

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-46>

УДК 66.094.3:678.742:553.635

ВОРОБІЙОВА ВІКТОРІЯ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

e-mail: vorobyovavika1988@gmail.com

МІЛЕР ЮЛІЯ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0002-5241-4833>

e-mail: julia.milyar@gmail.com

ЗАКРЕВСЬКИЙ БОГДАН

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

e-mail: bogdan.zakrevskiy@gmail.com

МОТРОНІУК ТЕТЯНА

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0002-3717-5934>

e-mail: t.motronyuk@kpi.ua

БІОСУРФАКТИН ЯК ОСНОВА «ЗЕЛЕНИХ» ІНГІБІТОРІВ І МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ МЕТАЛІВ

Корозія металів є однією з ключових проблем сучасної промисловості, що призводить до значних економічних втрат і зниження надійності обладнання. Традиційні хімічні інгібітори корозії часто є токсичними та малобіорозкладними, що стимулює пошук екологічно безпечних альтернатив на основі природних або біотехнологічно отриманих сполук. Особливу увагу привертають біосурфактанти — мікробні поверхнево-активні речовини, здатні утворювати адсорбційні захисні шари на металевих поверхнях та змінювати кінетику електрохімічних процесів корозії. Серед них одним із найвідоміших є сурфактин, циклічний ліпопептид, синтезований бактеріями *Bacillus subtilis*, що поєднує гідрофобний вуглеводневий ланцюг і гідрофільну пептидну частину, забезпечуючи високу поверхневу активність та стабільну пасивацію металу.

Сучасна класифікація біосурфактантів виділяє два покоління: перше — біо-базовані хімічно синтезовані сурфактанти з рослинної чи тваринної сировини, і друге — мікробіологічно синтезовані речовини, до яких належить сурфактин та його похідні, що мають високу біорозкладність, низьку токсичність і біологічну активність. Узагальнення літературних даних свідчить про перспективність біосурфактину як «зеленого» інгібітора корозії та підкреслює необхідність подальших досліджень його ефективності у нейтральних водних середовищах. Проведено оцінку інгібуючої дії біосурфактину у нейтральних водно-сольових середовищах, зокрема в модельному розчині № 5 ($\text{NaCl} - 82,0 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 74,0 \text{ мг/дм}^3$, $\text{NaHCO}_3 - 80,0 \text{ мг/дм}^3$ та $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 82,0 \text{ мг/дм}^3$) та 3% NaCl , де він гальмує як анодну, так і катодну складові корозійного процесу. Утворена на поверхні сталі адсорбційна плівка значно знижує густину граничного дифузійного струму, ефективно блокуючи доступ кисню та забезпечуючи інгібування корозії катодно-анодного типу.

Ключові слова: біосурфактин, інгібування корозії, зелена хімія, адсорбційна плівка, нейтральні водні середовища, *Bacillus subtilis*

VOROBYOVA VIKTORIA, MILLER JULIA, ZAKREVSKY BOHDAN, MOTRONYUK TETYANA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

BIOSURFACTIN AS A BASIS FOR "GREEN" INHIBITORS AND MATERIALS TO ENHANCE THE CORROSION RESISTANCE OF METALS

Metal corrosion is a major challenge in modern industry, leading to significant economic losses and reduced equipment reliability. Conventional chemical corrosion inhibitors are often toxic and poorly biodegradable, prompting the search for environmentally friendly alternatives based on natural or biotechnologically derived compounds. Biosurfactants — microbial surface-active agents — have gained attention due to their ability to form protective adsorbed layers on metal surfaces and modulate electrochemical corrosion kinetics. Among these, surfactin, a cyclic lipopeptide produced by *Bacillus subtilis*, combines a hydrophobic hydrocarbon chain with a hydrophilic peptide moiety, providing high surface activity and stable metal passivation.

Current classifications distinguish two generations of biosurfactants: first-generation bio-based chemically synthesized surfactants from plant or animal feedstocks, and second-generation microbiologically synthesized compounds, including surfactin and its derivatives, which exhibit high biodegradability, low toxicity, and notable biological activity. Literature data highlight surfactin's potential as a "green" corrosion inhibitor and underscore the need for further studies in neutral aqueous environments.

The inhibitory effect of surfactin was assessed in neutral aqueous-salt solutions, specifically in model solution No. 5 ($\text{NaCl} - 82.0 \text{ mg/dm}^3$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 74.0 \text{ mg/dm}^3$, $\text{NaHCO}_3 - 80.0 \text{ mg/dm}^3$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 82.0 \text{ mg/dm}^3$) and in 3% NaCl . In both media, surfactin effectively suppresses anodic and cathodic components of corrosion. The adsorbed film formed on steel surfaces markedly reduces the limiting diffusion current density, restricting oxygen access and enabling cathodic-anodic corrosion inhibition. These findings support surfactin as an eco-friendly alternative to conventional inhibitors and motivate further investigations into its protective mechanisms across diverse aqueous environments.

Keywords: biosurfactin, corrosion inhibition, green chemistry, adsorption film, neutral aqueous environments, *Bacillus subtilis*

Стаття надійшла до редакції / Received 12.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Воробійова Вікторія, Мілер Юлія, Закревський Богдан, Мотронюк Тетяна

Постановка проблеми

Корозія металів є однією з найсерйозніших проблем сучасної промисловості, що призводить до значних

економічних втрат, зниження надійності обладнання та ризиків для довкілля [1-5]. Для запобігання корозійним процесам традиційно застосовують хімічні інгібітори, більшість з яких є токсичними, слабо біодеградованими та потенційно небезпечними для живих організмів. У зв'язку з цим зростає інтерес до розробки екологічно безпечних, ефективних і біосумісних інгібіторів корозії, зокрема на основі природних або біотехнологічно отриманих сполук [5-7]. Традиційно в ролі природних інгібіторів корозії найчастіше досліджуються сурфактини — мікробні ліпопептиди з вираженими поверхнево-активними властивостями, які утворюють на металі захисні адсорбційні шари. Однак останнім часом увага науковців дедалі більше зосереджується на біосурфактинах — похідних або біотехнологічно модифікованих формах сурфактину, що характеризуються вищою стабільністю, кращою біосумісністю та здатністю до ефективнішої пасивації металевих поверхонь. Завдяки оптимізованому складу та структурі, біосурфактини демонструють підвищену інгібуючу дію навіть у агресивних середовищах, поєднуючи ефективність традиційних інгібіторів із екологічною безпечністю біогенних сполук.

Серед таких сполук особливу увагу привертають біосурфактанти — поверхнево-активні речовини мікробного походження, здатні знижувати міжфазну напругу, формувати адсорбційні плівки на поверхні металів і змінювати кінетику електрохімічних процесів корозії. Одним із найвідоміших представників цього класу є сурфактин, циклічний ліпопептид, синтезований бактеріями *Bacillus subtilis*. Завдяки поєднанню гідрофобного вуглеводневого ланцюга та гідрофільної пептидної частини, сурфактин проявляє амфіфільні властивості, що забезпечує йому високу поверхневу активність і здатність до утворення стабільних захисних шарів на металевих поверхнях.

Останні дослідження свідчать, що біосурфактин — одна з модифікацій сурфактину — може ефективно інгібувати корозію сталей у водних та кислих середовищах завдяки адсорбції на поверхні металу та утворенню бар'єрної плівки, яка перешкоджає дифузії іонів і розчиненого кисню. Крім того, його висока біорозкладність, низька токсичність і здатність до самовідновлення захисного шару роблять біосурфактин перспективним компонентом для «зелених» систем захисту металів. У більшості випадків біосурфактин як інгібітор корозії досліджувався переважно в кислих [8-10] або агресивних середовищах, тоді як його поведінка у водному нейтральному середовищі залишається недостатньо вивченою. Це обмежує розуміння механізмів його адсорбції та формування захисного шару за умов, близьких до природних або експлуатаційних, що визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, вивчення механізмів дії біосурфактину як інгібітора корозії, його ефективності в різних умовах і взаємодії з поверхнею металу є актуальним напрямом сучасної корозійної науки, що поєднує екологічну безпеку та високі функціональні властивості.

Аналіз останніх джерел

У зв'язку зі зростанням попиту на екологічно чисті та біорозкладні альтернативи нафтохімічним сурфактантам у науковій літературі виділяють два покоління біосурфактантів залежно від джерела сировини, способу синтезу та біосинтетичної інтеграції.

Сурфактанти першого покоління — це біо-базовані речовини, синтезовані хімічним шляхом із поновлюваної сировини (рослинні чи тваринні жири, біомаса). Вони складаються з гідрофільної частини (моносахариди або поліоли) та гідрофобної частини (довголанцюгові жирні кислоти чи спирти). Прикладами є алкілполіглюкозиди, сахарозні та сорбітанові ефіри жирних кислот, гліцерин-основні сурфактанти та сапоніни. Такі речовини біорозкладні та менш токсичні, але не є продуктом прямого біосинтезу мікроорганізмів.

Біосурфактанти другого покоління — це метаболіти мікроорганізмів, що синтезуються в процесі ферментації бактерій (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*) та дріжджів чи грибів. Вони утворюються як побічні або цільові продукти метаболізму, ефективні при низьких концентраціях, природно біорозкладні та мають біологічну активність (антибактеріальну, антиоксидантну, антикорозійну). Найвідоміші представники: сурфактин, рамноліпіди, софороліпіди, манозилеритритол ліпіди та інші ліпопептиди і глікопептиди. На відміну від першого покоління, їх виробництво обмежується лише ферментацією та очищенням, але масштабне виробництво залишається складним через низьку врожайність і високу собівартість. Основним продуцентом цієї сполуки є бактерія *Bacillus subtilis*, які синтезують сурфактин і його похідні шляхом ферментативного біосинтезу. Завдяки амфіфільній будові молекули, біосурфактин здатний ефективно адсорбуватись на межі «метал–розчин», знижуючи поверхневу енергію та перешкоджаючи протіканню анодних і катодних реакцій корозії [11-14].

Результати попередніх досліджень показали, що сурфактин і подібні біосурфактанти можуть істотно зменшувати швидкість корозії сталей, міді та алюмінію у кислому середовищі. Основним механізмом дії вважають утворення захисної плівки, що складається з адсорбованих молекул біосурфактанту, які ізолюють поверхню металу від агресивних іонів, насамперед хлоридів і водневих іонів [2-6]. Крім того, повідомляється про можливу комплексоутворюючу дію між функціональними групами ліпопептиду та іонами металів, що додатково зміцнює захисний шар.

Попри ці позитивні результати, більшість робіт присвячено вивченню ефективності біосурфактину саме в кислих або сольових середовищах, тоді як його поведінка у водних нейтральних розчинах залишається малодослідженою. Недостатньо даних про стабільність адсорбційного шару в умовах, близьких до природних, а також про вплив рН, іонної сили та концентрації біосурфактину на антикорозійну дію.

Таким чином, узагальнення літературних даних свідчить про перспективність біосурфактину як «зеленого» інгібітора корозії, проте подальші дослідження необхідні для з'ясування його ефективності у нейтральному водному середовищі.

Формулювання цілей статті

Основною метою роботи є вивчення впливу біосурфактину на електрохімічні реакції корозійного процесу сталі з метою встановлення механізмів його інгібуючої дії, характеру адсорбції на поверхні металу та ефективності формування захисного шару у водному нейтральному середовищі.

Виклад основного матеріалу

Методика досліджень. У роботі досліджено сталь марки Ст3, що належить до найбільш поширеної у сучасному металургійному виробництві. Ці конструкційні сталі широко використовуються в різних галузях промисловості для виготовлення металевих виробів, дрібних елементів технологічного обладнання, металевих напівфабрикатів, а також гарячекатаного прокату — листів, труб, сортового та фасонного прокату. Випробування інгібіторів корозії для оцінки їхньої ефективності захисту металів і сплавів у водних системах із рН, наближеним до нейтрального, проводили відповідно до вимог ГОСТ 9.502-82. Для визначення ступеня універсальності інгібіторів випробування здійснювали у дистильованій, водопровідній воді, а також у модельних водно-солевих розчинах, регламентованих ГОСТ 9.502. У даній роботі використано розчин №5 а 3% NaCl. Оцінку захисної здатності інгібіторів проводили за результатами випробувань у статичних та динамічних умовах. Склад модельного розчину №5 за ГОСТ 9.502 становить: NaCl – 82,0 мг/дм³, Na₂SO₄ – 74,0 мг/дм³, NaHCO₃ – 80,0 мг/дм³ та Ca(NO₃)₂ – 82,0 мг/дм³.

Дослідження здійснювали шляхом витримування (експонування) зразків протягом визначеного часу у модельному розчині №5. Випробування проводили у скляній комірці об'ємом 250 мл, у якій зразки закріплювали у вертикальному положенні. Тривалість експонування становила не менше 30 діб — до досягнення сталості швидкості корозії. Визначення захисної здатності інгібіторів здійснювали при температурі 25 °С. Оптимальну концентрацію інгібіторів встановлювали експериментально. Після закінчення випробувань проводили візуальну оцінку стану зразків згідно з ГОСТ 9.908-85.

Ефективність протикорозійного захисту визначали за показниками швидкості корозії (г/м²·год), коефіцієнта гальмування (γ) та ступеня захисту (Z , %), розрахованими за результатами масометричних вимірювань.

Поляризаційні вимірювання виконували за допомогою потенціостата PG Stat 500 N у потенціодинамічному режимі. Дослідження проводили в трьохелектродній електрохімічній комірці об'ємом 60 мл, що включала робочий електрод із сталі Ст3 циліндричної форми з площею 0,385 см², закріплений у тефлоні, електрод порівняння — насичений сульфатно-закисний або хлорсрібний, та допоміжний платиновий електрод. Анодна та катодна поляризація виконувалася зі швидкістю 2 мВ/с, а потенціали переводили на нормальну водневу шкалу. Поляризаційні криві отримували, задаючи потенціал від безструмового значення з визначеним кроком у анодній і катодній областях.

Перед дослідженнями робочий електрод механічно полірували та знежирювали етиловим спиртом. Безструмовий потенціал визначали шляхом витримування електрода в досліджуваних розчинах протягом 15–30 хвилин. Вольтамперні вимірювання проводили в модельних електролітах, описаних вище.

При поляризаційних вимірюваннях ефективність дії інгібіторів оцінювали за величинами коефіцієнтів гальмування анодного та катодного (γ_a) корозійних процесів (γ_k) при обраних потенціалах, які розраховували за формулами (2.5)

$$\gamma = \frac{i_0}{i_{inc}}, \quad (1)$$

де i_0 — щільність струму на сталі (при певному потенціалі на отриманих анодних(γ_a) або катодних(γ_k) поляризаційних кривих)без використанні інгібітору;

i_{inc} щільність струму на сталі (при певному потенціалі на отриманих анодних або катодних поляризаційних кривих) при використанні інгібітору.

Швидкість корозії визначали графічним методом за перетином анодної та катодної поляризаційної кривої (рис. 1).

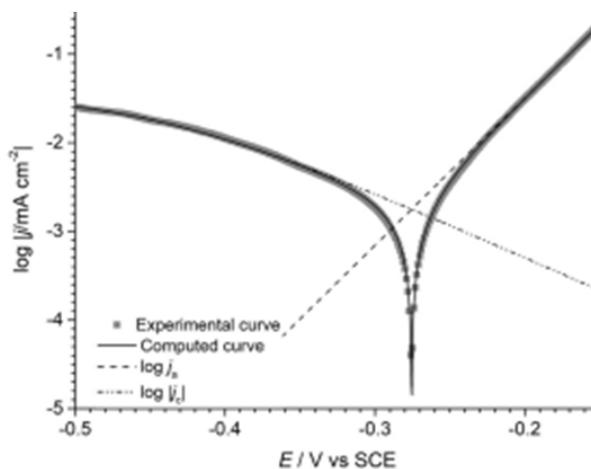


Рис. 1 - Графічний метод визначення швидкості корозії

Обговорення експериментальних даних. При дослідженні нових інгібіторів особливо важливо вивчати електрохімічну поведінку сталі в модельних електролітах. Нижче наведено результати електрохімічних досліджень із застосуванням біосурфактину у водних системах після 24 годин корозійних випробувань (рис. 2 та 3).

У двох розчинах корозійний процес протікав із кисневою деполаризацією. Виявлено, що у нейтральних водно-сольових середовищах, зокрема в модельному розчині № 5 та 3% NaCl, біосурфактин гальмує як анодну, так і катодну складові корозійного процесу, що призводить до зниження густини граничного дифузійного струму. Слід зазначити, що ефективність інгібування дещо варіюється залежно від складу водно-сольового середовища, проте у всіх випадках біосурфактин забезпечує пригнічення обох електродних реакцій і загального корозійного процесу. У обох розчинах (модельний розчин №5 і 3% NaCl) додавання біосурфактину суттєво зменшує густину струму як в анодній, так і в катодній області. У модельному розчині №5 без інгібітору максимальна густина струму досягає приблизно 10^{-2} А/см², а з біосурфактином падає до 10^{-4} – 10^{-3} А/см², що свідчить про сильне гальмування корозії. У 3% NaCl ефект також наявний, проте зменшення струму менш значне, криві з інгібітором лише трохи зміщуються вниз. Використання біосурфактину підвищує поляризацію катодних та анодних реакцій корозійних процесів і зміщують потенціал корозії сталі до більш негативних значень. Сформована плівка на поверхні сталі у модельному розчині № 5 знижує значення густини струму на катодних поляризаційних кривих, як в кінетичній області, так і в області граничних дифузійних струмів. Значення густини граничного дифузійного струму (при $E = -0,9$ В) без використання інгібітору дорівнює $0,01928$ А/см², а при використанні інгібітору $0,00208$ А/см². Коефіцієнт гальмування $\gamma = 9.26$. У обох випадках плівка, що сформована на поверхні біосурфактином сприяє невеликому змищенню потенціалу корозії у більш негативну сторону. Це свідчить про вплив біосурфактину як на анодну, так і на катодну реакції (тобто катодно-анодний тип інгібування).

Тобто можна зробити висновок, що досліджуваний рослинні екстракти у водному середовищі №5 та 3 % NaCl переважно є інгібіторами катодно-анодного типу, де за рахунок формування адсорбційної плівки відбувається блокування доступу кисню до поверхні металу та ефективно гальмування корозійного процесу.

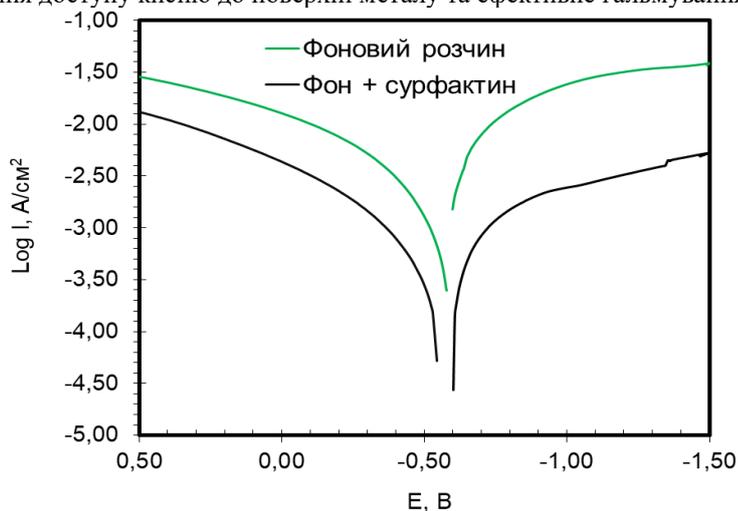


Рис. 2 Поляризаційні анодна та катодна криві на сталі у водно-сольовому розчині № 5 без інгібітору корозії та при використанні біосурфактину (тривалість витримки у розчині 24 години).

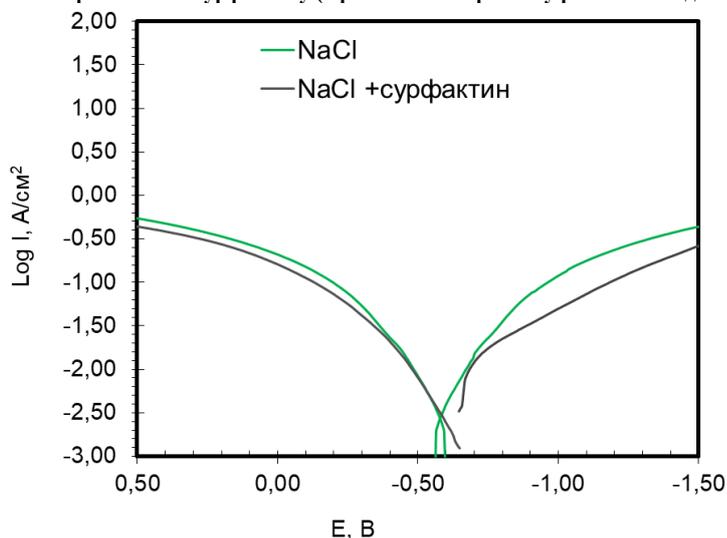


Рис. 3 Поляризаційні анодна та катодна криві на сталі в розчині 3% NaCl без інгібітору корозії та при використанні біосурфактину (тривалість витримки у розчині 24 години)

Висновки

Проведені дослідження показали, що у двох типах водно-солевих розчинів (модельний розчин № 5 та 3% NaCl) корозійний процес протікав із кисневою деполаризацією. Біосурфактин ефективно гальмує як анодну, так і катодну складові корозійного процесу, що призводить до значного зниження густини граничного дифузійного струму та загальної швидкості корозії.

Формування адсорбційної плівки на поверхні сталі сприяє блокуванню доступу кисню до металу, підвищенню поляризації катодних і анодних реакцій та зміщенню потенціалу корозії у більш негативний бік. Отримані дані підтверджують, що біосурфактин діє як інгібітор катодно-анодного типу, ефективно пригнічуючи обидві електродні реакції і забезпечуючи захист металу від корозії у нейтральних водно-солевих середовищах.

Література

1. Lavagna, M., & Machado, A. A. (2024). Surfactants as biodegradable sustainable inhibitors for corrosion control in diverse media and conditions: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 908, Article 168407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168407>
2. Green chemistry solutions in corrosion inhibition: A review of recent advances. (n.d.). Li, T., Wang, X., Zhang, M., et al. (2021). Electrostatic adsorption mechanism of EPS and its effect on corrosion inhibition. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 197, 111429. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111429>
3. Silva Faccioli, C., et al. (2022). Biocorrosion inhibition by biosurfactants: Electrochemical and surface characterization. *Journal of Molecular Liquids*, 360, 119567. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119567>
4. Guo, X., Zeng, H., Xie, Y., et al. (2017). Corrosion inhibition of carbon steel by exopolysaccharides produced by *Bacillus subtilis*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 125, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.09.011>
5. Tamilsleevi, S., et al. (2022). Investigation of mild steel corrosion inhibition by *Pichia sp.* using SEM and EDX analysis. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.126>
6. Parthipan, P., Preetham, E., & Anuradha, R. (2018). Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl solution using biosurfactant extracted from *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.011>
7. Zhang, Y., Zhang, W., Li, Y., & Zhang, Y. (2021). Experimental and theoretical investigations of a Gemini surfactant as a corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid. *Materials Chemistry and Physics*, 260, 124148. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124148>
8. Xiao, Y., Wei, Y., Liu, Y., & Zhang, Y. (2016). Adsorption and corrosion inhibition properties of benzimidazole derivative for carbon steel in hydrochloric acid. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 34, 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.11.036>
9. Chongdar, A., Gunasekaran, G., & Sreedhar, G. (2005). Corrosion inhibition of mild steel using an aqueous extract of *Hibiscus rosa-sinensis* leaves. *Corrosion Science*, 47(12), 2745–2750. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.027>
10. Dong, Y., Tang, Y., Wang, J., Liu, F., Zhang, H., & Liu, H. (2011). Influence of extracellular polymeric substances on the corrosion behavior of carbon steel in sulphate-reducing bacteria culture. *Corrosion Science*, 53(6), 2210–2216. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.031>
11. Örnek, D., Hall, S., Franklin, M. J., & Beech, I. B. (2002). Electrochemical characterization of the biofilm–metal interface using the wire beam electrode. *Biofouling*, 18(1), 25–36. <https://doi.org/10.1080/08927010290006592>
12. Rajasekar, A., Hasan, K., & Datta, C. (2024). Green corrosion inhibitors for metallic corrosion: Challenges and future perspectives. In *Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials* (pp. 525–548). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13288-9.00023-1>
13. Desai, J. D., & Banat, I. M. (1997). Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61(1), 47–64. <https://doi.org/10.1128/MMBR.61.1.4764.1997>
14. Mukherjee, S., Das, P., & Sen, R. (2006). Towards commercial production of microbial surfactants. *Trends in Biotechnology*, 24(11), 509–515. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2006.09.005>