

## ВІДНОШЕННЯ СТРУМУ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ДО ГРАНИЧНОГО ДИФУЗІЙНОГО ЯК ДОДАТКОВИЙ КРИТЕРІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

Л. І. Ниркова, С. О. Осадчук, А. В. Клименко, А. О. Рибаків, С. Л. Мельничук

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;  
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11, e-mail: lnyrkova@gmail.com

Досліджено вплив температури та концентрації кисню у розчині NS4 на електрохімічні характеристики сталі X70 та співвідношення густини струму катодного захисту до граничного дифузійного в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів від -0,75 до -1,05 В (х.с.е.). Встановлено, що з підвищенням температури від 20 до 80 °С корозійна активність трубої сталі X70 підвищується, що підтверджено більш від'ємними значеннями потенціалу корозії та зростанням швидкості корозії і вказує на превалюючий вплив температури на процес корозії порівняно із впливом концентрації кисню. В цьому діапазоні температур граничний дифузійний струм має максимальне значення при 40 °С і при підвищенні температури зменшується у кореляції зі зменшенням концентрації кисню. При вільному доступі кисню в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  змінюється від 0,4 до 1,3 за температур (20-40) °С, за температур (60-80) °С співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  менше 1. В умовах обмеженого доступу кисню співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  зростає від 1,1 до 4,7. Використовуючи розрахункові та експериментальні результати, показано, що за різних значень  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  можуть створюватися умови для надмірного виділення водню, що становитиме загрозу для безпечної експлуатації трубопроводу з часом. Дані щодо значень співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  доцільно урахувати під час аналізу стану захисту трубопроводів.

Ключові слова: трубна сталь X70, захисний поляризаційний потенціал, катодний захист, швидкість залишкової корозії, критерії ефективності катодного захисту.

Исследовано влияние температуры и концентрации кислорода в растворе NS4 на электрохимические характеристики стали X70 и соотношение плотности тока катодной защиты к предельному диффузионному, в нормированном ДСТУ 4219 диапазоне защитных поляризационных потенциалов от -0,75 до -1,05 В (х.с.е.). Установлено, что с повышением температуры от 20 до 80 °С коррозионная активность трубої стали X70 повышается, что подтверждается более отрицательными значениями потенциала коррозии и ростом скорости коррозии и указывает на превалирующее влияние температуры на процесс коррозии по сравнению с влиянием концентрации кислорода. В рассмотренном диапазоне температур предельный диффузионный ток имеет максимальное значение при 40 °С и при повышении температуры уменьшается, коррелируя с уменьшением концентрации кислорода. При свободном доступе кислорода в нормированном ДСТУ 4219 диапазоне защитных поляризационных потенциалов соотношение тока катодной защиты к предельному диффузионному  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  меняется от 0,4 до 1,3 при температурах (20-40) °С, при температурах (60-80) °С соотношение  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  меньше 1. В условиях ограниченного доступа кислорода соотношение  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  растет от 1,1 до 4,7. Используя расчетные и экспериментальные результаты показано, что при различных значениях  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  могут создаваться условия для чрезмерного выделения водорода, что представляет угрозу для безопасной эксплуатации трубопровода со временем. Данные относительно значений соотношения  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  целесообразно учитывать при анализе состояния защиты трубопроводов.

Ключевые слова: трубная сталь X70, защитный поляризационный потенциал, катодная защита, скорость остаточной коррозии, критерии эффективности катодной защиты.

The influence of the temperature and oxygen concentration in NS4 solution on the electrochemical characteristics of X70 steel for pipelines and the relationship of cathodic protection current density to limiting diffusion current density, in the normalized DSTU 4219 range of protective polarization potentials from -0.75 V to -1.05 V (ch.s.e.) were investigated. It has been established that with increasing of the temperature from 20 to 80 °C, the corrosion activity of X70 steel increases, which is confirmed by more negative values of corrosion potential and an increasing of the corrosion rate, and indicates on the prevailing effect of temperature on the corrosion process compared to the effect of oxygen concentration. In the temperature range considered, the limiting diffusion current has a maximum

value at 40 °C and decreases with increasing of temperature, correlating with a decreasing of the oxygen concentration. Under conditions of free oxygen access to the NS4 solution in the normalized DSTU 4219 range of protective polarization potentials, the ratio of cathodic protection to limiting diffusion  $j_{cp}/j_{O_2}$  current varies from 0.4 to 1.3 at temperatures (20-40) °C, at temperatures (60-80) °C the ratio  $j_{cp}/j_{O_2}$  is less than 1. Under conditions of limited oxygen access, the ratio  $j_{cp}/j_{O_2}$  increases from 1.1 to 4.7. Using calculated and experimental results, it was shown that, at various values of relationship  $j_{cp}/j_{O_2}$ , conditions for excessive hydrogen evolution can be created, which represents a threat to the safe operation of the pipeline over time. Data on the ratio values  $j_{cp}/j_{O_2}$  should be taken into account when analyzing the protection state of pipelines.

Keywords: steel X70 for pipelines, protective polarization potential, cathodic protection, residual corrosion rate, criteria of cathodic protection efficiency.

### Вступ

Під час обстеження корозійного стану магістральних газопроводів для оцінювання стану їх електрохімічного захисту застосовують критерії, які теоретично і експериментально обґрунтовані та наведені в нормативних документах різних країн в сфері захисту від корозії.

Такими критеріями є мінімальний та максимальний захисні потенціали, мінімальна захисна густина струму, мінімальне захисне зміщення потенціалу (мінімальна поляризація).

В дослідженнях останніх років запропоновано критерій оцінювання стану електрохімічного захисту – співвідношення густини струму катодного захисту до густини граничного дифузійного струму, що дозволяє додатково контролювати початок електролітичного виділення водню та запобігати наводненню стінки труби шляхом керування на окремій ділянці МГ параметрами електрохімічного захисту в діапазонах, зазначених нормативними документами.

Отримання нових даних щодо впливу температури, концентрації кисню та розтягувальних напружень на співвідношення струму катодного захисту та граничного дифузійного струму на трубній сталі X70 у середовищах з рН, близьких до нейтральних.

### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

В сучасному світі сталеві трубопроводи широко застосовуються для транспортування нафти і газу як найбільш економічно ефективний і безпечний засіб. Для захисту їх від зовнішньої корозії використовують полімерні та комбіновані покриття і катодну поляризацію від зовнішнього джерела [1-2].

Оцінювання стану електрохімічного захисту трубопроводів виконують за певними критеріями, які теоретично і експериментально обґрунтовані та наведені в нормативних документах різних країн в сфері захисту від корозії

[3-10]. Такими критеріями є: мінімальний  $E_{min}^{zax}$  та максимальний  $E_{max}^{zax}$  захисні потенціали, мінімальна захисна густина струму  $j_{min}^{zax}$ , мінімальне захисне зміщення потенціалу (мінімальна поляризація)  $\Delta E_{min}^{zax}$  [11].

У вітчизняних стандартах та стандартах країн СНД встановлено мінімальні та максимальні значення захисних потенціалів, у тому числі поляризаційних (без омичної складової) [3-7]. В європейському та американському стандартах нормуються значення потенціалів, які треба застосовувати з урахуванням властивостей ґрунтів [9-10]. Однак, досвід показує, що рекомендовані значення захисного потенціалу інколи можуть бути недостатніми або надлишковими, що викликає складнощі під час експлуатації, що залежать від локальних властивостей ґрунту. Згідно з нормативними документами, захист вважається ефективним, якщо швидкість залишкової корозії не перевищує 0,01 мм/рік. [3, 8]. Однак, точний зв'язок між захисним потенціалом та швидкістю залишкової корозії залишається не визначеним до кінця [12]. Вважають, що катодний захист має бути оптимізованим з урахуванням значення швидкості залишкової корозії [13].

В літературі наведено застереження відносно високих значень захисних потенціалів, яке може призвести до відшаровування покриттів за наявності дефектів та водневого руйнування сталі: треба не допускати поляризаційного потенціалу більш від'ємного, ніж -1,05 до -1,1 В (відносно мідно-сульфатного електроду, м.с.е.) [14].

З термодинаміки відомо, що температура є одним з важливіших чинників корозійних процесів. Згідно з законом Вант-Гоффа [19] швидкість реакції, у тому числі швидкість корозії, з підвищенням температури на 10 °C прискорюється у 2-4 рази:

$$V_{t_2} = V_{t_1} \gamma^{\frac{\Delta t}{10}}, \quad (1)$$

де  $V_{t_2}$  - швидкість реакції за температури  $t_2$ ;

$V_{t_1}$  - швидкість реакції за температури  $t_1$ ;

$\gamma$  - температурний коефіцієнт реакції, що дорівнює 2-3 для більшості реакцій.

Наприклад, приймаючи середнє значення температурного коефіцієнта  $\gamma$  рівним 2, при підвищенні температури від 20 °C до 40, 60 та 80 °C можна очікувати прискорення корозійного процесу відповідно в 4, 16 та 64 разів.

З іншого боку, з підвищенням температури зменшується концентрація кисню в ґрунтовому електроліті, який контактує зі стінкою труб, що сприяє зменшенню швидкості корозії сталі [20]. Катодний потенціал також впливає на корозійний стан металу трубопроводу на різних ділянках. Тому доцільно дослідити вплив різних чинників на електрохімічні характеристики катодного процесу.

**Мета роботи** полягала у дослідженні впливу температури, концентрації кисню та захисного потенціалу на співвідношення струму катодного захисту до граничного дифузійного струму.

#### Матеріали та методи досліджень

Дослідження проводили на зразках трубної сталі контрольованої прокатки X70. Хімічний склад сталі: (ваг. %): 0,095 C; 1,39 Mn; 0,255 Si; 0,005 S; 0,017 P; 0,032 Al; 0,04 Ni; 0,03 Mo; 0,004 Ti; 0,05 V; 0,027 Nb; 0,04 Cr.

Випробування проводили у розчині NS<sub>4</sub> такого хімічного складу (г/л): 0,037 KCl + 0,559 NaHCO<sub>3</sub> + 0,008 CaCl<sub>2</sub> + 0,089 MgSO<sub>4</sub>, pH 8,2 [21]. Розчин готували на дистильованій воді, застосовували реактиви марки ЧДА.

Швидкість корозії визначали методом поляризаційного опору за допомогою корозиметра універсального УИСК-101.

Поляризаційні криві знімали в потенціодинамічному режимі за триелектродною схемою. Застосовували потенціостат ПИ-50-1.1, програматор ПР-8. Реєстрацію струму та потенціалу виконували за допомогою цифрового мультиметра Aggru3500A. Швидкість розгортки потенціалу встановлювали рівною 0,5 мВ/с. Робочим електродом слугував зразок трубної сталі, допоміжним – платиновий, електродом порівняння – насичений хлор-срібний електрод.

Робочий електрод перед випробуваннями шліфували наждаковим папером різної зернистості, знежирювали діоксином магнію, промивали проточною, потім дистильованою водою, висушували фільтрувальним папером. Зразки

витримували у розчині до встановлення потенціалу корозії впродовж 30 хв. Випробування проводили у розчині з вільним доступом кисню та деаерованому аргону розчині.

Температуру робочого розчину встановлювали та підтримували за допомогою термостату MLW UN. Дослідження проводили за температур 20, 40, 60 і 80 °C.

З поляризаційних кривих визначали граничний дифузійний струм, обчислювали відношення струму катодного захисту за різних захисних потенціалів до граничного дифузійного струму.

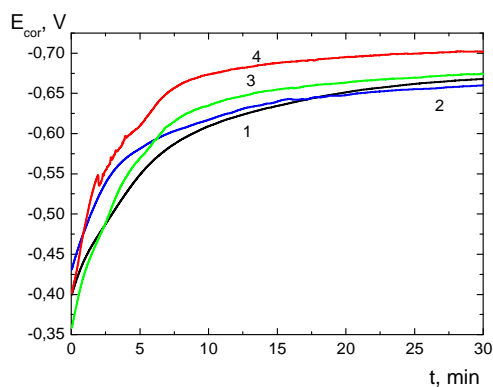
#### Результати досліджень та їх обговорення

*Вплив температури на співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  в умовах вільного доступу кисню*

На рис. 1 наведено, як змінюється потенціал корозії в часі за різних температур. Аналізуючи експериментальні дані, можна відмітити, що потенціал корозії сталі X70 при 20 °C (рис. 1, крива 1) спочатку швидко зміщуються у від'ємний бік впродовж 7-10 хв, потім процес уповільнюється, і через 30 хв потенціал досягає значення близько -0,667 В. З підвищенням температури характер зміни потенціалу залишається таким самим, але його стабілізування відбувається через менший проміжок часу (рис. 1 криві 2-4); потенціал корозії за температур 40, 60 і 80 °C досягає значень -0,659, -0,674 і -0,704 В відповідно. Зміщення потенціалу до більш від'ємних значень свідчить про можливість прискорення корозійного процесу з підвищенням температури.

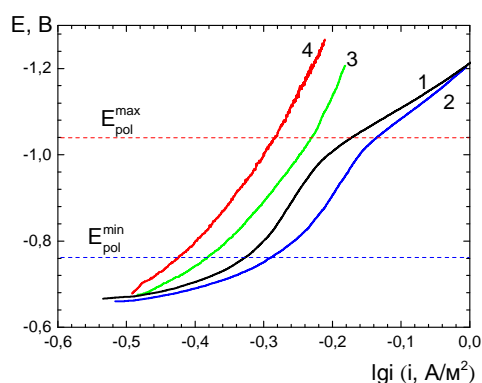
З підвищенням температури швидкість корозії також збільшувалася – від 0,038 мм/рік при 20 °C до 0,235 мм/рік при 80 °C, не зважаючи на зменшення концентрації розчиненого кисню (рис. 2). Найбільш різке зростання швидкості корозії спостерігається при підвищенні температури від 40 до 80 °C, що вказує на превалюючий вплив температури на швидкість корозії сталі X70 порівняно із впливом концентрації кисню.

Таким чином, при підвищенні температури від 20 до 80 °C, що згідно з літературними даними відповідає зменшенню концентрації розчиненого кисню в розчині втричі (від 9,1 мг/дм<sup>3</sup> при 20 °C до 2,9 мг/дм<sup>3</sup> при 80 °C) потенціал корозії зміщується близько на 37 мВ в бік більш негативних значень. Це корелює з ростом швидкості корозії і свідчить про прискорення корозії і превалюючий вплив температури на швидкість процесу.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C

**Рисунок 1 – Зміна потенціалу корозії сталі X70 в часі у розчині NS4 в умовах вільного доступу кисню за різних температур**



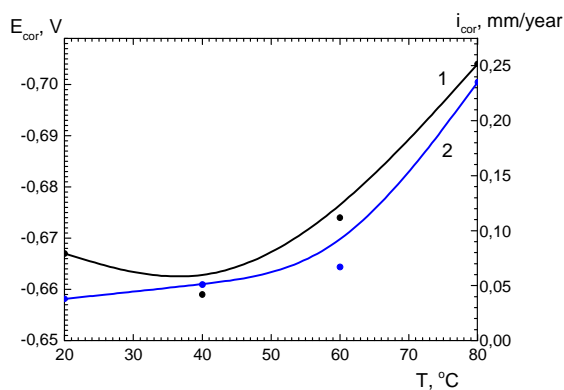
1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C

**Рисунок 3 – Катодні поляризаційні криві сталі X70 у розчині NS4 в умовах вільного доступу кисню за різних температур**

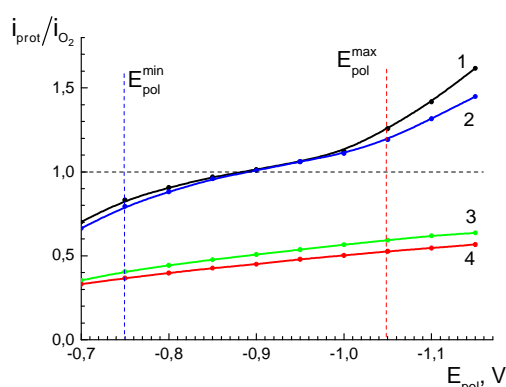
На рис. 3 представлені катодні поляризаційні криві трубної сталі X70 в розчині NS4 за різних температур. З кривих обчислювали густину граничного дифузійного струму і струму катодного захисту за різних захисних поляризаційних потенціалів та аналізували їх співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$ .

Експериментально отримано, що з підвищенням температури від 20 до 40 °C густина граничного дифузійного струму незначно зросла – від 0,55 A/m² до 0,63 A/m², потім з підвищенням температури до 80 °C зменшилася до 0,32 A/m², що корелює із зменшенням концентрації кисню з ростом температури. Тобто при трикратному зменшенні концентрації кисню в розчині (від 9,1 мг/дм³ при 20 °C до 2,9 мг/дм³ при 80 °C) густина граничного дифузійного струму зменшилася майже в два рази.

Обчислені згідно з [20] значення граничного дифузійного струму за кімнатної температури у воді становлять від 5,0 A/m² до 0,05 A/m².



**Рисунок 2 – Зміна потенціалу корозії (1) та швидкості корозії (2) сталі X70 залежно від температури у розчині NS4 в умовах вільного доступу кисню**



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C

**Рисунок 4 – Зміна співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  для сталі X70 у розчині NS4 в умовах вільного доступу кисню залежно від потенціалу за різних температур**

Можна припустити, що за концентрації кисню у деаерованому розчині, яка наближається до 0, граничний струм відновлення кисню також буде наближатися до 0.

Залежність співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  за температур 20, 40, 60 та 80 °C від захисного потенціалу (поляризаційного) представлено на рис. 4. Видно, що в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних потенціалів (від -0,85 В до -1,15 В відносно мідносульфатного електроду порівняння, що відповідає -0,75 В до -1,05 В відносно хлорсрібного електроду порівняння, який застосовували в дослідженнях), значення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  не перевищують 1,3. За температури 20 та 40 °C значення співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  дещо більші, ніж за температури, 60 і 80 °C. В діапазоні захисних потенціалів від -0,75 В до -0,90 В за всіх температур співвідношення  $i_{к.з.}/i_{O_2}$  менше 1. При більш від'ємних за -0,9 В значеннях потенціалу за температури 20 і 40 °C

співвідношення  $j_{k.z.}/j_{O_2}$  більше 1. Імовірно, якщо  $j_{k.z.}/j_{O_2}$  перевищує 1 виникають умови для переважного відновлення водню.

Як зазначалося вище, якщо швидкість залишкової корозії не перевищує 0,01 мм/рік, досягнуто технічно допустимий захисний ефект [3]. Для температур від 20 до 60 °С та потенціалів в діапазоні від -0,75 В до -1,05 В обчислювали швидкість залишкової корозії згідно з ДСТУ 4219:

$$i_{k.z.} = i_k \cdot 10^{\frac{E_{пол} - E_{кор}}{b_a}}, \quad (2)$$

де  $i_{k.z.}$  – швидкість залишкової корозії металу трубопроводу в дефекті захисного покриття;

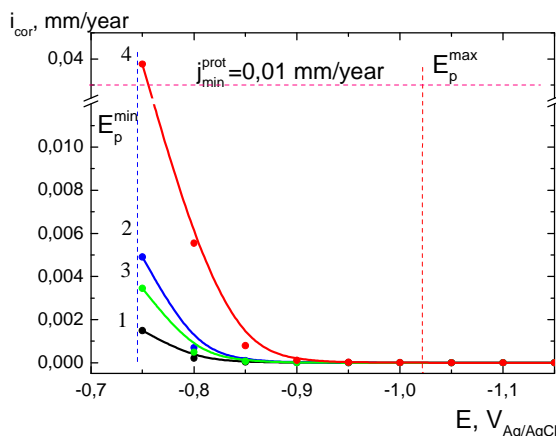
$i_k$  – швидкість корозії металу у досліджуваному середовищі;

$E_{пол}$  – захисний поляризаційний потенціал;

$E_{кор}$  – потенціал корозії;

$b_a$  – тафелевський нахил анодної поляризаційної кривої.

Аналіз залежності швидкості залишкової корозії у розчині NS4 від потенціалу за різних температур для умов вільного доступу кисню (рис. 5) показав, що в діапазоні температур від 20 до 60 °С захисний ефект досягається вже за потенціалу -0,75 В, а при 80 °С – за потенціалу -0,8 В. Тобто логічно припустити, що подальше зміщення захисного потенціалу до більш від'ємного не впливатиме на зменшення швидкості залишкової корозії, але створює умови для надлишкового виділення водню.



1 – 20 °С; 2 – 40 °С; 3 – 60 °С; 4 – 80 °С

**Рисунок 5 – Зміна швидкості залишкової корозії, обчисленої згідно з ДСТУ 4219, в розчині NS4 в умовах вільного доступу кисню залежно від потенціалу за різних температур**

Тому можна припустити, що за температур понад 60 °С в умовах вільного доступу кисню за поляризаційного потенціалу більш

від'ємного ніж -0,85 В, умови для надмірного виділення водню можуть створюватися раніше, навіть якщо значенні співвідношення  $j_{k.z.}/j_{O_2}$  менше 1.

*Вплив температури на співвідношення  $j_{k.z.}/j_{O_2}$  в умовах обмеженого доступу кисню.*

Як зазначалося вище, залежно від типу ґрунту та глибини, на якій прокладено трубопровід, концентрація кисню може бути дуже малою, що сприятиме значному зменшенню граничного дифузійного струму, який входить до співвідношення  $j_{k.z.}/j_{O_2}$ .

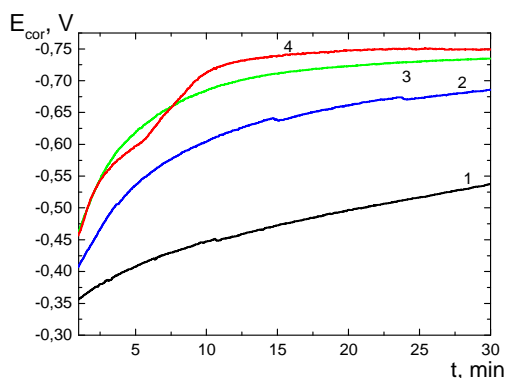
В лабораторних умовах моделювали обмежений доступ кисню деаеруванням розчину NS4 аргеном.

Зміну потенціалу корозії від часу за різних температур в деаерованому розчині NS4 наведено на рис. 6. Як і в умовах вільного доступу кисню, потенціал корозії сталі X70 при всіх температурах зміщувався в негативний бік впродовж близько 10 хв, потім процес уповільнювався. Через 30 хв потенціал досягав майже стаціонарних значень, які є тим від'ємнішими, чим вища температура розчину.

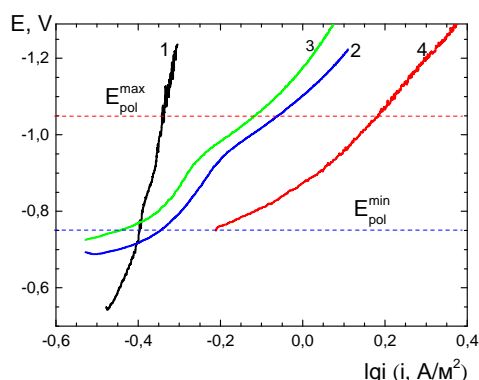
З підвищенням температури деаерованого розчину швидкість корозії також збільшувалася – від 0,025 мм/рік до 0,215 мм/рік, не зважаючи на те, що концентрація кисню при всіх температурах наближалася до нуля (рис. 7). Найбільш різке зростання швидкості корозії спостерігалось при підвищенні температури від 40 до 80 °С, що корелювало із більш швидким зміщенням потенціалу корозії в область більш від'ємних значень.

Підсумовуючі експериментальні результати, можна відмітити, що в деаерованому розчині з підвищенням температури від 20 до 80 °С потенціал корозії зміщується на близько 130 мВ в бік більш від'ємних значень, що корелює із ростом швидкості корозії сталі X70 та свідчить про прискорення корозійного процесу з температурою.

Катодні поляризаційні криві сталі X70 в деаерованому розчині NS4 суттєво відрізняються від кривих, отриманих в розчині в умовах вільного доступу кисню тим, що вже за температури 20 °С ділянка граничного дифузійного струму практично відсутня (рис. 8 крива 1). Інтенсивне виділення водню за таких умов починається за потенціалу близько -0,95 В. Оцінене значення граничного дифузійного струму становило близько (0,32-0,4) А/м<sup>2</sup>, що узгоджується з літературними даними, відповідно до яких максимальне значення граничного дифузійного



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C  
Рисунок 6 – Зміна потенціалу корозії сталі X70 в часі у деаерованому розчині NS4 за різних температур



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C  
Рисунок 8 – Катодні поляризаційні криві сталі X70 у деаерованому розчині NS4 за різних температур

струму в закритих системах не може бути більшою, ніж 0,70 А/м² [22]. Для обчислення співвідношення  $j_{K.3.}/j_{O_2}$  для деаерованих умов використовували мінімальне визначене значення граничного дифузійного струму – 0,32 А/м².

Залежність співвідношення  $j_{K.3.}/j_{O_2}$  за температур 20, 40, 60 та 80 °C від захисного потенціалу (поляризаційного) представлено на рис. 9. В умовах обмеженого доступу кисню в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних потенціалів значення  $j_{K.3.}/j_{O_2}$  за температур від 20 до 80 °C зростають від 1,1 до 4,7. Найбільш швидко це відбувається за температури 80 °C, і, починаючи з потенціалу -0,85 В,  $j_{K.3.}/j_{O_2}$  стає вище 3.

Аналіз залежності швидкості залишкової корозії, обчисленої згідно з ДСТУ 4219, в деаерованому розчині NS4 від потенціалу за різних температур (рис. 10) показав, що в діапазоні температур від 20 до 40 °C зміщення потенціалу до -0,75 В, а за температур понад 60 °C –

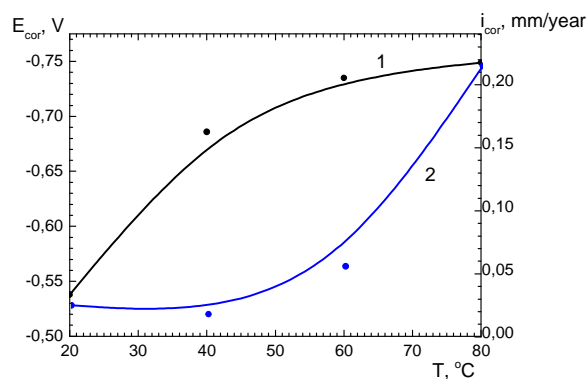
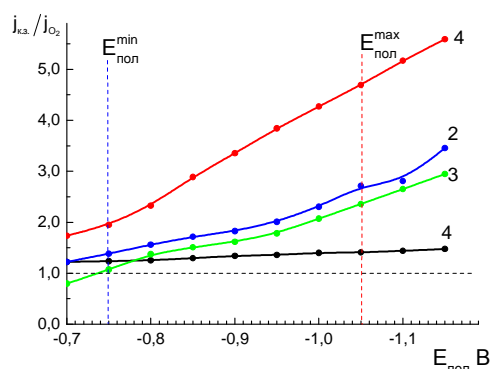
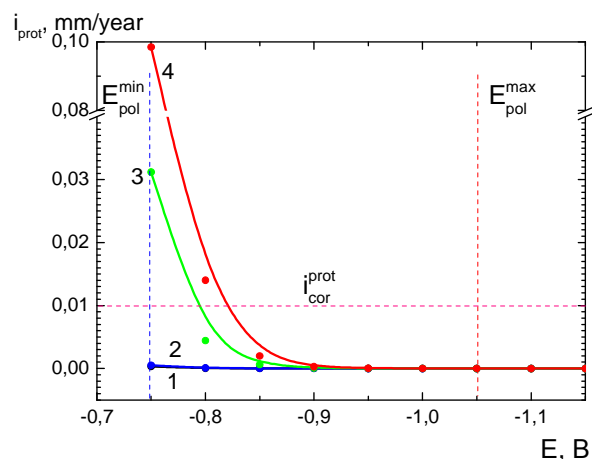


Рисунок 7 – Зміна потенціалу корозії (1) сталі X70 та швидкості корозії (2) у деаерованому розчині NS4 залежно від температури



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C  
Рисунок 9 – Зміна співвідношення  $j_{K.3.}/j_{O_2}$  для сталі X70 в деаерованому розчині NS4 залежно від потенціалу за різних температур



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C; 4 – 80 °C  
Рисунок 10 – Зміна швидкості залишкової корозії, обчисленої згідно з ДСТУ 4219 в деаерованому розчині NS4 залежно від потенціалу за різних температур

до -0,85 В достатнє, щоб забезпечити захисний ефект, за якого швидкість залишкової корозії менше 0,01 мм/рік. Тобто подальше зміщення

## Література

потенціалу у від'ємний бік практично не впливатиме на зменшення швидкості залишкової корозії, а викликатиме надлишкове виділення водню.

Таким чином, в умовах обмеженого доступу кисню умови для надмірного виділення водню створюються: за температур 20-40 °C – за поляризаційного потенціалу, більш від'ємного ніж -0,75В, коли значення співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  знаходиться біля 1; за температури 60 °C за поляризаційного потенціалу, більш від'ємного ніж -0,80 В,  $j_{к.з.}/j_{O_2} > 1$ , за температури 80 °C – за поляризаційного потенціалу, більш від'ємного ніж -0,85 В, коли  $j_{к.з.}/j_{O_2} > 3$ .

## Висновки

**1** З метою отримання додаткової інформації щодо стану катодного захисту підземних трубопроводів досліджено вплив температури та концентрації кисню на електрохімічні характеристики сталі Х70 та співвідношення густини струму катодного захисту до граничного дифузійного в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів від -0,75 до -1,05 В (х.с.е.) у розчині NS4.

**2** Встановлено, що з підвищенням температури від 20 до 80 °C потенціал корозії трубної сталі Х70 зміщується в бік більш від'ємних значень, що корелює з ростом швидкості корозії та свідчить про прискорення корозійного процесу і превалюючий вплив температури на його швидкість порівняно із впливом концентрації кисню.

**3** В умовах вільного доступу кисню в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  змінюється від 0,4 до 1,3 за температур (20-40) °C; за підвищених температур (60-80) °C співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  менше 1. В умовах обмеженого доступу кисню співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  змінюється від 1,1 до 4,7. Враховуючи значення швидкості залишкової корозії, за яких досягається захисний ефект, показано, що умови для надмірного виділення водню створюються за різних значень  $j_{к.з.}/j_{O_2}$ . Дані щодо значень співвідношення  $j_{к.з.}/j_{O_2}$  доцільно урахувати під час аналізу стану захисту трубопроводів.

1. KeYin YaoYang & Y.Frank Cheng. Permeability of coal tar enamel coating to cathodic protection current on pipelines. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 192, 20. pp. 20-27.
2. Y. Frank Cheng. Stress Corrosion Cracking of Pipelines. Hoboken: John Wiley&Sons Publishing. 2013. 257 p.
3. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. Нац. стандарт України. Вид. офіц. [Чинний від 2003-12-01]. Київ : Держспоживстандарт України . 2003. 68 с.
4. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. [Чинний від 1999-07-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. 42 с.
5. ГОСТ 9.602-2005 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006. 59 с.
6. ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии [Чинний від 2017-06-01]. М.: Стандартинформ, 2016. 93 с.
7. ДСТУ Б В.2.5-29:2006 Инженерное оборудование зданий и споруд. Внешние сети та споруди. Система газопостачання. Газопроводи підземні сталеві. Загальні вимоги до захисту від корозії. Нац. стандарт України. Вид. офіц. [Чинний від 2007-06-01]. Київ: Мінбуд України, 2006. 130 с.
8. ДСТУ EN 12954:2016 Захист катодний підземних та підводних металевих споруд. Основні принципи та використання для трубопроводів (EN 12954:2001, IDT).
9. EN 12954:2001 Cathodic protection of buried or immersed metallic structures – General principles and application for pipeline (2001).
10. NACE SP0169-2007 (formerly RP0169) Parts incorporated in pipeline safety regulations Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems
11. Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 2004. 320 с.
12. Influence of soil moisture on the residual corrosion rates of buried carbon steel structures under cathodic protection / D. Nguyen Dang, L. Lanarde, M. Jeannin, R. Sabot, Ph. Refait. *Electrochimica Acta*. V. 176, 2015. pp. 1410-1419.
13. Electrochemical study of the corrosion rate of carbon steel in soil: Evolution with time and



determination of residual corrosion rates under cathodic protection M.Barbalat, L.Lanarde, D.Caron, M.Meyer, J.Vittonato, F.Castillon, S.Fontaine, Ph.Refait *Corrosion Science*. 2012.V. 55. pp. 246-253.

14. Peabody's Control of pipeline corrosion / Ed. by Ronald L. Bianchetti; 2-nd ed. NACE International The Corrosion Society. 1440 South Creek Drive, Houston, Texas. 2001. P. 347.

15. Хижняков В.И. О контролирующей роли плотности тока катодной защиты при образовании коррозионных и стресс-коррозионных дефектов на внешней поверхности магистральных газонефтепроводов. *Вестник ТГУ*. 2013. т. 18, вып. 5. С. 2248-2252.

16. Хижняков В.И., Кудашкин Ю.А., Хижняков М.В., Жилин А.В. Коррозионное растрескивание напряженнодеформированных трубопроводов при транспорте нефти и газа. *Известия ТГУ*. 2011. т. 319, № 3. С.84-89.

17. Хижняков В.И. Влияние режимов катодной защиты на степень подавления коррозии и на наводороживание стали 17ГС. *Всероссийская конференция по физической химии и нанотехнологиям «НИФХИ-90»*: сборник тезисов. Москва, 2008. С. 178-179.

18 Хижняков В.И. Развитие научных основ, разработка и реализация новых критериев эффективности электрохимической защиты трубопроводов от коррозии. Дисс. ... докт. техн. наук : 05.17.03. Томск, 2010. 357 с.

19 Семиохин И.А. Физическая химия: учебник. Изд-во МГУ, 2001. 272 с.

20 Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.

21 Szklarska-Smialowska K Z., Xia Z., Rebak R.B. Technical note: stress corrosion cracking of X-52 carbon steel in dilute aqueous solutions. *Corrosion*. Vol.50. No.5. 1994. pp.334-338.

22 URL: <http://www.ngpedia.ru/pic/107R4ir3u3u228c5f1d90013107253.png> (дата звернення 17.11.2017)

### References

1 KeYin YaoYang & Y.Frank Chen 2018, Permeability of coal tar enamel coating to cathodic protection current on pipelines. *Construction and Building Materials*. Vol. 192, 20. pp. 20-27.

2. Y. Frank Cheng. Stress Corrosion Cracking of Pipelines. Hoboken: John Willey&Sons Publishing. 2013. 257 p.

3 DSTU 4219-2003. Steel main pipelines. General requirements for corrosion protection. Nat. standard of Ukraine. View. offic. [Valid from 2003-12-01]. Kiev: State Consumer Standard of

Ukraine. 2003. 68 p. (in Ukrainian) <http://ik-izol.com/wp-content/uploads/2014/12/dstu-4219-2003.pdf>

4 GOST R 51164-98 Truboprovody stal'nye magistral'nye. [Steel main pipelines. General requirements for corrosion protection]. [Valid from 1999-07-01]. Ed IPK Izdatel'stvo standartov. Moscow, 1998. 42 p. (in Russian)

5 GOST 9.602-2005 Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii [Unified system of protection against corrosion and aging treatment. Underground facilities. General requirements for corrosion protection]. Standartinform Moscow, 2006. 59p. (in Russian)

6 GOST 9.602-2016 Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemnye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii [Unified system of protection against corrosion and aging treatment. Underground facilities. General requirements for corrosion protection] [Valid from 2017-06-01]. Standartinform. Moscow, 2016. 93 p. (in Russian)

7 DSTU B V.2.5-29:2006 Inzhenerne obladnannia budynkiv i sporud. Zovnishni merezhi ta sporudy. Systema hazopostachannia. Hazoprovody pidzemni stalevi. Zahalni vymohy do zakhystu vid korozii [Engineering equipment of buildings and structures. External networks and structures. Gas supply system. Gas pipelines underground steel. General requirements for corrosion protection]. Nats. standart Ukrainy. [Valid from 2007-06-01]. Minbud Ukrainy. Kyiv, 2006. 130 p. (in Ukrainian)

8 DSTU EN 12954:2016 Zakhyst katodnyi pidzemnykh ta pidvodnykh metalevykh sporud. Osnovni pryntsypy ta vykorystannia dlia truboprovodiv [Protection of cathodic underground and underwater metal structures. Basic principles and uses for pipelines] (EN 12954:2001, IDT). (in Ukrainian)

9 EN 12954:2001 Cathodic protection of buried or immersed metallic structures – General principles and application for pipeline (2001).

10 NACE SP0169-2007 (formerly RP0169) Parts incorporated in pipeline safety regulations Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems

11 Tkachenko, VN 2004, Elektrokhimicheskaya zashchita truboprovodnykh setey [Electrochemical protection of pipeline networks]. Stroyizdat. Moscow.320 p. (in Russian)

12 Nguyen Dang, D, Lanarde, L, Jeannin, M, Sabot, R & Refait Ph 2015, Influence of soil moisture on the residual corrosion rates of buried



carbon steel structures under cathodic protection. *Electrochimica Acta*. Vol. 176, pp. 1410-1419.

13 Barbalat, M., Lanarde, L., Caron, D., Meyer, M., Vittonato, J., Castillon, F., Fontaine S., Refait Ph. 2012, Electrochemical study of the corrosion rate of carbon steel in soil: Evolution with time and determination of residual corrosion rates under cathodic protection. *Corrosion Science*. V. 55. pp. 246-253.

14 Edited by RONALD L. BIANCHETTI 2001. Peabody's Control of pipeline corrosion. *NACE International The Corrosion Society*. 1440 South Creek Drive, Houston, Texas. p. 347.

15 Khizhnyakov, VI 2013. O kontroliruyushchey roli plotnosti toka katodnoy zashchity pri obrazovanii korrozionnykh i stress-korrozionnykh defektov na vneshney poverkhnosti magistral'nykh gazonefteprovodov [Role of current density in oil and gas trunk pipeline cathodic protection for monitoring corrosion and stress-corrosion defects]. Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences Vil. 18, vyp. 5. pp. 2248-2252. (in Ukrainian)

16 Khizhnyakov, VI, Kudashkin, YuA, Khizhnyakov, MV & Zhilin, AV 2011, Korrozionnoe rastreskivanie napryazhenno-deformirovannykh truboprovodov pri transporte nefiti i gaza [Corrosion cracking of stress-strain pipelines during oil and gas transport] *Izvestiya TGU [News of TSU]*. Vol. 319, no. 3. pp. 84-89. (in Russian) <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/3908>

17 Khizhnyakov, VI. 2008. Vliyanie rezhimov katodnoy zashchity na stepen' podavleniya korrozii i na navodorozhivanie stali 17GS. [The effect of cathodic protection modes on the degree of corrosion suppression and on hydrogen hydrogenation of 17GS steel] All-Russian Conference on Physical Chemistry and Nanotechnology "NIFHI-90"/ Moscow. pp. 178-179. (in Russian)

18 Khizhnyakov VI 2010. Razvitie nauchnykh osnov, razrabotka i realizatsiya novykh kriteriev effektivnosti elektrokhimicheskoy zashchity truboprovodov ot korrozii. [Development of scientific foundations, development and implementation of new criteria for the effectiveness of electrochemical protection of pipelines against corrosion]. Diss. ... doctor. tech. sciences: 05.17.03. Tomsk, 2010. 357 p. (in Russian)

19 Semiokhin, IA 2001, Fizicheskaya khimiya [Physical Chemistry]. Ed MGU. 272 p.

20 Zhuk, NP 1976, Kurs teorii korrozii i zashchity metallov [The course of the theory of corrosion and metal protection]. Metallurgiya. Moscow. 472 p. (in Russian)

21 Szklarska-Smialowska, KZ, Xia, Z & Rebak, RB 1994, Technical note: stress corrosion cracking of X-52 carbon steel in dilute aqueous solutions. *Corrosion*. Vol. 50. no. 5. pp. 334-338.

22 <http://www.ngpedia.ru/pic/107R4ir3u3u228c5f1d90013107253.png>