

УДК 620.197.6

*Н.Р. Демченко, О.С. Бондар, С.В. Ткаченко, І.М. Курмакова, О.П. Третьак***ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАХИСТУ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ КАТІОНОАКТИВНИМ ІНГІБІТОРОМ В УМОВАХ КОРОЗІЇ З БАКТЕРІАЛЬНОЮ СУЛЬФАТРЕДУКЦІЄЮ****Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів, Україна**

Гравіметричним та електрохімічним методами досліджено ефективність захисту конструкційної сталі катіоноактивним інгібітором за умов корозії, індукованої сульфатвідновлювальними бактеріями штамів *Desulfomicrobium* sp. TC 4 і *Desulfovibrio* sp. M-4.1 та сульфідогенним мікробним угрупованням. Показано, що катіоноактивний інгібітор при концентрації 1 г/л забезпечує більшу ефективність захисту сталі Ст3пс за умов корозії, індукованої бактеріями штаму *Desulfomicrobium* sp. TC 4 (до 81,0%) порівняно з бактеріями штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1 (до 72,2%). Будова молекул сполук, що входять до складу інгібітора, обумовлює їх здатність утворювати захисний шар на поверхні металу та проявляти протимікробну дію щодо сульфатвідновлювальних бактерій та їх супутників (залізовідновлювальних бактерій) і забезпечує високий ступінь захисту (>92,9%) за мікробної корозії під впливом сульфідогенного мікробного угруповання. Електрохімічними дослідженнями встановлено, що біоплівкова форма сульфатвідновлювальних бактерій стає резистентною за відношенням до дослідженого катіоноактивного інгібітору. Це слід враховувати при довгостроковому використанні інгібіторів-біоцидів у промисловості.

Ключові слова: мікробна корозія, конструкційна сталь, катіоноактивний інгібітор, сульфідогенне мікробне угруповання, сульфатвідновлювальні бактерії, штам *Desulfomicrobium* sp. TC 4, штам *Desulfovibrio* sp. M-4.1.

DOI: 10.32434/0321-4095-2023-151-6-76-83

Вступ

Металеві та залізобетонні конструкції різного функціонального призначення, що експлуатуються в умовах сприятливих для розвитку корозійно агресивних бактерій, зазнають постійної руйнівної дії за рахунок біокорозії. За відсутності кисню найбільш небезпечними для металу, зокрема сталі, міді, свинцю, алюмінію, є сульфатвідновлювальні бактерії (СВБ), які продукують сірководень [1]. Відомо, що з діяльністю мікробіоти ґрунту пов'язано від 10 до 50% випадків корозійних руйнувань підземних металоконструкцій [2]. Сульфатвідновлювальні бактерії також можуть активно розвиватися у морській воді та розсолах з концентрацією натрій хлориду до 30% в межах температур від 0 до 100°C і тисках до 68–98 МПа [3].

Для захисту металу, зокрема конструкційної сталі, застосовуються інгібітори корозії з біо-

цидною дією щодо СВБ. Серед іншого, їх використовують для оброблення поверхні трубопроводів перед нанесенням ізоляційного покриття під час ремонту у трасових умовах, модифікації бітумно-полімерних ізоляційних мастик тощо [4].

Найбільш ефективними інгібіторами є гетероциклічні сполуки, що містять атоми азоту, кисню або сірки і виявляють протимікробні властивості щодо сульфатвідновлювальних бактерій [5–8]. На основі певних сполук для середовищ з бактеріальною сульфатредукцією створені промислові інгібітори серій Dodicor (*Dodicor V4543*, *Dodicor V4591*, *Dodicor V3284-1 conc.*), *Robio* (*Robio B-200*), СНПХ (*СНПХ-1004*, *СНПХ-6303 Б*), ГИПХ [9].

Виділяють як мінімум 13 родів сульфатвідновлювальних бактерій, в тому числі *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfomicrobium*, *Desulfotomaculum*,

© Н.Р. Демченко, О.С. Бондар, С.В. Ткаченко, І.М. Курмакова, О.П. Третьак, 2023



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

N.R. Demchenko, O.S. Bondar, S.V. Tkachenko, I.M. Kurmakova, O.P. Tretyak

Desulfomonas та інші [10], які характеризуються різними особливостями процесів метаболізму і шляхами трансформації хімічних сполук. В природних сульфідогенних угрупованнях містяться сульфатвідновлювальні бактерії та їх супутники, що забезпечує стабільність функціонування мікроорганізмів [11]. Це створює проблеми підбору ефективного промислового інгібітору. Також, ефективна концентрація інгібітору-біоциду може бути різною по відношенню до водноплаваючої (планктонної) та адгезованої (біоплівкової) форм бактерій [9].

Мета даної роботи – порівняти ефективність захисту конструкційної сталі катіоноактивним інгібітором в умовах корозії, індукованої бактеріями штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1, штаму *Desulfomicrobium* sp. TC 4, сульфідогенним мікробним угрупованням та культурами сульфатвідновлювальних бактерій різних форм росту (планктонна і біоплівкова).

Методика експерименту

Досліджували ефективність захисту конструкційної сталі Ст3пс за умов мікробної корозії промисловим інгібітором ГИПХ-6Б (ТУ 2415-030-00480689-94). Зазначений інгібітор ГИПХ-6Б є водно-метанольним розчином поверхневоактивних речовин катіонного типу із загальною формулою $C_nH_{2n+1}NH_2HCl$, де $n=12-18$. Даний інгібітор корозії використовується для захисту наземного обладнання і трубопроводів системи збору обводненої нафти; трубопроводів міжпромислової перекачки нафти, трубопроводів промислової підготовки нафти за умов часткового чи повного поділу продукції на нафту, газ, воду; систем підтримування пластового тиску [12].

Протикорозійний захист катіоноактивного інгібітору ГИПХ-6Б визначали гравіметричним методом з використанням зразків (прямокутні пластинки з площею поверхні 19 см^2) конструкційної сталі Ст3пс. Дослідження здійснювали в герметичних ємностях, заповнених стерильним поживним середовищем Постгейта «В» та інокульованим відповідною культурою сульфатвідновлювальних бактерій. Титр СВБ в інокуляті 10^6-10^8 кл/мл. Концентрація інгібітору 1 г/л; температура $301\pm 0,5\text{ К}$, яка є оптимальною для розвитку СВБ. Час експозиції зразків сталі становив 14, 30, 74 та 180 діб. Повторність дослідів трикратна.

За експериментальними даними розраховували швидкість корозії $K_m = \Delta m / (S \cdot \tau)$, де Δm – втрата маси зразка (г), S – площа поверхні зразка (м^2), τ – час експозиції (год); коефіцієнт інгібування $\gamma_m = K_m / K_m'$, де K_m , K_m' – швидкість

корозії без інгібітору та з інгібітором, відповідно; ступінь захисту металу від корозії $Z_m = (1 - 1/\gamma_m) \cdot 100\%$.

Для створення умов мікробної корозії використовували монокультури сульфатвідновлювальних бактерій (штам *Desulfovibrio* sp. M-4.1 та штам *Desulfomicrobium* sp. TC 4), сульфідогенне угруповання бактерій (СУБ) та культури сульфатвідновлювальних бактерій різних форм росту (планктонна та біоплівкова). Штам *Desulfovibrio* sp. M-4.1 виділено нами із сульфідогенного природного угруповання феросфери, утвореної на поверхні кородуючого газопроводу, та ідентифіковано молекулярно-біологічними методами [13]. Штам *Desulfomicrobium* sp. TC 4, виділений із продуктів корозії обростань латунних трубок водогону теплових мереж, надано для дослідження співробітниками відділу загальної та ґрунтової мікробіології Інституту мікробіології і вірусології імені Д.К. Заболотного НАН України. Використане в роботі СУБ одержано методом накопичення на середовищі Постгейта «В», яке є оптимальним для розвитку СВБ та не обмежує ріст супутникових форм бактерій [14]. У складі угруповання визначені: сульфатвідновлювальні (СВБ), залізвідновлювальні (ЗВБ) та денітрифікувальні (ДНБ) бактерії. Культури сульфатвідновлювальних бактерій різних форм росту (планктонна та біоплівкова) були виділені відповідно з планктону та біоплівки методом накопичення на елективному поживному середовищі Постгейта «В». Титр СВБ в інокуляті 10^6-10^8 кл/мл, що є корозійно небезпечним. Концентрація інгібітору становить 1 г/л.

Біоплівку, що формувалася на металевій поверхні під час корозивних досліджень, знімали у фіксований об'єм 0,1 н. фосфатного буфера (рН 7) за допомогою ультразвуку на приладі УЗМ-003/н (частота 22 кГц; 30 с двічі з інтервалом 60 с). Одержану клітинну суспензію використовували для приготування розведень та визначення чисельності прикріплених клітин (біоплівкова форма) сульфатвідновлювальних, залізвідновлювальних та денітрифікувальних бактерій.

Чисельність мікроорганізмів визначали методом граничних десятикратних розведень при висіві відповідної суспензії на рідкі елективні поживні середовища (Постгейта «В» для СВБ, Каліненка для ЗВБ та Гільтая для ДНБ).

Полярizzaційні криві електрода зі сталі Ст3пс знімали з використанням потенціостату П-5827М від потенціалу вільної корозії в триелектродній комірі з розділеним катодним і

анодним простором. Електрод порівняння – хлоридсрібний, допоміжний електрод – платиновий. Потенціал перераховували на стандартну водневу шкалу. За струмом вільної електрохімічної корозії обчислювали швидкість корозії $k_i = (i \cdot A) / (n \cdot F)$, де i – струм корозії в А/см², A – атомна маса заліза, n – кількість електронів, F – число Фарадея.

Біоцидні властивості інгібітору визначали диско-дифузійним методом за діаметром зони затримки росту бактерій. Стерильні паперові диски (діаметр 6 мм) обробляли 0,1%, 0,2% та 2,0% розчинами інгібітору в етанолі та розміщували на поверхні відповідних агаризованих поживних середовищ, попередньо інокульованих тридобовою суспензією бактерій. Кількість клітин у інокуляті становила 10^6 – 10^7 кл/мл.

Концентрацію біогенного сірководню, який накопичувався в корозивному середовищі в процесі метаболізму бактерій, визначали методом йодометричного титрування з використанням мікробюретки. Для забезпечення достовірності результатів дотримувалися прийомів зберігання сірководню: мінімальний час взяття проби, герметично закриті корки, струшування та перемішування стерильною піпеткою перед відбором проби. Відносний ступінь впливу інгібітору на сульфатредукцію розраховували за формулою: $S = (C - C_{in}) \cdot 100 / C$, де C_{in} та C – середня концентрація сірководню в корозивному середовищі з інгібітором та без нього, відповідно, мг/л.

Статистичне опрацювання результатів експерименту проведено для рівня значущості 0,05 з врахуванням нормального t-розподілення; повторність дослідів трикратна. Відносна похибка представлених результатів не перевищує 10%.

Комп'ютерні розрахунки молекулярних дескрипторів складових катіоноактивного інгібітору проводили з використанням пакету програм ChemOffice (PerkinElmer Informatics Inc.). Мінімізацію енергії молекули здійснювали методом ММ2, який призначено для максимально

точного відтворення рівноважної ковалентної геометрії невеликих органічних молекул. Для оптимальної конформації молекули були розраховані енергії вищої зайнятої та нижньої вакантної молекулярних орбіталей, розподіл зарядів на атомах, топологічна полярна площа поверхні молекули. Заряди на атомах розраховано розширеним методом Хюккеля, що включає розрахунок електронних взаємодій способом, в якому не враховано електрон-електронні взаємодії, а повна енергія являє собою суму значень для кожного електрону.

Ступінь протонування молекул при різних значеннях рН та показник ліпофільності (lgP) розраховували за допомогою пакету програм ACDLabs.

Результати та обговорення

Дослідження впливу катіоноактивного інгібітору ГИПХ-6Б на мікробну корозію конструкційної сталі показало, що його ефективність при однаковій концентрації в середовищі (1 г/л) відрізняється для сульфатвідновлювальних бактерій родів *Desulfomicrobium* та *Desulfovibrio* (табл. 1). Ступінь захисту металу за присутності у корозивному середовищі бактерій штаму *Desulfomicrobium* sp. ТС 4 на 8,8% більший, ніж за присутності штаму *Desulfovibrio* sp. М-4.1.

Це можна пояснити більшим впливом інгібітору на кількість вільноплаваючих клітин бактерій, які формують біоплівку менш потужної за чисельністю клітин (табл. 1). Так, для культури *Desulfomicrobium* sp. ТС 4 титр бактерій у суспензії знижується на 5 порядків, а для культури *Desulfovibrio* sp. М-4.1 – на 4 порядки. При цьому вплив інгібітора на бактерії біоплівкової форми виявився однаковим: їх чисельність у випадку обох монокультур зменшується на 3 порядки.

Визначено вплив інгібітору на сульфатвідновлювальну активність бактерій: для бактерій штаму *Desulfomicrobium* sp. ТС 4 концентрація накопиченого у корозивному середовищі сірко-

Таблиця 1

Вплив ГИПХ 6Б (1 г/л) на мікробну корозію сталі СтЗпс (експозиція 14 діб)

Корозивне середовище	$K_m \cdot 10^{-3}$, г/(м ² ·год)	γ_m	Z_m , %	Титр бактерій		$K_m \cdot 10^{-3}$, г/(м ² ·год)	γ_m	Z_m , %	Титр бактерій	
				біоплівка, кл/см ²	суспензія, кл/мл				біоплівка, кл/см ²	суспензія, кл/мл
	<i>Desulfomicrobium</i> sp. ТС 4					<i>Desulfovibrio</i> sp. М-4.1				
без інгібітору	15,6±1,2	–	–	10 ⁵	10 ⁸	23,9±1,9	–	–	10 ⁶	10 ⁸
з інгібітором ГИПХ 6Б	2,9±0,2	5,27	81,0	10 ²	10 ³	6,7±0,5	3,59	72,2	10 ³	10 ⁴

водню становила $80,1 \pm 5,8$ мг/л, що на 73,1% менше порівняно з дослідом у неінгібованому середовищі; для бактерій штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1 – $186,5 \pm 7,3$ мг/л, що становить 57,3% від концентрації H_2S в середовищі без інгібітору.

Таким чином, катіоноактивний інгібітор ГИПХ-6Б більш ефективно гальмує процес мікробної корозії, ініційованої бактеріями штаму *Desulfomicrobium* sp. ТС 4, завдяки більшому впливу як на сульфатредукцію мікроорганізмів, так і на чисельність бактерій планктонної форми.

Дослідження мікробної корозії в середовищі, інокульованому сульфідогенним мікробним угрупованням, показали високий ступінь захисту сталі інгібітором ГИПХ-6Б (табл. 2), який зростає зі збільшенням часу експозиції, і через 180 діб експерименту досягає 96%. Ефективність інгібування процесу мікробної корозії, індукованої сульфідогенним мікробним угрупованням (час експозиції 14 діб), виявилася майже на 12% більша порівняно з дією інгібітору в корозивному середовищі за присутності бактерій штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1. Це пояснюється антимікробною дією інгібітору не лише на функціонування сульфатвідновлювальних бактерій, а й на їх супутники, зокрема залізовідновлювальні бактерії (рис. 1), що може порушувати трофічні зв'язки при функціонуванні угруповання.

Дослідження чисельності еколого-фізіологічних груп бактерій в мікробному угрупованні (рис. 2, 3) за мікробної корозії у присутності інгібітору показало, що найбільше гальмується розвиток сульфатвідновлювальних бактерій біоплівки. Їх кількість порівняно з дослідом в неінгібованому середовищі виявилася на 4 порядки нижчою як за експозиції 74 діб, так і 180 діб експерименту. Чисельність зазначених бактерій у плантоні знизилася на 2–3 порядки (74 доби та 180 діб, відповідно), а чисельність залізовідновлювальних бактерій – на 1–2 порядки. При цьому у всіх варіантах дослідів впливу катіоноактивного інгібітору на чисельність денітрифікувальних бактерій не виявлено.

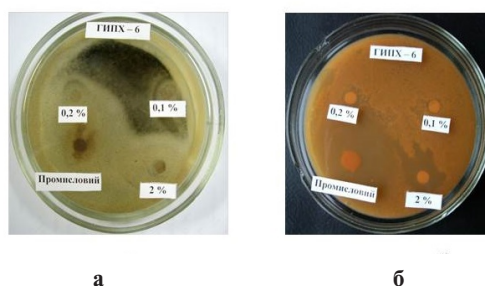


Рис. 1. Чутливість сульфатвідновлювальних (а) та залізовідновлювальних (б) бактерій щодо дії катіоноактивного інгібітору корозії ГИПХ-6Б

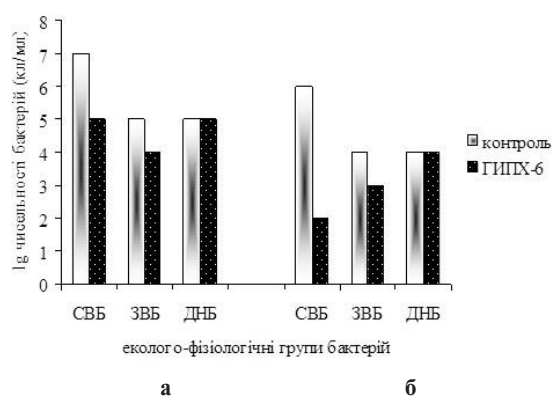


Рис. 2. Вплив інгібітору ГИПХ-6Б (концентрація 1,0 г/л, експозиція 74 доби) на чисельність бактерій сульфідогенного угруповання: а – планктон; б – біоплівка

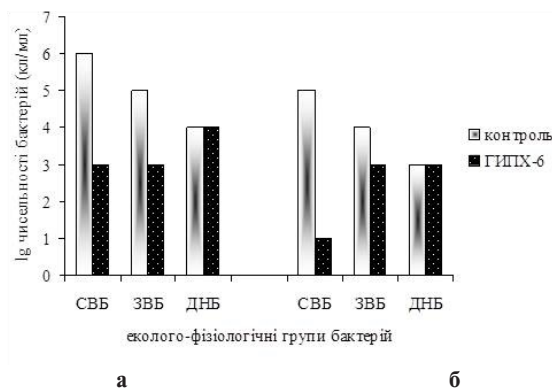


Рис. 3. Вплив інгібітору ГИПХ-6Б (концентрація 1,0 г/л, експозиція 180 діб) на чисельність бактерій сульфідогенного угруповання: а – планктон; б – біоплівка

Таблиця 2
Вплив ГИПХ-6Б (1,0 г/л) на мікробну корозію сталі СтЗпс, індувану сульфідогенним мікробним угрупованням

Корозивне середовище	$K_m \cdot 10^{-3}$, г/(м ² ·год)	Z_m , %	$K_m \cdot 10^{-3}$, г/(м ² ·год)	Z_m , %	$K_m \cdot 10^{-3}$, г/(м ² ·год)	Z_m , %	$K_m \cdot 10^{-3}$, г/(м ² ·год)	Z_m , %
	14 діб		30 діб		74 доби		180 діб	
без інгібітору	$19,70 \pm 0,50$	–	$2,30 \pm 0,10$	–	$1,98 \pm 0,20$	–	$2,6 \pm 0,18$	–
з інгібітором ГИПХ 6Б	$1,40 \pm 0,20$	92,9	$0,14 \pm 0,04$	93,9	$0,13 \pm 0,02$	93,4	$0,12 \pm 0,01$	96,0

The efficiency of protection of structural steel by cationic inhibitor under conditions of corrosion with bacterial sulfate reduction

Отже, ГИПХ-6Б пригнічує розвиток сульфатвідновлювальних бактерій та залізодновлювальних бактерій у біоплівці, яка формується за умов домінування денітрифікувальних бактерій. При цьому з часом характер зміни популяційного рівня бактерій корозійно активного мікробного угруповання в процесі формування біоплівки на поверхні маловуглецевої сталі за дії інгібітору зберігається (рис. 2, 3). Також було зафіксовано зменшення сульфатредуючої активності сульфідогенного мікробного угруповання: на 74 добу експерименту в неінгібованому середовищі концентрація сірководню становила 350 мг/л, в інгібованому – на 93% менше.

Протимікробна дія катіоноактивного інгібітору зумовлена будовою та властивостями його складових, які являють собою вуглеводневі ланцюги з полярною аміно групою наприкінці (рис. 4).

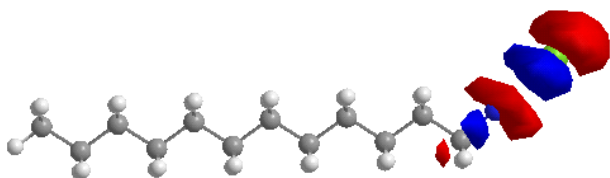


Рис. 4. Модель та локалізація вищої зайнятої молекулярної орбіталі молекули сполуки $C_{12}H_{25}NH_2 \cdot HCl$ – компонента ГИПХ-6Б (червоні ділянки – позитивне, сині ділянки – негативне фазові розподілення в хвильовій функції молекулярних орбіталей)

Значення певних молекулярних дескрипторів молекул, що входять до складу інгібітору, наведені у табл. 3 і відповідають характеристикам речовин з високою вірогідністю прояву біологічної активності. Зокрема, величина молекулярного об'єму сполук знаходиться в межах від 242,91 \AA^3 до 326,91 \AA^3 , площа топологічної полярної поверхні (TPSA) для всіх сполук однакова і дорівнює 27,64 \AA^2 . При рН менше 7,6 (відповідає рН

корозивного середовища) сполуки знаходяться у вигляді катіона. Розраховані для такої форми сполук значення показника ліпофільності (lgP) знаходяться в межах 2,97 до 5,49, що вказує на їх здатність проникати у бактеріальну клітину. Сама ця властивість зумовлює порушення процесів обміну і забезпечує протимікробні властивості речовин.

Значна різниця значень енергій ($E_{\text{HOMO}} - E_{\text{LUMO}}$) вказує на високу реакційну здатність сполук, які мають електрофільний центр – атом азоту. Наявність такого атома важлива для адсорбції сполук, яка за умов мікробної корозії можлива як на поверхні бактеріальної клітини, так і на поверхні металу. У випадку мікробної корозії ініційованої сульфідогенним угрупованням ці поверхні заряджені негативно. Адсорбція на поверхні металу може приводити до утворення захисної бар'єрної плівки. Висока протикорозійна дія (табл. 2) може бути пояснена лише результатом комплексу чинників впливу.

Важливим фактором мікробної корозії є біоплівка. Існування бактерій всередині біоплівок, сформованих на металевих поверхнях, забезпечує їм переваги порівняно з вільноплаваючими клітинами (планктонна форма) за присутності антибактеріальних препаратів, зокрема інгібіторів корозії. Стійкість, зумовлену властивостями клітин біоплівок, пов'язують зі зменшенням їх вільної поверхні за рахунок контактів одна з одною та формуванням бактерій, які отримали назву «персистери». Персистери перебувають у стані повної стійкості практично до всіх препаратів. Тому з часом дія протимікробних препаратів знижується, що привертає увагу дослідників до вивчення причин такої стійкості [15].

Для з'ясування особливостей впливу катіоноактивного інгібітору на сульфатвідновлювальні бактерії різних форм росту досліджували корозійну тривкість сталі у інгібованих та неінгібованих середовищах методом поляризаційних вимірювань.

Таблиця 3

Значення молекулярних дескрипторів складових катіоноактивного інгібітору ГИПХ-6Б

Значення n в хімічній формулі $C_nH_{2n+1}NH_2 \cdot HCl$	Заряд на атомі N	TPSA, \AA^2	Значення енергій, eV	
			E_{HOMO}	E_{LUMO}
12	0,586127	27,64	-11,845	28,042
13	0,586127	27,64	-11,729	27,914
14	0,558687	27,64	-11,734	27,810
15	0,586188	27,64	-11,847	27,722
16	0,586125	27,64	-11,845	27,648
17	0,586143	27,64	-11,845	27,583
18	0,558733	27,64	-11,738	27,533

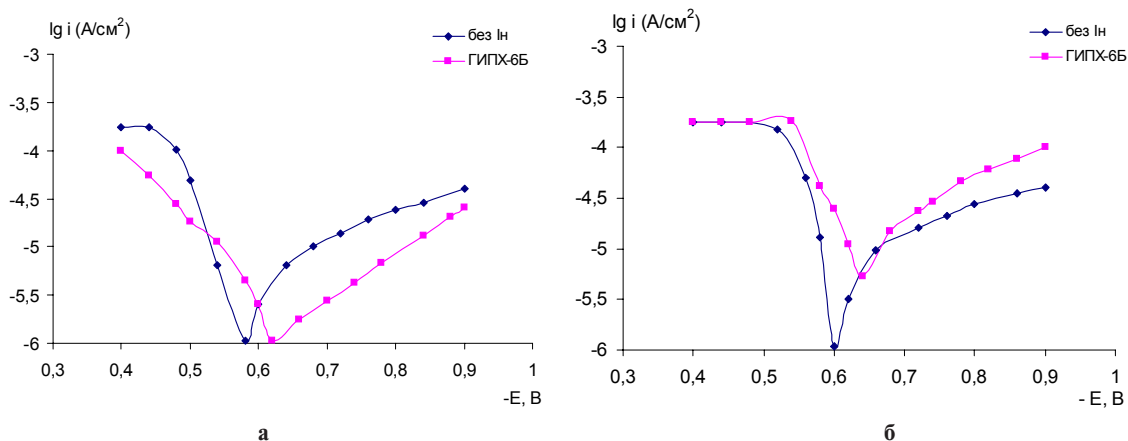


Рис. 5. Поляризаційні криві електроду зі сталі Ст3пс в середовищі Постгейта «В» інокульованому планктонною (а) та біоплівковою формою бактерій (б)

Характер поляризаційних кривих (рис. 5) свідчить, що в неінгібованому середовищі Постгейта «В» інокульованому як планктонної, так і біоплівковою формами бактерій корозивний процес відбувається з переважно катодним контролем. При додаванні інгібітору потенціал вільної корозії зміщується в катодну ділянку на 50 мВ незалежно від форми сульфатвідновлювальних бактерій. Струм вільної електрохімічної корозії сталі в середовищі інокульованому планктонною формою бактерій як без інгібітору, так і за його присутності становить $0,01 \text{ А/м}^2$. Значення швидкості корозії, обчислене за токовим показником, дорівнює $1,04 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}^2\cdot\text{год}$. При цьому спостерігається зміна контролю електрохімічного процесу на змішаний. В анодній та катодній ділянках, крім зони значень потенціалу $-0,58 \dots -0,53 \text{ В}$, за присутності інгібітору спостерігається гальмування корозійного процесу.

Струм вільної електрохімічної корозії в середовищі з бактеріями біоплівкової форми без інгібітору становить $0,01 \text{ А/м}^2$, а за присутності ГИПХ-6Б – $0,054 \text{ А/м}^2$. Відповідно швидкість електрохімічної корозії в такому середовищі в 5,4 рази більша за присутності ГИПХ-6Б, ніж без інгібітору. Пришвидшення корозійного процесу і, відповідно, зниження тривкості сталі спостерігається практично при всіх значеннях електрохімічного потенціалу. Таким чином, біоплівкова форма сульфатвідновлювальних бактерій стає резистентною за відношенням до застосованого інгібітору.

Отримані результати слід враховувати при довгостроковому використанні інгібіторів-біоцидів в промисловості.

Висновки

Встановлено, що катіоноактивний інгібітор більш ефективно захищає конструкційну сталь за умов мікробної корозії, індукованої сульфатвідновлювальними бактеріями штаму *Desulfomicrobium* sp. TC 4 (81,0%) порівняно з бактеріями штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1. (72,2%), завдяки більшому впливу на вільноплаваючі клітини бактерій та формуванню менш потужної біоплівки.

При мікробній корозії під впливом сульфидогенного мікробного угруповання забезпечується більший ступінь захисту (>92,9%). Це пояснюється здатністю сполук – складових інгібітору, проявляти протимікробну дію за відношенням до сульфатвідновлювальних бактерій та їх супутників – залізовідновлювальних бактерій, що приводить до порушення трофічних зв'язків в угрупованні. Також з'ясовано, що біоплівкова форма сульфатвідновлювальних бактерій стає резистентною за відношенням до дослідженого катіоноактивного інгібітору. Це слід враховувати при довгостроковому використанні інгібіторів-біоцидів в промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Xu D., Li Y., Gu T., Mechanistic modeling of biocorrosion caused by biofilms of sulfate reducing bacteria and acid producing bacteria // *Bioelectrochemistry*. – 2016. – Vol.110. – P.52-58.
2. Muyzer G., Stams A. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // *Nat. Rev. Microbiol.* – 2008. – Vol.6. – P.441-454.

3. Борецька М.О., Козлова І.П. Біоплівка на поверхні металу як фактор мікробної корозії // Мікробіол. журн. – 2010. – Т.72. – № 3. – С.57-64.

4. Вплив мікроорганізмів на корозію підземних металоконструкцій / Полутренко М., Крижанівський Є., Побережний Л., Марущак П., Бусько Б., Данилюк І. // Вісн. ТНТУ. – 2014. – Т.74. – № 2. – С.48-54.

5. Purish D.R., Abdulina G.O., Iutynska L.M. Inhibitors of corrosion induced by sulfate-reducing bacteria // Мікробіол. журн. – 2021. – Т.83. – № 6. – С.95-109.

6. Peculiarities of triazoloazepinium bromides effect on steel microbial corrosion / Kurmakova I.M., Bondar O.S., Vorobyova V.I., Skiba M.I., Chygyrynets O.E., Demchenko N.R. // French-Ukr. J. Chem. – 2018. – Vol.6. – No. 2. – P.59-72.

7. Biocorrosion of metal sewage treatment constructions and its inhibition with pyridinium chlorides / Bondar O., Kurmakova I., Polevichenko S., Demchenko N. // Chem. Chem. Technol. – 2017. – Vol.11. – No. 4. – P.497-502.

8. Quaternary pyridinium salts as inhibitors of mild steel biocorrosion / Kurmakova I., Bondar O., Polevichenko S., Demchenko N. // Chem. Chem. Technol. – 2017. – Vol.11. – No. 3. – P.314-318.

9. Погребова І.С. Інгібітори корозії металів : навчальний посібник. – К.: Хай-Тек Прес, 2012. – 296 с.

10. Widdel F., Bak F. Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria // The Procarotes. – New York: Springer-Verlag Inc. – 1992. – Vol.4. – P.3352-3378.

11. Асауленко Л.Г., Абдуліна Д.Р., Пуриш Л.М. Таксономічне положення окремих представників сульфідогенного корозійно-агресивного мікробного угруповання // Мікробіол. журн. – 2010. – Т.72. – № 4. – С.3-10.

12. Петров Н.А., Давыдова И.Н., Акодис М.М. Применение катионных ПАВ ГИПХ-6 и ГИПХ-66 в процессах нефтяной промышленности // Башк. хим. журн. – 2006. – Вып. 13. – № 2. – С.46-53.

13. Демченко Н.Р., Курмакова І.М., Третяк О.П. Особливості корозійно активного мікробного угруповання феросфери газопроводу, прокладеного у піщаному ґрунті // Мікробіол. Біотехнол. – 2013. – № 4. – С.90-98.

14. Cultivation of sulphate reducing bacteria in different media / Ismail M., Yahaya N., Bakar A.A., Noor N.M. // Malays. J. Civ. Eng. – 2018. – Vol.26. – No. 3. – P.456-465.

15. Воробей Є.С., Воронкова О.С., Вінников А.І. Бактеріальні біоплівки. Quorum sensing – «відчуття кворуму» у бактерій в біоплівках // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Біологія. Екологія. – 2012. – Вип. 20. – Т.1. – С.13-22.

Надійшла до редакції 24.07.2023

THE EFFICIENCY OF PROTECTION OF STRUCTURAL STEEL BY CATIONIC INHIBITOR UNDER CONDITIONS OF CORROSION WITH BACTERIAL SULFATE REDUCTION

N.R. Demchenko *, O.S. Bondar, S.V. Tkachenko, I.M. Kurmakova, O.P. Tretyak

T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Collehium», Chernihiv, Ukraine

* e-mail: nata_demch@ukr.net

The effectiveness of protecting a structural steel by cationic inhibitor against biocorrosion caused by *Desulfovibrio* sp. M-4.1, *Desulfomicrobium* sp. TC 4, and sulfidogenic microbial communities was investigated by using gravimetric and electrochemical methods. The research showed that at a concentration of 1 g/l, the inhibitor offers greater protection to steel St3ps against *Desulfomicrobium* sp. TC 4 (up to 81.0%) than to *Desulfovibrio* sp. M-4.1 (up to 72.2%). The structure of the molecules of the inhibitor's compounds determines their ability to form a protective layer on the surface of the metal and exhibit antimicrobial action to sulfate-reducing bacteria and their satellites (iron-reducing bacteria). The inhibitor provides a high degree of protection (>92.9%) in microbial corrosion under the influence of sulfidogenic microbial communities. The cationic inhibitor was shown to have a greater effect on the electrochemical performance of the corrosion process for the biofilm form of sulfate-reducing bacteria than for the planktonic form.

Keywords: microbial corrosion; structural steel; cationic inhibitor; sulfidogenic microbial community; sulfate-reducing bacteria; strain *Desulfomicrobium* sp. TC 4; strain *Desulfovibrio* sp. M-4.1.

REFERENCES

1. Xu D, Li Y, Gu T. Mechanistic modeling of biocorrosion caused by biofilms of sulfate reducing bacteria and acid producing bacteria. *Bioelectrochemistry*. 2016; 110: 52-58. doi: 10.1016/j.bioelechem.2016.03.003.

2. Muyzer G, Stams AJM. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat Rev Microbiol*. 2008; 6: 441-454. doi: 10.1038/nrmicro1892.

3. Borec'ka MO, Kozlova IP. Bioplivka na poverkhni metalu yak faktor mikrobnoyi korozii' [Biofilm on a metal surface as a factor of microbial corrosion]. *Mikrobiologichnyi Zhurnal*. 2010; 72(3): 57-64. (in Ukrainian).

4. Polutrenko M, Krizhanivs'kij E, Poberezhnij L, Marushhak P, Bus'ko B, Daniljuk I. Vplyv mikroorganizmiv na koroziyu pidzemnykh metalokonstruktsii [Influence of microorganisms on corrosion of underground metal constructions]. *Visnik Ternopil's'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universytetu*. 2014; 74(2): 48-54. (in Ukrainian).

5. Purish DR, Abdulina GO, Iutynska LM. Inhibitors of corrosion induced by sulfate-reducing bacteria. *Mikrobiol Z*. 2021; 83(6): 95-109. doi: 10.15407/microbiolj83.06.095.

6. Kurmakova IM, Bondar OS, Vorobyova VI, Skiba MI, Chygyrynets OE, Demchenko NR. Peculiarities of triazoloazepinium bromides effect on steel microbial corrosion. *French Ukr J Chem*. 2018; 6(02): 59-72. doi: 10.17721/fujcV6I2P59-72.

7. Bondar O, Kurmakova I, Polevichenko S, Demchenko N. Biocorrosion of metal sewage treatment constructions and its inhibition with pyridinium chlorides. *Chem Chem Technol.* 2017; 11(4): 497-502. doi: 10.23939/chcht11.04.497.
8. Kurmakova I, Bondar O, Polevichenko S, Demchenko N. Quaternary pyridinium salts as inhibitors of mild steel biocorrosion. *Chem Chem Technol.* 2017; 11(3): 314-318. doi: 10.23939/chcht11.03.314.
9. Pogrebova IS. *Ingibitory korozii metaliv* [Metal corrosion inhibitors]. Kyiv: Hi-Tek Pres; 2012. 296 p. (in Ukrainian).
10. Widdel F, Bak F. Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria. In: Balows A, Truper HG, Dworkin M, Harder W, Schleifer KH, editors. *The Prokaryotes*. New York: Springer; 1992. p. 3352-3378. doi: 10.1007/978-1-4757-2191-1_21.
11. Asaulenko LG, Abdulina DR, Purish LM. Taksonomichne polozhennya okremykh predstavnykiv sul'fidogenogo koroziiino-agresyvnogo mikrobnogo ugrupovannya [Taxonomic position of certain representatives of sulfidogenic corrosive microbial community] *Mikrobiologichnyi Zhurnal.* 2010; 72(4): 3-10. (in Ukrainian).
12. Petrov NA, Davydova IN, Akodis MM. Primenenie kationnyh PAV giph-6 i giph-6b v protsessakh neftianoï promyshlennosti [The use of cationic surfactants giph-6 and giph-6b in the processes of the oil industry]. *Bashkir Khim Zh.* 2006; 13(2): 46-53. (in Russian).
13. Demchenko NR, Kurmakova IM, Tretjak OP. Osoblyvosti koroziiino aktyvnogo mikrobnogo ugrupovannya ferofery gazoprovodu, prokladenogo u pischanomu grunti [Features of the corrosion-active microbial community of the gas-pipeline ferrosphere laid in the sandy soil]. *Mikrobiologiya i Biotekhnologiya.* 2013; 4: 90-98. (in Ukrainian).
14. Ismail M, Yahaya N, Abu Bakar A, Noor NM. Cultivation of sulphate reducing bacteria in different media. *Malays J Civ Eng.* 2018; 26(3): 456-465. doi: 10.11113/mjce.v26.15903.
15. Vorobey ES, Voronkova OS, Vinnikov AI. Bakterial'ni bioplivky. Quorum sensing – «vidchuttya kvorumu» u bakterii v bioplivkakh [Bacterial biofilms. Bacteria quorum sensing in biofilms]. *Vmsn Dnipropetr Univ Ser Biol Ekol.* 2012; 20(1): 13-22. (in Ukrainian).

7. Bondar O, Kurmakova I, Polevichenko S, Demchenko N. Biocorrosion of metal sewage treatment constructions and its inhibition with pyridinium chlorides. *Chem Chem Technol.* 2017; 11(4): 497-502. doi: 10.23939/chcht11.04.497.
8. Kurmakova I, Bondar O, Polevichenko S, Demchenko N. Quaternary pyridinium salts as inhibitors of mild steel biocorrosion. *Chem Chem Technol.* 2017; 11(3): 314-318. doi: 10.23939/chcht11.03.314.
9. Pogrebova IS. *Ingibitory korozii metaliv* [Metal corrosion inhibitors]. Kyiv: Hi-Tek Pres; 2012. 296 p. (in Ukrainian).
10. Widdel F, Bak F. Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria. In: Balows A, Truper HG, Dworkin M, Harder W, Schleifer KH, editors. *The Prokaryotes*. New York: Springer; 1992. p. 3352-3378. doi: 10.1007/978-1-4757-2191-1_21.
11. Asaulenko LG, Abdulina DR, Purish LM. Taksonomichne polozhennya okremykh predstavnykiv sul'fidogenogo koroziiino-agresyvnogo mikrobnogo ugrupovannya [Taxonomic position of certain representatives of sulfidogenic corrosive microbial community] *Mikrobiologichnyi Zhurnal.* 2010; 72(4): 3-10. (in Ukrainian).
12. Petrov NA, Davydova IN, Akodis MM. Primenenie kationnyh PAV giph-6 i giph-6b v protsessakh neftianoï promyshlennosti [The use of cationic surfactants giph-6 and giph-6b in the processes of the oil industry]. *Bashkir Khim Zh.* 2006; 13(2): 46-53. (in Russian).
13. Demchenko NR, Kurmakova IM, Tretjak OP. Osoblyvosti koroziiino aktyvnogo mikrobnogo ugrupovannya ferofery gazoprovodu, prokladenogo u pischanomu grunti [Features of the corrosion-active microbial community of the gas-pipeline ferrosphere laid in the sandy soil]. *Mikrobiologiya i Biotekhnologiya.* 2013; 4: 90-98. (in Ukrainian).
14. Ismail M, Yahaya N, Abu Bakar A, Noor NM. Cultivation of sulphate reducing bacteria in different media. *Malays J Civ Eng.* 2018; 26(3): 456-465. doi: 10.11113/mjce.v26.15903.
15. Vorobey ES, Voronkova OS, Vinnikov AI. Bakterial'ni bioplivky. Quorum sensing – «vidchuttya kvorumu» u bakterii v bioplivkakh [Bacterial biofilms. Bacteria quorum sensing in biofilms]. *Vmsn Dnipropetr Univ Ser Biol Ekol.* 2012; 20(1): 13-22. (in Ukrainian).