

МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 620.197.5:544.636/638

DOI: 10.31471/1993-9965-2020-1(48)-7-15

ВПЛИВ КОРОЗІЙНОЇ АКТИВНОСТІ СЕРЕДОВИЩА НА ШВИДКІСТЬ ЗАЛИШКОВОЇ КОРОЗІЇ СТАЛІ В НОРМОВАНОМУ ДІАПАЗОНІ ЗАХИСНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ

Л. І. Ниркова*, С. О. Осадчук, А. В. Клименко

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

Наведено результати досліджень впливу корозійної активності середовища на швидкість залишкової корозії вуглецевої сталі в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних потенціалів. Показано, що цей показник залежить від низки чинників – поляризаційного потенціалу, тривалості випробувань та рН. Продемонстровано зменшення швидкості залишкової корозії зі збільшенням (за абсолютним значенням) захисного потенціалу для середовищ з рН від 5,6 до 9,6. Показано, що при однаковому захисному потенціалі впродовж 8 годин у цих середовищах швидкість залишкової корозії сталі різна. При мінімальному потенціалі $-0,75$ В у середовищах зі слабкокислим та сильнолужним рН (5,6 та 9,6, відповідно) захисний ефект (тобто зменшення швидкості корозії до значень менше $0,01$ мм/рік) не досягається. Мінімальні значення швидкості корозії, які встановлюються, дорівнюють $0,021$ та $0,040$ мм/рік, і можуть виникати умови для перебігу локальної корозії. У слаболужному середовищі (рН 8,2) захисний ефект досягається за потенціалу $-0,72$ В, і за мінімального потенціалу катодний захист є ефективним. Зі збільшенням тривалості досліджень до 1 місяця для всіх середовищ захисний ефект досягнутий за мінімального захисного потенціалу, та при його збільшенні (за абсолютним значенням) можливий розклад водного розчину, який супроводжується відновленням водню. Швидкість залишкової корозії в розчинах з різним рН змінюється із часом: через малий термін випробувань (до 8 годин) – зменшується нелінійно, при збільшенні часу випробувань (до 1 місяця) – спостерігається неоднозначна залежність від потенціалу з мінімальними значеннями в області слаболужного рН.

Ключові слова: вуглецева сталь, захисний поляризаційний потенціал, катодний захист, швидкість залишкової корозії, корозивне середовище.

Представлены результаты исследований влияния коррозионной активности среды на скорость остаточной коррозии углеродистой стали в нормированном ДСТУ 4219 диапазоне защитных потенциалов. Показано, что этот показатель зависит от ряда факторов – поляризационного потенциала, продолжительности испытаний и рН. Продемонстрировано уменьшение скорости остаточной коррозии с увеличением (по абсолютному значению) защитного потенциала для сред с рН в диапазоне от 5,6 до 9,6. Показано, что при одинаковом защитном потенциале в течение 8 часов в этих средах скорость остаточной коррозии стали разная. При минимальном потенциале $-0,75$ В в средах со слабкокислым и сильнощелочным рН (5,6 и 9,6, соответственно) защитный эффект (т.е. уменьшение скорости коррозии до значений менее $0,01$ мм/год) не достигается. Минимальные устанавливаемые значения скорости коррозии равны $0,021$ и $0,040$ мм/час, и могут возникать условия для протекания локальной коррозии. В слабощелочной среде (рН 8,2) защитный эффект достигается при потенциале $-0,72$ В, и при минимальном защитном потенциале катодная защита эффективна. С увеличением продолжительности исследований до 1 месяца во всех средах защитный эффект достигнут при минимальном защитном потенциале, и при его увеличении (по абсолютному значению) возможно разложение водного раствора, сопровождающееся восстановлением водорода. Скорость остаточной коррозии в растворах с разными рН изменяется во времени: при незначительном сроке испытаний (до 8 часов) – уменьшается неллинейно, при увеличении срока испытаний до

1 месяца наблюдается неоднозначная зависимость от потенциала с минимальными значениями в области слабощелочного рН.

Ключевые слова: углеродистая сталь, защитный поляризационный потенциал, катодная защита, скорость остаточной коррозии, коррозионно-активная среда.

The study results of the effect of environment's corrosivity on residual corrosion of carbon steel in specified by DSTU 4219 range of protective potentials are presented. It is shown that this index depends on a number of factors – the polarization potential, test duration and pH value. The decrease of residual corrosion rate with increase (in absolute value) of protection potential for environments with pH in the range from 5.6 to 9.6 are demonstrated. It is shown that under the same protective potential during 8 hours in these environments, the residual corrosion rate of steel is different. At a minimum potential of -0.75 V in the environment with low acidic and strongly alkaline pH (5.6 and 9.6, respectively) the protective effect (i.e. a decrease of the corrosion rate to the values less than 0.01 mm/year) is not achieved. The minimum values of corrosion rates, 0,021 and 0,040 mm/year, and conditions for the local corrosion can form. In slightly alkaline environment (pH of 8.2) the protective effect is achieved at the potential of -0,72 V, and minimum protective potential the cathodic protection is effective. With the increase of the duration of investigations up to 1 month in all environments the protective effect is achieved at the minimum protection potential, and if it increases (in absolute value) decomposition of an aqueous solution, accompanied by hydrogen recovery. The residual corrosion rate in solutions with different pH varies with time: through a short test time (near 8 hours) decreases nonlinearly with increasing the test time (up to 1 month) – a complex dependence on the potential with the minimum values in the area of alkaline pH is observed.

Keywords: carbon steel, protective polarization potential, cathodic protection, residual corrosion rate, corrosive environment.

Вступ

Відповідно до вимог нормативних документів різних країн підземні трубопроводи підлягають комплексному захисту від впливу зовнішнього середовища полімерними захисними покриттями та наведенням катодної поляризації. Однак, досвід експлуатації МГ свідчить, що значення захисних потенціалів можуть бути недостатніми, щоб забезпечити задовільний захист трубопроводу або невиправдано високими, або навіть важкозастосовними, що залежить від локальних властивостей ґрунту [1, 2]. Щоб оцінити ефективність захисту використовують швидкість залишкової корозії.

Швидкість залишкової корозії металу в дефекті захисного покриття – швидкість корозії за максимального захисного потенціалу, що забезпечує зниження швидкості корозії зовнішньої стінки трубопроводу до технічно допустимого рівня (менше ніж 0,01 мм/рік) без негативного впливу на метал та захисне покриття або за мінімального захисного потенціалу, який забезпечує зниження швидкості корозії зовнішньої стінки трубопроводу до технічно допустимого рівня.

В ДСТУ 4219 також наведено, що захисним вважають потенціал, який забезпечує технічно достатній захисний ефект, за якого швидкість корозії металу трубопроводу менше 0,01 мм/рік.

Однак, зв'язок між рівнем поляризації і швидкістю залишкової корозії все ще не вивчений до кінця [3].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Корозію вуглецевої сталі в ґрунтах вивчено досить ретельно, запропоновано багато методів оцінки корозійної активності ґрунту, описано вплив різних чинників, таких як ступінь аерації, кислотність, вологість, різновид іонів, питомий електричний опір та мікробіологічна активність [4-13]. Зроблені спроби зіставити швидкість ґрунтової корозії сталі з питомим електричним опором ґрунту [14]. Іноді рН ґрунту і його питомий опір розглядають як основні чинники, що визначають його корозійну активність [5].

Кислотність ґрунту змінюються залежно від загальної мінералізації ґрунтових вод та присутності в них мінеральних кислот [4]: сильнокислі (3 – 4,5), кислі (4,5 – 5,5), слабокислі (5,5 – 6,5), нейтральні (6,5 – 7,0), слаболужні (7,0 – 7,5), лужні (7,5 – 8,5), сильнолужні (8,5 та вище). Корозійна активність ґрунтового електроліту підвищується у міру зниження його рН.

Швидкість корозії заліза в області рН від 4 до 10 не залежить від концентрації водневих іонів. В електролітах, що не перемішуються, швидкість корозії заліза визначається швидкістю дифузії кисню до поверхні металу, і металева поверхня за цих умов знаходиться в контакті з розчином, насиченим гідратованим гідроксидом заліза (II), рН якого становить 9,5. При рН < 4 плівка гідроксиду заліза (II) розчиняється; катодним процесом є відновлення іонів водню, внаслідок чого відбувається прискорене розчинення заліза. При рН > 10 швидкість корозії знижується в результаті пасивації заліза, а

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості досліджуваних розчинів

Склад розчину	Назва показників	
	pH	Питомий опір, Ом·м
1,92 г/л HCOOH + 54,5 г/л HCOONa + 10 г/л KCNS	5,6	0,268
0,037KCl + 0,559 NaHCO ₃ + 0,008CaCl ₂ + 0,089 MgSO ₄	8,2	12,2
0,1 M NaHCO ₃ + 0,1 M Na ₂ CO ₃	9,6	0,548

потім при pH > 13 швидкість корозії збільшується внаслідок розчинення пасивної оксидної плівки на залізі в концентрованому лузі [15].

Найменша корозійна активність ґрунтів відносно заліза спостерігається, якщо pH знаходиться в діапазоні від 10 до 14 [6, 16], але деякі дослідники [4] відмічали, що сильнолужні ґрунти (pH > 8,5) є потенційно корозійно-активними відносно вуглецевої сталі.

В літературі наведено дані обстеження газопроводів в шурфах в південних та помірних кліматичних зонах Росії, в яких показано, що pH змінювався в межах від 4 до 8,5 [17]. Швидкість корозії сталі під відшарованим покриттям зі збільшенням pH має слабо виражену тенденцію до зниження. Великий розкид даних пояснюють переважаючим впливом інших чинників на швидкість корозії за різних pH [28]. Збільшення pH особливо сильно впливає на швидкість корозії у разі контролю процесу корозії реакцією розряду іонів водню [26].

За наявності у ґрунті водорозчинних солей його електропровідність збільшується. Найбільш сильно підвищують корозійну активність ґрунту депасивуюча дія іони Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, присутність яких знижує pH і підвищує корозійну активність. Аміак також добре розчиняється в ґрунтового електроліті, але він утворює основу і підвищує значення pH, що гальмує корозію заліза. Розчинений в ґрунтового електроліті кисень також підвищує його корозійну активність відносно сталі. Слід зазначити, що склад ґрунтового електроліту, склад ґрунтового повітря та їх вміст в ґрунті є показниками, що залежать від багатьох зовнішніх і внутрішніх чинників і змінюються під час експлуатації трубопроводу [5].

Наявні дані, що в різних ґрунтах з pH 5,5-7,5 (торф, глина, пісок) при різній вологості, швидкість залишкової корозії сталей трубного сортаменту не перевищує 0,005-0,007 мм/рік при практичній відсутності виділення водню на зовнішній катодно-захищеній поверхні трубопроводу. Тому потенціали катодного захисту магістральних газонафтопроводів необхідно вибирати з урахуванням перебігу на зовнішній катодно-захищеній поверхні парціальних електрохімічних реакцій, не допускаючи електролі-

тичного катодного наводнення приповерхневого шару стінки труби [18].

Проведення досліджень в цьому напрямку і отримання нових даних дозволить точніше урахувати вплив середовища та оптимізувати ефективність катодного захисту.

Мета роботи полягала у дослідженні залежності швидкості залишкової корозії сталі від корозійної активності середовища.

Матеріали та методи досліджень

Дослідження проводили на зразках вуглецевої сталі марки 08кп.

Випробування проводили у розчинах, в яких за даними різних дослідників спостерігали корозійне розтріскування магістральних трубопроводів табл. 1:

- модельний ґрунтовий електроліт NS4 (розчин з pH, близьким до нейтрального, для дослідження корозійного розтріскування. Цей розчин найближчий за хімічним складом до складу витяжок з ґрунту та ґрунтових вод на території України) [13];

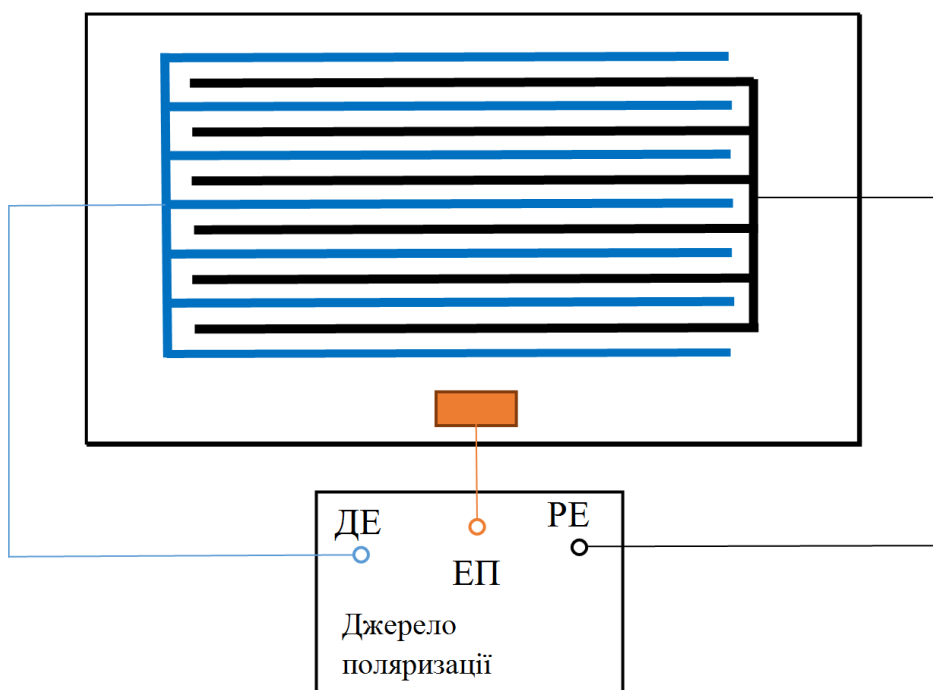
- розчин на основі мурашиної кислоти (кислий розчин для дослідження корозійного розтріскування [12]);

- карбонат-гідрокарбонатний розчин (лужний розчин для дослідження корозійного розтріскування. В розчинах такого складу відбувається корозійне розтріскування за високих pH. Перші випадки КР зареєстровані саме в карбонатомісних середовищах [19]).

Випробування проводили за температури (25±2) °C в умовах вільного доступу кисню.

Швидкість залишкової корозії оцінювали методом масометрії за стандартною методикою. Перед дослідженнями поверхню зразка зачищали наждаковим папером різної зернистості (мінімальна – 2000), знежирювали оксидом магнію, промивали проточною, потім дистильованою водою, висушували фільтрувальним папером. Зразки витримували за поляризаційних потенціалів -0,75 В, -0,95 В та -1,05 В впродовж 8, 24 (1 доба), 164 (1 тиждень) та 720 (1 місяць) годин.

Потенціали контролювали за допомогою потенціостату ПИ-50-1.1.



РЕ – робочий електрод; *ДЕ* – допоміжний електрод; *ЕП* – електрод порівняння

Рисунок 1 – Схема випробувального стенду

Результати досліджень та їх обговорення

Розроблення лабораторного стенду. Для проведення досліджень розробили випробувальний стенд, ескіз якого наведено на рис. 1. Оскільки очікувані значення вимірюваної величини досить малі, для підвищення точності вимірювань збільшили площу робочого електроду. Робочий електрод складався з 5 пластинок розміром $100 \times 50 \times 0,8$ мм кожна, робоча площа одної пластини становила $0,01 \text{ м}^2$, а загальна площа збірного електроду – $0,05 \text{ м}^2$. Допоміжним електродом слугувала касета з 6 пластинок, кожна з яких мала вигляд сітки з паладієвого дроту діаметром $0,15 \text{ мм}$, намотаного на діелектричну рамку розміром $100 \times 50 \times 3 \text{ мм}$.

Пластини робочого електроду збирали в касету. Відстань між пластинами, які складали касету, дорівнювала 1 см . Аналогічно готували до роботи допоміжний електрод.

Для забезпечення рівномірного розподілу захисного струму пластини робочого електроду розташовували між пластинами допоміжного електроду. Випробування проводили в потенціостатичному режимі. Для поляризації виготовлено багатоканальний пристрій, за допомогою якого подавали поляризаційний потенціал на робочі електроди. Конструкція пристрою дозволяла одночасно проводити дослідження в декількох комірках одночасно. Максимальна густина катодного струму за поляризаційного потенціалу $-1,05 \text{ В}$ знаходилася в діапазоні від 2 до $2,5 \text{ А/м}^2$.

Дослідили швидкість залишкової корозії як функцію захисного потенціалу, корозійної активності середовища та часу за кімнатної температури (рис. 2).

Аналіз закономірностей зміни швидкості залишкової корозії в часі. В розчинах з різною корозійною активністю захисний ефект досягається не миттєво (рис. 2). У всіх середовищах швидкість корозії знижується зі збільшенням за абсолютним значенням захисного потенціалу та тривалості контакту з розчином. Ця залежність неоднакова для середовищ з різною корозійною агресивністю.

Наприклад, в слабкокислому розчині з найменшим рН при всіх досліджених захисних потенціалах динаміка зміни швидкості залишкової корозії в часі практично однакова (рис. 2, а), тобто при всіх захисних потенціалах швидкість корозії однаково знижується до значень менше $0,01 \text{ мм/рік}$ через 1 тиждень. У розчині з рН, близьким до нейтрального, в діапазоні потенціалів від $-0,75 \text{ В}$ до $-1,05 \text{ В}$ найбільш сильно швидкість корозії знижується впродовж 1 тижня та потім змінюється мало (рис. 2, б). В лужному розчині різниця значень швидкості залишкової корозії через 8 годин значно менша, ніж у розглянутих вище (рис. 2, в), та з часом змінюється незначно.

Порівнюючи зміну швидкості залишкової корозії в часі для розчинів з різною корозійною активністю можна відмітити такі закономірності. Якщо рН розчину знаходиться в області сла-

бокислих значень (розчин на основі мурашиної кислоти, рН 5,6) в нормованому діапазоні захисних потенціалів мінімальна швидкість залишкової корозії, яка може бути досягнута впродовж 8 годин, дорівнює 0,021 мм/рік (рис. 3, а, крива 1), тобто захисного ефекту досягти неможливо, на що звертали увагу й інші дослідники. В розчині з рН 8,2, близьким до нейтрального (модельний ґрунтовий електроліт, NS4), збільшення (за абсолютним значенням) захисного потенціалу прискорює досягнення захисного ефекту, і значення швидкості залишкової корозії 0,01 мм/рік встановлюється за потенціалу -1,0 В (рис. 3, а, крива 2). У середовищі з лужним рН (до 9,6) захисний ефект встановлюється за меншого захисного потенціалу – близько -0,84 В (рис. 3, в, крива 3). Тобто зсув рН в лужну область прискорює досягнення достатнього захисного ефекту за менших захисних потенціалів.

При збільшенні тривалості досліджень до 1 тижня потрібний захисний ефект у середовищі зі слабкокислим рН, як і раніше, не досягається у всьому нормованому діапазоні потенціалів; мінімальні значення швидкості корозії, які встановлюються, дорівнюють 0,021 мм/рік (рис. 3, б, крива 1). У середовищі з сильнолужним рН захисний ефект встановлюється за потенціалу -1,0 В (рис. 3, б, крива 3), тобто за менших захисних потенціалів можуть створюватися умови для перебігу локальної корозії. У слаболужному середовищі (рН 8,2) захисний ефект досягається за потенціалу -0,72 В, і за мінімального потенціалу катодний захист є ефективним (рис. 3, б, крива 2).

Зі збільшенням тривалості досліджень до 1 місяця для всіх середовищ захисний ефект досягнутий за мінімального захисного потенціалу (рис. 3, в). При його збільшенні (за абсолютним значенням) водний розчин розкладається, що супроводжується відновленням водню.

Отримані результати наочно демонструють, що при підтримуванні сталим захисного потенціалу ефективність катодного захисту є різною у середовищах із різною корозивністю.

Для прикладу, попри забезпечення ефективного катодного захисту, коли захисний потенціал не виходить за межі нормованого діапазону, має нормоване мінімальне значення -0,75 В, залежно від корозійної активності середовища все ж не виключена імовірність виникнення умов, сприятливих локальному корозійному руйнуванню (в тому числі, корозійному розтріскуванню).

Отже результати випробувань показали, що швидкість залишкової корозії є функцією часу, потенціалу та корозійної активності середовища. В цій роботі не досліджували вплив температури та концентрації кисню.

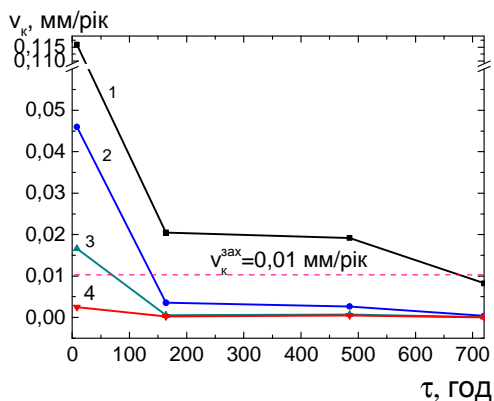
Вплив водневого показника на швидкість залишкової корозії. Як відмічалось вище [4], швидкість корозії заліза в області рН від 4 до 10 не залежить від концентрації водневих іонів. Важливим було дослідити вплив рН на швидкість залишкової корозії. Згідно з класифікацією середовищ за рівнем рН досліджувані розчини, що відносяться до слабкокислого (рН 5,6), лужного (рН 8,2) і сильнолужного (рН 9,6). Значення швидкості залишкової корозії через різну тривалість досліджень у цих розчинах за різних потенціалів наведено в табл. 2 та на рис. 4.

Як видно з рис. 4, в діапазоні рН від 5,6 до 9,6 за потенціалу корозії швидкість корозії зменшується в 4,6 разів (від 0,183 до 0,04 мм/рік). Однак, слід зауважити, в роботі [4] показано, що в області рН від 4 до 9 швидкість корозії не залежить від рівня рН середовища. Імовірно крім рН на швидкість корозії впливають інші чинники. Але отримані результати деякою мірою корелюють з результатами інших дослідників для ґрунтових умов [17]. Корозійна активність середовища оцінена балом 4-8 згідно з ГОСТ 9.502 [20] (від середньої до високої).

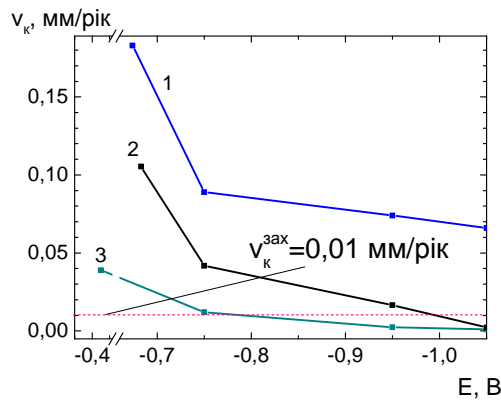
Швидкість залишкової корозії зменшується в міру зсуву рН від слабкокислого до сильнолужного значень для захисних потенціалів -0,75 В, -0,95 В і -1,05 В в 7, 30 та 66 разів, відповідно, причому найбільш сильно це виражено для слабкокислого розчину (рис. 4, крива 2). Найбільш інтенсивно швидкість залишкової корозії зменшується з підвищенням рН за максимального захисного потенціалу (рис. 4).

Зі збільшенням тривалості досліджень спостерігається зміна закономірностей (рис. 4, б). Мінімальні значення швидкості залишкової корозії спостерігається в розчині зі слаболужним рН.

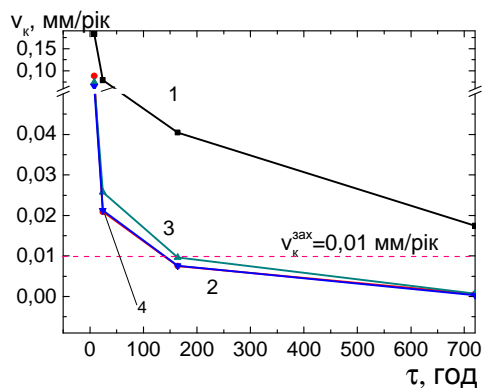
За результатами проведених досліджень встановлено, що залежність швидкості залишкової корозії від рН змінюється із часом: через малу тривалість досліджень (до 8 годин) – зменшується нелінійно, зі збільшенням тривалості досліджень до 1 тижня – спостерігається неоднозначна залежність від потенціалу з мінімальними значеннями в області слаболужного рН.



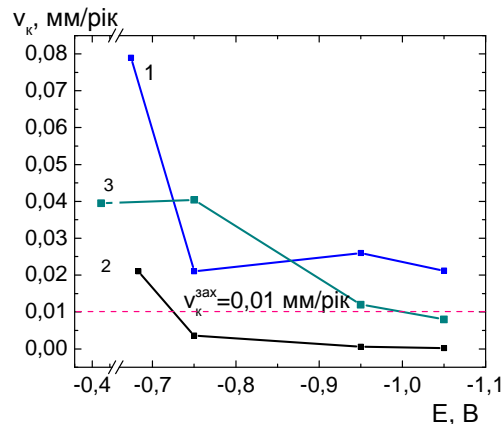
а



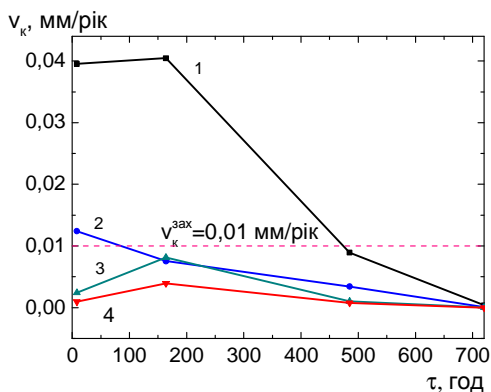
а



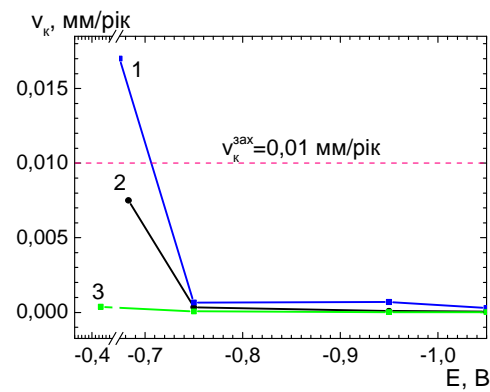
б



б



в



в

а – 2,28 g/l HCOOH + 54,4 g/l HCOONa + 10,8 g/l KSCN;
 б – 0,037 g/l KCl + 0,559 g/l NaHCO₃ + 0,008 g/l CaCl₂ + 0,089 g/l MgSO₄;
 в – 0,1 M NaHCO₃ + 0,1 M Na₂CO₃;
 1 – за потенціалу корозії; 2 – -0,75 В;
 3 – -0,95 В; 4 – -1,05 В

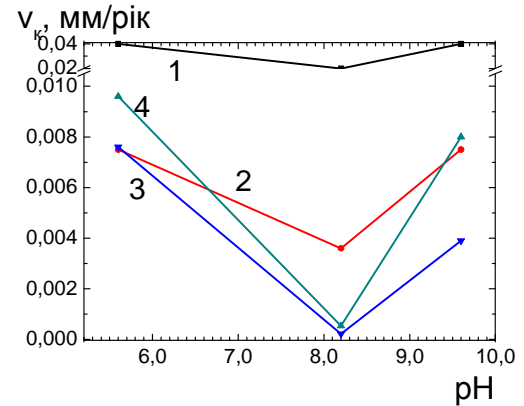
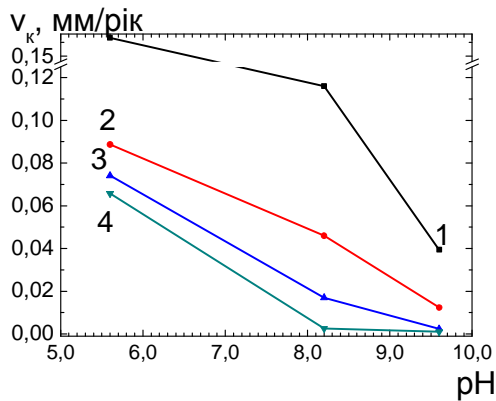
Рисунок 2 – Зміна швидкості корозії та швидкості залишкової корозії сталі в часі в розчинах різної корозійної активності

а – 8 годин; б – 1 тиждень; в – 1 місяць;
 1 – 2,28 g/l HCOOH + 54,4 g/l HCOONa + 10,8 g/l KSCN;
 2 – 0,037 g/l KCl + 0,559 g/l NaHCO₃ + 0,008 g/l CaCl₂ + 0,089 g/l MgSO₄;
 3 – 0,1 M NaHCO₃ + 0,1 M Na₂CO₃

Рисунок 3 – Зміна швидкості залишкової корозії сталі залежно від захисного поляризаційного потенціалу за різної тривалості витримування у розчинах різної корозійної активності

Таблиця 2 – Швидкість залишкової корозії в середовищах з різним рН

рН	Тривалість	Швидкість корозії, мм/рік, за потенціалу, В							
		$E_{кор}$		-0,75		-0,95		-1,05	
		8 год	1тижд.	8 год	1тижд.	8 год	1тижд.	8 год	1тижд.
5,6		0,1833	0,041	0,0887	0,0075	0,0741	0,0096	0,0657	0,0076
8,2		0,1160	0,020	0,046	0,0036	0,0170	0,00054	0,0025	0,00023
9,6		0,0395	0,040	0,0124	0,0075	0,0024	0,0081	0,0010	0,0039



а

б

а – через 8 годин; б – через 1 тиждень;

1 – потенціал корозії; 2 – потенціал -0,75 В; 3 – потенціал -0,95 В; 4 – потенціал -1,05 В

Рисунок 4 – Вплив рН розчину на швидкість залишкової корозії за потенціалу корозії та захисних поляризаційних потенціалів

Висновки

1. Досліджено залежність швидкості залишкової корозії від захисного потенціалу, корозивності (корозійної активності) середовища та тривалості випробувань за кімнатної температури. Встановлено, що зі зростанням рН середовища від 5,6 до 9,6 швидкість залишкової корозії знижується за збільшенням (за абсолютним значенням) захисного потенціалу та тривалості контактування з розчином.

2. Показано, що для середовищ з різною корозійною активністю залежність швидкості залишкової корозії від потенціалу неоднакова. За потенціалу, наближеного до максимального захисного (-1,05 В), через 8 годин досліджень у розчині з рН 8,2, забезпечується задовільний захисний ефект (швидкість корозії не більше 0,01 мм/рік), що відповідає ефективному катодному захисту. При рН 5,6 потрібний захисний ефект не досягається, тож можуть створюватися умови для локалізації корозійного процесу в дефекті покриття. У розчині з рН 9,6 захисний ефект досягнуто за потенціалу -0,84 В, а підтримування потенціалу на рівні максимального захисного сприятиме розкладу водного електроліту із виділенням водню і, як наслідок, імовірному підвищенню схильності до КРН.

3. За результатами проведених досліджень встановлено, що залежність швидкості залишкової корозії від рН змінюється з часом: через малу тривалість досліджень (до 8 годин) зменшується нелінійно, при збільшенні часу випробувань до 1 тижня спостерігається неоднозначна залежність від потенціалу з мінімальними значеннями в області слаблужного рН.

Література

1. Electrochemical study of the corrosion rate of carbon steel in soil: Evolution with time and determination of residual corrosion rates under cathodic protection / Barbalat M., Lanarde L., Caron D., Meyer M., Vittonato J., Castillon F., Fontaine S., Refait Ph. *Corrosion Science*. 2012. Vol. 55. P. 246-253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.10.031>

2. Barbalat M., Caron D., Lanarde L., Meyer M., Fontaine S., Castillon F., Vittonato J., Refait Ph. Estimation of residual corrosion rates of steel under cathodic protection in soils via voltammetry. *Corrosion Science*. 2013. Vol. 73. P. 222–229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.038>

3. NACE SP0169-2007 (formerly RP0169) Parts incorporated in pipeline safety regulations Control of External Corrosion on Underground or

- Submerged Metallic Piping Systems. URL: <https://store.nace.org/sp0169-2007-formerly-rp0169->
4. Защита подземных металлических сооружений от коррозии: Справочник / Стрижевский И. В., Белоголовский А. Д., Дмитриев В. И. и др. М.: Стройиздат, 1990. 303 с.
 5. Медведева М. Л., Мурадов А. В., Прыгаев А. К. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: Учебное пособие для вузов нефтегазового профиля. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. 250 с. URL: http://pb02.twirpx.net/1864/1864987_4B667B5F/medvedeva_m_l_muradov_a_v_prygaev_a_k_korroziya_i_zashchita.pdf <https://store.nace.org/sp0169-2007-formerly-rp0169->
 6. Подгорный А.А. Защита подземных металлических трубопроводов от коррозии. К. : Будівельник, 1988. 176 с.
 7. Полутренко М. С. Екологічна безпека експлуатації магістральних газопроводів. *Нафтогазова галузь України*. №5. 2014. С. 45–48. URL: http://www.naftogaz.com/files/journal/5_2014_preview.pdf
 8. 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*. 2015. Vol. 176. P. 1410–1419. URL: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.097>
 9. Jones D. A. Analysis of Cathodic Protection Criteria. *Corrosion*. 1972. Vol. 28(11). P. 421–423. URL: <https://doi.org/10.5006/0010-9312-28.11.421>
 10. Peabody's Control of pipeline corrosion / Edited by RONALD L. BIANCHETTI / Second edition. *NACE International The Corrosion Society*. 1440 South Creek Drive, Houston, Texas. 2001. P. 347. URL: https://www.academia.edu/21645437/CONTROL_OF_PIPELINE_CORROSION_SECOND_EDITION
 11. Хижняков В.И. Развитие научных основ, разработка и реализация новых критериев эффективности электрохимической защиты трубопроводов от коррозии. Дисс. ... докт. техн. наук. 05.17.03. 2010. 357 с.
 12. Лубенский А.П., Лубенский С.А., Чебурахтин Н.А., Антонов В.Г. Состав для проведения испытаний на стойкость трубных сталей к коррозионному растрескиванию под напряжением. Патент РФ № 2082154. Заявл. 12.07.1994. Оpubл. 20.06.1997.
 13. Szklarska-Smialowska K Z., Xia Z., Rebak R.B. Technical note: stress corrosion cracking of X-52 carbon steel in dilute aqueous solutions. *Corrosion*. 1994. Vol.50. No. 5. P.334–338. URL: <https://doi.org/10.5006/1.3294341>
 14. Механіка руйнування та міцність матеріалів : довідковий посіб. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк та ін. Львів : Сполом, 2009. 504 с.
 15. Коррозия и защита металлов и оборудования : методические указания / сост.: Е.В.Школьников, И.Я. Киселев. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 40 с.
 16. Защита металлических сооружений от коррозии. Справочник. Изд. 2-е. / Стрижевский И. В., Зиневич А. М., Никольский К. К. и др. М.: Недра, 1981. 293 с.
 17. Шамшетдинова Н. К. Повышение эффективности электрохимической защиты магистральных газопроводов при наличии отслоений изоляционного покрытия. Автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 25.00.19; 05.17.03. 22 с. URL: [https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-elektrokhimicheskoi-zashchity-magistralnykh-gazoprovodov-pri-nalich/read](https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-elektrokhimicheskoi-zashchity-magistralnykh-gazoprovodov-pri-nalich-read)
 18. Хижняков В. И., Негодина А. В. Коррозионное растрескивание катодно защищаемых газонефтепроводов в процессе длительной эксплуатации. *Вестник ТГАСУ*. 2017. № 4. С. 82–92. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrozionnoe-rastreskivanie-katodno-zaschischaemyh-gazonefteprovodov-v-protsesse-dlitelnoy-ekspluatatsii>
 19. Parkins R.N. Current Topics in Corrosion: Factors Influencing Stress Corrosion Crack Growth Kinetics. *Corrosion*. 1987. Vol. 43, № 3. P. 130–139. URL: <https://doi.org/10.5006/1.3583125>
 20. ГОСТ 9.502-82 Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний. 17 с.

References

1. Electrochemical study of the corrosion rate of carbon steel in soil: Evolution with time and determination of residual corrosion rates under cathodic protection / Barbalat M., Lanarde L., Caron D., Meyer M., Vittonato J., Castillon F., Fontaine S., Refait Ph. *Corrosion Science*. 2012. Vol. 55. P. 246-253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.10.031>
2. Barbalat M., Caron D., Lanarde L., Meyer M., Fontaine S., Castillon F., Vittonato J., Refait Ph. Estimation of residual corrosion rates of steel

- under cathodic protection in soils via voltammetry. *Corrosion Science*. 2013. Vol. 73. P. 222–229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.038>
3. NACE SP0169-2007 (formerly RP0169) Parts incorporated in pipeline safety regulations Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems. URL: <https://store.nace.org/sp0169-2007-formerly-rp0169->
4. Strizhevskiy I. V., Belogolovskiy A. D., Dmitriev V. I. i dr. Zashchita podzemnykh metallicheskiy sooruzheniy ot korrozii: Spravochnik. M.: Stroyizdat, 1990. 303 p. [in Russian].
5. Medvedeva M. L., Muradov A. V., Pryigaev A. K. Korroziya i zashchita magistralnykh truboprovodov i rezervuarov: Uchebnoe posobie dlya vuzov neftegazovogo profilya. M.: Izdatelskiy tsentr RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2013. 250 p. [in Russian]. URL: http://pb02.twirpx.net/1864/1864987_4B667B5F/medvedeva_m_l_muradov_a_v_pryigaev_a_k_korroziya_i_zashchita.pdf
6. Podgorniy A.A. Zashchita podzemnykh metallicheskiy truboprovodov ot korrozii. K. : Budivelnik, 1988. 76 p. [in Russian].
7. Polutrenko M. S. Ekologichna bezpeka ekspluatatsii i magistralnykh gazoprovodiv. *Naftogazova galuz UkraYini*. 2014. No 5. P. 45–48. [in Ukrainian]. URL: http://www.naftogaz.com/files/journal/5_2014_preview.pdf
8. 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*. 2015. Vol. 176. P. 1410–1419. URL: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.097>
9. Jones D. A. Analysis of Cathodic Protection Criteria. *Corrosion*. 1972. Vol. 28(11). P. 421–423. URL: <https://doi.org/10.5006/0010-9312-28.11.421>
10. Peabody's Control of pipeline corrosion / Edited by RONALD L. BIANCHETTI / Second edition. *NACE International The Corrosion Society*. 1440 South Creek Drive, Houston, Texas. 2001. P. 347. URL: https://www.academia.edu/21645437/CONTROL_OF_PIPELINE_CORROSION_SECOND_EDITION
11. Hizhnyakov V.I. Razvitie nauchnykh osnov, razrabotka i realizatsiya novykh kriteriev effektivnosti elektrokhimicheskoy zashchity truboprovodov ot korrozii. Diss. ... dokt. tehn. nauk. 05.17.03. 2010.357 p. [in Russian].
12. Lubenskiy A.P., Lubenskiy S.A., Cheburahin N.A., Antonov V.G. Lubenskiy. Sostav dlya provedeniya ispytaniy na stoykost trubnykh staley k korrozionnomu rastreskivaniyu pod napryazheniem. Patent RF No 2082154. Zayavl. 12.07.1994. Opubl. 20.06.1997. [in Russian].
13. Szklarska-Smialowska K Z., Xia Z., Rebak R.B. Technical note: stress corrosion cracking of X-52 carbon steel in dilute aqueous solutions. *Corrosion*. 1994. Vol.50. No. 5. P.334–338. URL: <https://doi.org/10.5006/1.3294341>
14. Mekhanika ruynuvannia ta mitsnist materialiv : dovidkovyi posib. T. 11: Mitsnist i dovhovichnist naftohazovykh truboprovodiv i rezervuariv / H. M. Nykyforchyn, S. H. Poliakov, V. A. Chervatiuk ta in. Lviv : Spolom, 2009. 504 p.
15. Korroziya i zashchita metallov i oborudovaniya : metodicheskie ukazaniya / sost.: E.V.Shkolnikov, I.Ya. Kiselev. SPb.: SPbGLTU, 2014. 40 p. [in Russian].
16. Strizhevskiy I. V. Zashchita metallicheskiy sooruzheniy ot korrozii. Spravochnik. Izd. 2-e. / Strizhevskiy I. V., Zinevich A. M., Nikolskiy K. K. i dr. M.: Nedra, 1981. 293p. [in Russian].
17. Shamshetdinova N. K. Povyshenie effektivnosti elektrokhimicheskoy zashchity magistralnykh gazoprovodov pri nalichii otsloeniya izolyatsionnogo pokryitiya. Avtoreferat dis. ... kand. tehn. nauk : spets. 25.00.19; 05.17.03. 22 p. [in Russian]. URL: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-elektrokhimicheskoi-zashchity-magistralnykh-gazoprovodov-pri-nalich/read>
18. Hizhnyakov V. I., Negodin A. V. Korrozionnoe rastreskivanie katodno zashchischaemykh gazonefteprovodov v protsesse dlitelnoy ekspluatatsii. *Vestnik TGASU*. 2017. No 4. P. 82–92. [in Russian]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrozionnoe-rastreskivanie-katodno-zashchischaemyh-gazonefteprovodov-v-protsesse-dlitelnoy-ekspluatatsii>
19. Parkins R.N. Current Topics in Corrosion: Factors Influencing Stress Corrosion Crack Growth Kinetics. *Corrosion*. 1987. Vol. 43, № 3. P. 130–139. URL: <https://doi.org/10.5006/1.3583125>
20. GOST 9.502-82 Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Ingibitory korrozii metallov dlya vodnykh sistem. Metody korrozionnykh ispytaniy