvanic corrosion tests in electrolytes.
13. Водород в металлах: в 2-х т./ Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. – М.: Мир, 1981. – Т. 2. – 430 с.
14. Ткаченко К.И. Зависимость растворимости водорода в металлах первого большого периода от электронной конфигурации внешних подуровней // Вісник Приазовського техн. університету. – 2006. – Вип. №16. – С. 1–5.
15. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургия, 1970 – 448с.