

УДК 621.791.01.669

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА В БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ
ІННОВАЦІЙНО-ІНВЕСТИЦІЙНИХ ПРОЕКТАХ
АГРОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ
Макаренко В.Д.¹, Васильченко О.О.²**

¹ доктор технічних наук, професор;

² студент Ніжинського агротехнічного інституту.

Постановка проблеми. На сучасному етапі перед харчовою і переробною галузями України стоять завдання щодо впровадження у виробництво енергетично, екологічно й економічно ефективних і надійних

технологій та нової техніки. Для харчового і переробного виробництва актуальним є підвищення надійності та довговічності технологічного обладнання й інженерних комунікацій, перш за все, паропроводів теплоелектроцентралей [3,8,9-11,13,14]. Щоб розробити практичні рекомендації щодо вдосконалення технологічного обладнання, необхідно мати чітку уяву про причини зниження його безпечного робочого ресурсу, які ведуть до несанкціонованих відмов і аварійних руйнувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1,2,6,8], що безпека і надійність паропроводів високого тиску ($30...50 \text{ ата}$ і $t_{\text{пер}} = 425...450 \text{ }^{\circ}\text{C}$) залежать від якості матеріалу, фізико-механічних властивостей, які в процесі довготривалої експлуатації змінюються, тобто піддаються деградації через корозію. Аналіз даних щодо ремонту теплотехнічного устаткування у харчово-переробній галузі показує, що на ліквідацію наслідків їхньої корозії потрібно близько 89% усіх витрат на ремонт, а витрати, пов'язані безпосередньо з корозією, становлять близько 2% вартості основних виробничих фондів [4].

Сучасні бурякоцукрові виробництва обладнані паровими котлами з тиском $45...50 \text{ ата}$ і температурою перегрітої пари $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та паровими турбінами з тиском $35...40 \text{ ата}$ і температурою перегріву пари $435 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [8,14]. Цукрові підприємства є крупними користувачами пари для технологічних потреб, витрачаючи її в середньому 60% до ваги перероблюваних буряків [8,11,13], а тому забезпечення експлуатаційної надійності паропроводів, що працюють у

екстремальних температурно-баричних умовах, є актуальною інженерно-технічною проблемою.

Утрати працездатності паропроводів бурякоцукрових виробництв унаслідок корозійних пошкоджень і руйнувань призводять до простоїв, значних витрат на ремонт і запасний резерв. Значним чинником ресурсопоглинання є саме корозійні пошкодження й спрацювання теплотехнічного обладнання та транспортних систем, зокрема, паропроводів [1,2,4]. Тому підвищення рівня захисту від корозії найбільш важливої транспортної комунікації бурякоцукрового виробництва – паропроводів – є головним напрямком підвищення надійності та довговічності в цілому теплотехнічного устаткування харчово-переробної галузі. Отже, щоб розв'язати цю проблему, необхідно додатково провести комплекс корозійних, механічних і металографічних досліджень на прикладі паропроводів ТЕЦ бурякоцукрового підприємства.

Метою роботи було виявлення причин корозійних пошкоджень і деградації корозійно-механічних властивостей паропроводів високого тиску в процесі довготривалої експлуатації в умовах бурякоцукрового виробництва.

Методика проведення досліджень. Об'єктами експериментальних досліджень служили паропроводи, виготовлені з котельної сталі марки 25К (границя міцності – 450 МПа) з термінами експлуатації від 0 до 15 років. Дослідні зразки вирізали з паропроводів діаметром 150 мм з товщиною стінки 9 мм у процесі їх ремонту через аварійні (несанкціоновані) відмови або пошкодження. Результати експериментальних досліджень зразків, вирізаних із експлуатованих тривалий час паропроводів, порівнювали з аналогічними характеристиками металу таких самих паропроводів із аварійного запасу.

Першу серію зразків піддавали механічним випробуванням, зокрема, визначали показники тріщиностійкості – параметри критичної інтенсивності напружень (K_{Ic} , МПа·м^{1/2}) та критичного розкриття тріщини (δ_c , мм), що характеризують опір металу крихкому руйнуванню. Випробування з метою визначення параметрів в'язкості руйнування виконували на устаткуванні моделі „INSTRON” (Великобританія) за стандартною методикою [5,7].

Дослідження другої серії зразків на корозійно-водневе розтріскування проводили за методикою, узгодженою з вимогами

Міжнародної асоціації корозіоністів NACE, відповідно до яких база випробувань становить 720 год для $P=0.8 \cdot \sigma_{0.2}^{\min}$ (де $\sigma_{0.2}^{\min}$ – мінімально допустиме значення межі текучості сталі), pH5-6; для ВІР (воднем ініційоване розтріскування) – коефіцієнти довжини тріщини $CLR \leq 6\%$ й товщини тріщини $CTR \leq 3\%$ [12,15]. Випробували циліндричні зразки, осесиметрично розтягнені на установці гирьового типу USMP-6 під вантажем $\sigma_{0.2}^{\min}$ (у кожному експерименті випробували по 5-6 зразків) [7].

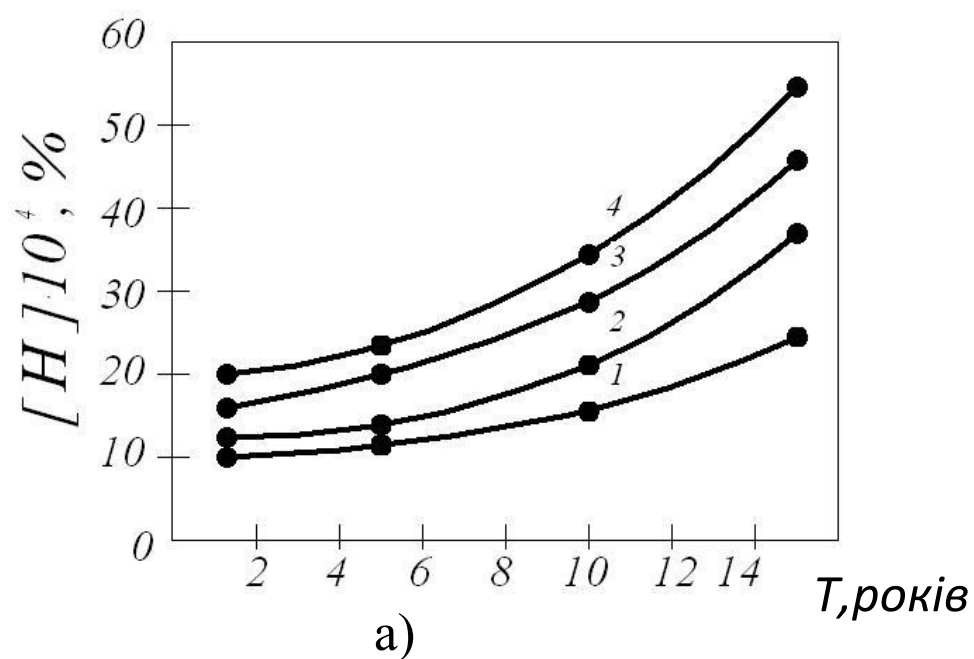
Комплекс металографічних досліджень пошкодженого металу паропроводів включав, крім стандартних, також рентгеноспектральний аналіз з використанням растрового електронного мікроскопа «JSM-35CF» (фірма “JEOL”, Японія). Для рентгенофазного аналізу використовували стандартну картотеку PDF [7].

Вміст і характер розподілу в металі водню й кисню визначали методом локального мас-спектрального аналізу з лазерним мікрозондом, а також методом плавки проб металу в потоці газу на установці фірми „Лесо”.

Результати досліджень. Наведені на рис.1 дані свідчать про значне наводнювання, окислення й окрихчування металу паропроводів, що чітко проявляється після 3-5 років експлуатації й призводить зазвичай до корозійних пошкоджень з подальшим руйнуванням труб. Причому на адсорбцію кисню і водню істотно впливає температура пари та тиск, з ростом яких як наводнювання, так і окислення металу збільшується, що призводить до його окрихчування та зниження опору агресивній дії корозійного середовища й зовнішнього тиску. Причому адсорбція газу (кисню й водню) сильно зростає в області корозійних виразок (каверн). Як видно з даних рис.2, у процесі довготривалої експлуатації значно знижуються в'язко-пластичні властивості металу (K_{lc}, δ_c), особливо виразно це проявляється за високих температур і тисків водяної пари в паропроводі.

Розрахункові значення показників водневого розтріскування ВІР для сталей, експлуатованих більше 3-х років, становлять: $CLR=3.1-5\%$, а $CTR=1.5-2.6\%$, що відповідає технічним умовам на трубопровідні конструкції, призначені для роботи в умовах високих температур (500...600 °C) і тисків (160...170 *ата*) [1,2].

Результати експериментальних корозійно-втомних досліджень, наведені на рис.3, показали, що воднево-кисневе середовище в 1.5-2.5 рази знижує межу втомності довготривало експлуатованих паропроводів порівняно з неексплуатованими.



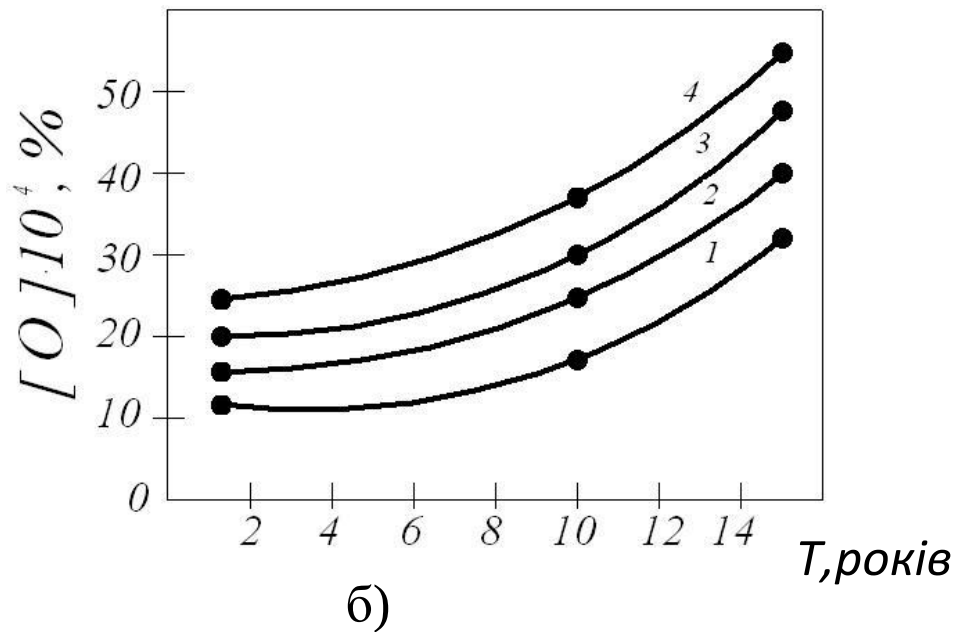
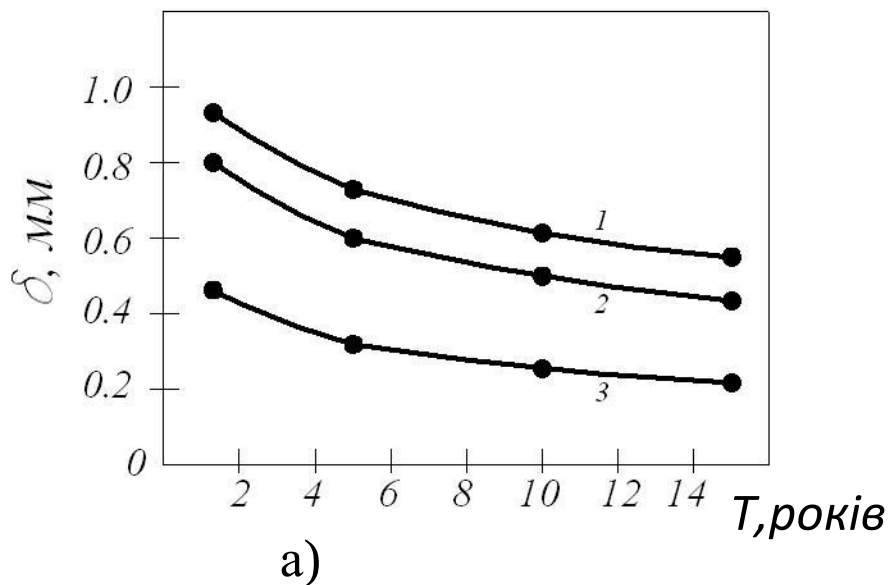


Рис.1. Вміст розчинених газів в металі паропроводів залежно від терміну їх експлуатації: а) водень; б) кисень; 1 – $P=7 \text{ атa}$; $t=250 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $P=15 \text{ атa}$; $t=350 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $P=30 \text{ атa}$; $t=415 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $P=40 \text{ атa}$; $t=450 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



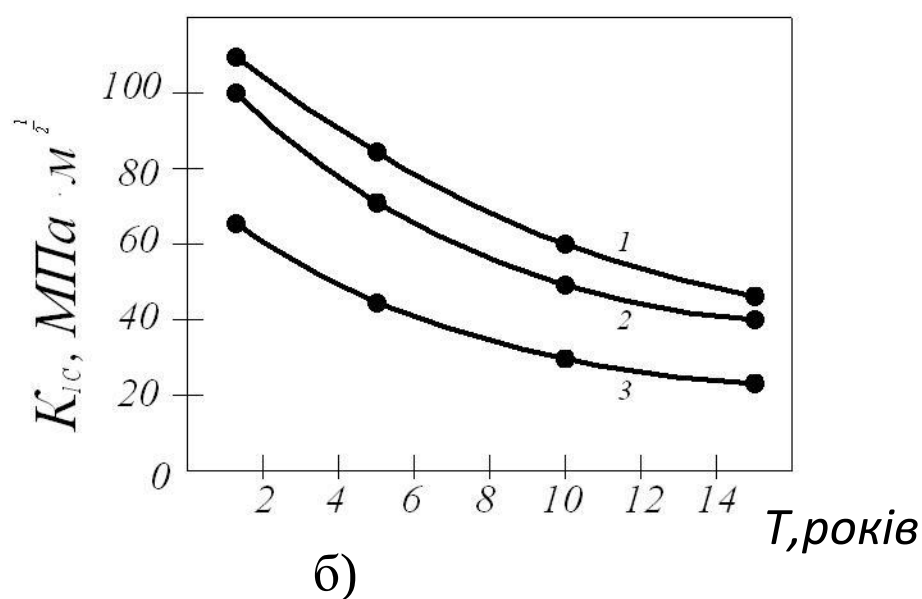


Рис.2. Графіки залежностей параметрів тріщиностійкості K_{Ic} (рис. а)) і δ_c (рис. б)) металу паропроводів від терміну експлуатації (температура випробувань +20 °C): 1 – $P=15 \text{ ата}$; $t=350 \text{ °C}$; 2 – $P=30 \text{ ата}$; $t=415 \text{ °C}$; 3 – $P=40 \text{ ата}$; $t=450 \text{ °C}$.

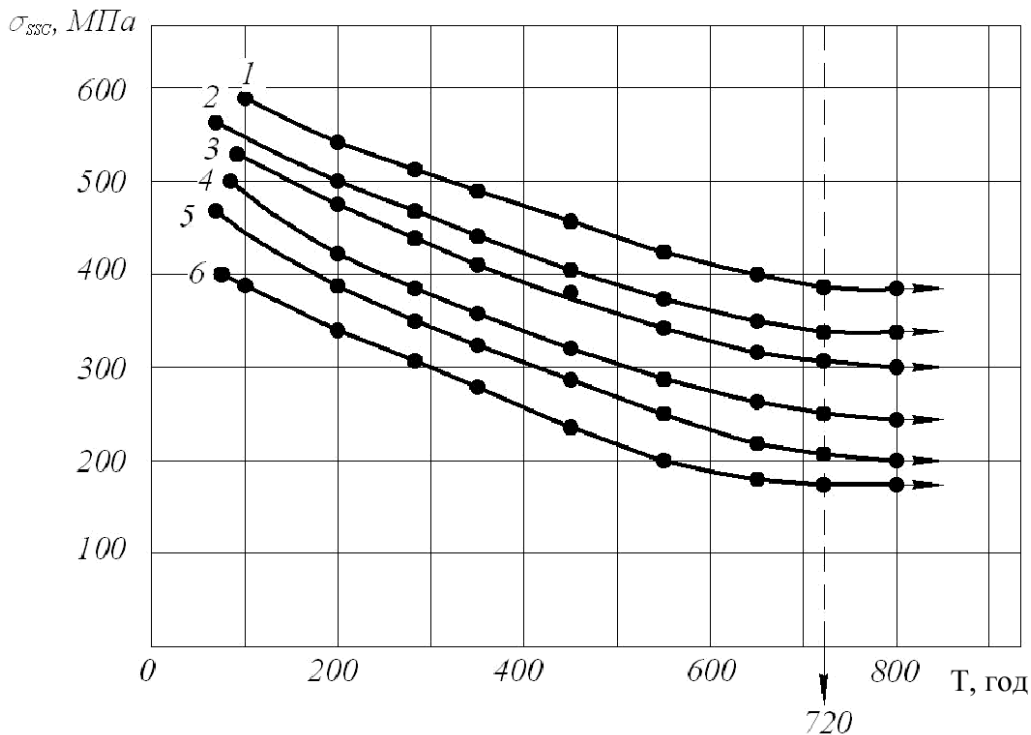
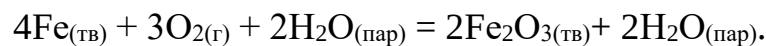
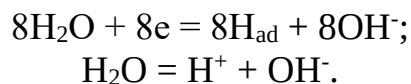


Рис.3. Графіки змінення корозійної втоми паропроводів, виконаних зі сталі 25К, у разі випробування в корозійному середовищі NACE: терміни експлуатації (у роках): 1 – 0 (неексплуатована сталь); 2 – 3; 3 – 6; 4 – 10; 5 – 15; 6 – 20.

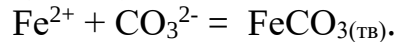
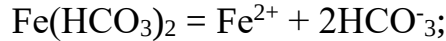
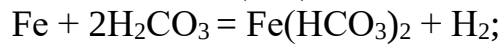
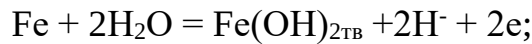
На нашу думку, корозійні пошкодження паротрубопроводів за присутності кисню і парів води відбуваються відповідно до хімічної реакції



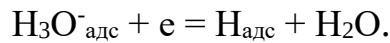
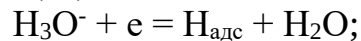
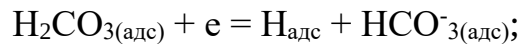
Утворення атомів водню й аніонів гідроксиду відбувається за катодними реакціями:



Захисні оксид-гідроксидні та карбонатні плівки (накип) на поверхні паропроводів утворюються відповідно до таких реакцій [5]:



Одночасно відбуваються реакції, що викликають зміну в складі плівки відповідно до її захисних властивостей і збільшення проникності:



Подані вище дані свідчать про актуальність проблеми корозії металу паротрубопроводів за присутності кисень-водневого середовища і високого тиску пари в транспортній системі, для вивчення особливостей якої необхідно виконати додаткові дослідження.

За допомогою рентгеноструктурних досліджень були отримані дані, які свідчать про розпад цементиту в сталях паропроводів у процесі експлуатації (рис. 4), що безперечно викликає процес знеміцнювання металу паропроводів, знижуючи тим самим опір матеріалу зародженню і росту мікротріщин [5,7].

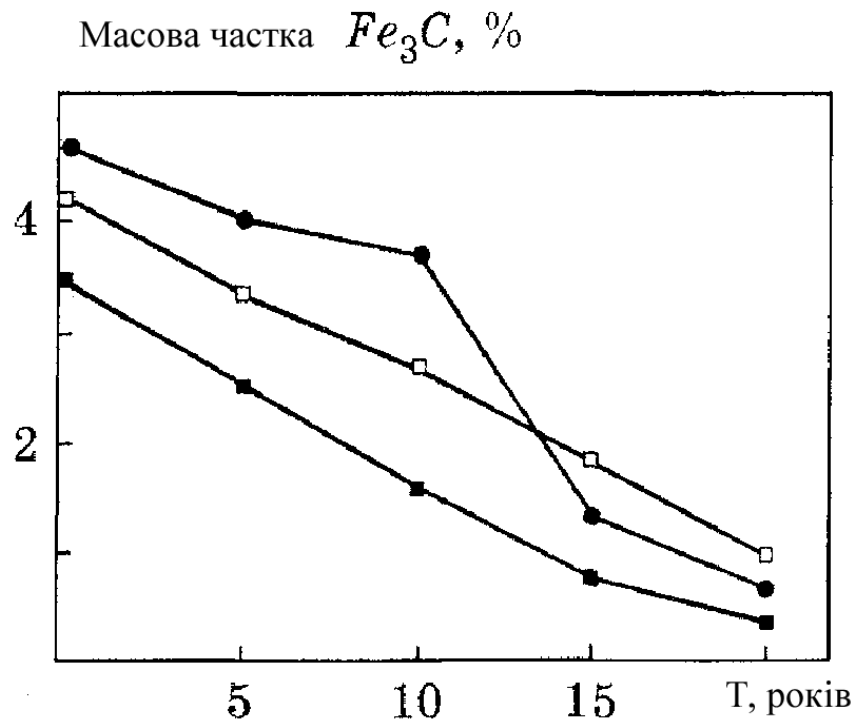


Рис.4.Змінення кількості цементиту в сталі залежно від терміну експлуатації паропроводів. Позначення: нижня лінія – $P=40 \text{ atm}$; $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; середня лінія – $P=30 \text{ atm}$; $t = 415 \text{ }^\circ\text{C}$; верхня лінія – $P=15 \text{ atm}$; $t = 350 \text{ }^\circ\text{C}$.

Відомо, що цементит легко розкладається в разі дії на нього атомів водню [7]: $Fe_3C + 2H_2 \leftrightarrow 3Fe + CH_4$. У процесі експлуатації на поверхні металу паропроводів або на поверхні мікропорожнин утворюються активні центри, в яких відбувається дисоціація молекул водню та проникнення атомарного водню в глибину металу, що й призводить до зародження мікротріщин у металі і, як наслідок, викликає в цілому деградацію сталевих паропроводів.

Висновки

Установлено основні причини деградації металу паропроводів довготривалої експлуатації бурякоцукрового підприємства, які полягають у процесах наводнювання, окислення й окрихчування металу, інтенсивність яких зростає зі збільшенням тиску та температури хімічно активного парового середовища. Показано, що з ростом терміну експлуатації, а також значення тиску і температури пари, у 1.5-2.5 рази знижуються показники тріщиностійкості K_{Ic} , δ_c і

межа корозійно-механічної втомності металу паропроводів. Наведено найбільш імовірні хімічні реакції корозійних процесів на поверхні металу паропроводів, що контактують з перегрітою парою за високого тиску. Отримані за допомогою металографічних досліджень дані свідчать про розпад цементиту в сталях паропроводів у процесі довготривалої експлуатації в хімічно активному середовищі перегрітої пари під високим тиском, що й призводить до деградації корозійно-механічних властивостей металу паропроводів.

Отримані результати свідчать про необхідність у подальшому проведенні системних досліджень щодо впливу хімічно-агресивних робочих середовищ на в'язко-пластичні та корозійно-механічні властивості трубних низьковуглецевих і легованих марок сталей, використовуваних для виготовлення технологічного обладнання і паропроводів у харчовому та переробному виробництві.

Список літератури

1. *О проблеме коррозионных и коррозионно-механических повреждений металла пароводяного тракта блоков СКД* /А.Б. Вайнман, С.В. Яцкевич, Г.В. Мухопад и др. //Энергетика и электрификация. – 1995. – №4. – С.1-10.
2. *О хрупких повреждениях трубопроводов подачи воды в парохладители котлов блоков СКД* /А.Б. Вайнман, Г.В. Мухопад, Г.А. Довготелес //Энергетика и электрификация. – 1996. – №5. – С.9-16.
3. *Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості* /І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.
4. *Екологічні аспекти руйнувань агропромислового обладнання* /В.Д. Макаренко, М.П. Бутко, М.І. Мурашко, М.В. Кіндрачук. – К.: Видавничий Центр НУБіПУ. – 2013. – 423с.
5. *Физико-механические основы сероводородного коррозионного разрушения промышленных трубопроводов* /В.Д. Макаренко, Р.В. Палий, Е.Н. Галиченко и др. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2002. – 412 с.
6. *Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник* /За ред. І.Ф. Малежика. –К.: НУХТ. – 2003. – 400 с.
7. *Романив О.Н., Никифорчин Г.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов.* – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
8. *Ставников В.Н., Баранцев В.И. Процессы и аппараты пищевых производств.* – М.: – Пищевая промышленность. – 1984. – 327 с.

9. Сухенко Ю.Г., Литвиненко О.А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв. – К.: НУХТ. – 2010. – 547 с.
10. Тищенко Г.П., Трофимович А.Н. Повышение долговечности пищевого оборудования. – М.: Агропромиздат. – 1995. – 208 с.
11. *Einige Probleme der Sauerstoff-fahrweise in Anlagen mit Zwangdurchlaufkesseln* /O.I. Martynova, A.B. Vainman // VGB Kraftwerkstechnik. – 2011. – №8. – P.659-663.
12. *NACE Standard TM-01-77(90). Standard Test Method* //NACE. – Houston. P.O.BOX 218340. – 2009. – 22p.
13. *HSLA steels within proved hydrogen sulfide cracking resistance* /G.M. Pressoure, R. Blondeau, L. Cadion //Proc. Conf. Amer. Soc. Metals. – Philadelphia: Pa, 2012. – P.827-843.
14. *Experimental limits of sourer service for tubular steels* /Trucbon M.R., Crolet J.I. //SSC Symposium. – Saint-Cloud. – 21. – 2013p.