

РОМАНЧУК ОЛЕКСАНДР

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-5981-9753>e-mail: oleksandr.o.romanchuk@lpnu.ua**ТОПІЛЬНИЦЬКИЙ ПЕТРО**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-7770-2567>e-mail: petro.i.topilnytskyi@lpnu.ua

ЗАХИСТ ОБЛАДНАННЯ НАФТОПЕРЕРОБНИХ ЗАВОДІВ ВІД КОРОЗІЇ, ЯКА СПРИЧИНЕНА СВІТЛИМИ НАФТОПРОДУКТАМИ, ОТРИМАНИМИ З НАФТ УКРАЇНСЬКИХ РОДОВИЩ

В роботі наведено результати визначення захисної здатності інгібіторів корозії, синтезованих на основі вищих дистильованих жирних кислот з яловичого жиру, в середовищах прямогонних бензинів, отриманих з нафти українських родовищ.

Ключові слова: корозія, інгібітори корозії, захист від корозії, прямогонний бензин.

ROMANCHUK OLEKSANDR**TOPILNYTSKYI PETRO**

Lviv Polytechnic National University

PROTECTION OF OIL REFINERY EQUIPMENT FROM CORROSION CAUSED BY LIGHT PETROLEUM PRODUCTS OBTAINED FROM UKRAINIAN OIL FIELDS

The application of corrosion inhibitors remains one of the most efficient approaches to safeguarding oil refining equipment from degradation. In the context of modern ecological and economic demands placed on industrial technologies, inhibitors synthesized from renewable natural resources are gaining increasing importance. This study aimed to analyze the corrosion behavior of refinery equipment exposed to straight-run gasolines derived from Ukrainian oil fields and to assess the protective performance of newly synthesized organic inhibitors in such environments. The inhibitors under investigation were produced on the basis of higher distilled fatty acids (HDFA) obtained from natural animal fats and further modified using diethanolamine (DEA) and diaminoethane (DAE). The reaction between HDFA and ethylenediamine resulted in the formation of mono- and disubstituted ethylamides (MZE and DZE), while the interaction of HDFA with diethanolamine produced dihydroxyethylamides of higher fatty acids (DHEA). The protective efficiency of these inhibitors was assessed via the gravimetric method, which determines the mass loss of metal samples immersed in a medium both with and without the inhibitor. Experimental studies were performed in environments consisting of straight-run gasolines obtained from the Kachanivska, Novohryhorivska, and Bugruvativska fields, as well as a blend from the Yablunivske field (Ukraine). Each gasoline sample was mixed with an aqueous saline solution in a 9:1 ratio. The analysis demonstrated that the efficiency of the inhibitors is strongly influenced by both the composition of the gasoline and the chemical nature of the inhibiting agent. The highest degree of protection—up to 95.45%—was recorded for the DHEA inhibitor in gasoline derived from Kachanivska oil. Consequently, the corrosion inhibition efficiency is determined not only by the molecular characteristics of the inhibitor but also by the physicochemical properties of the fuel medium. These inhibitors exhibit optimal performance in low-acid, low-sulfur, and light gasoline environments, while in more aggressive conditions their protective capacity decreases due to complex adsorption behavior and partial destruction of the formed protective layer by active components of the fuel.

Keywords: corrosion, corrosion inhibitors, corrosion protection, straight-run gasoline

Стаття надійшла до редакції / Received 13.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасна нафтопереробна промисловість розвивається в умовах постійного підвищення вимог до якості готової продукції та довговічності технологічного обладнання. Одним із найгостріших технічних викликів залишається проблема корозійного пошкодження апаратів і трубопроводів, що контактують із нафтовими фракціями. Особливо це стосується прямогонних бензинів, у складі яких часто присутня значна кількість сірковмісних компонентів.

Прямогонний бензин являє собою первинну бензинову фракцію, отриману під час атмосферної перегонки нафти без процесу гідроочищення. Його сірчистість визначається складом вихідної нафти і може становити від 0,02 до 0,15 % мас., а подекуди досягати 0,3 % мас. Навіть незначний вміст сірки призводить до формування агресивного середовища, що активізує хімічні та електрохімічні процеси корозії металів [1].

Основними сірковмісними сполуками у прямогонних бензинах є меркаптани, сульфіді, дисульфіді, тіофени та сірководень. При підвищенні температури (180–200 °C) вони частково розкладаються з утворенням вільного сірководню та низькомолекулярних органічних кислот. У присутності водяної пари, кисню або хлоридів ці продукти перетворюються на сірчисту та сірчану кислоти, які руйнують окисні захисні плівки на поверхні металів [2–4].

Найінтенсивніше корозійні процеси розвиваються у теплообмінниках, ректифікаційних колонах і стабілізаторах, де спостерігаються різкі перепади температури й тиску. Крім того, ненасичені вуглеводні, що входять до складу прямогонного бензину, можуть полімеризуватися, утворюючи смолисті відкладення, які порушують рівномірність теплопередачі та створюють локальні ділянки підвищеної корозійної активності.

Установки атмосферно-вакуумної перегонки та процеси вторинної переробки (каталітичний або термічний крекінг, коксування, ізомеризація) функціонують у складних умовах — при високих температурах (до 500 °C), тиску 3–5 МПа та наявності агресивних газів і пари. У таких середовищах формується комплексна дія електрохімічної, газової та ерозійної корозії.

Відомо, що навіть при вмісті сірки близько 0,1 % мас. швидкість руйнування вуглецевих сталей може зростати у 5–7 разів порівняно з безсірковими середовищами. Особливо небезпечними є так звані «мокрі» сірководневі корозії, які проявляються при температурах нижче 150 °C у конденсаційних зонах теплообмінників і холодильників. Тут відбувається утворення кислот, здатних активно руйнувати метал навіть за мінімальних концентрацій сірки у вихідній сировині.

Порівняльний аналіз свідчить, що рівень корозійної агресивності прямогонних бензинів визначається не лише загальним вмістом сірки або кислотним числом, а й природою органічних компонентів, їх термостійкістю та схильністю до взаємодії з металевою поверхнею.

У зв'язку з цим особливого значення набуває індивідуальний підхід до вибору інгібіторів корозії для кожного конкретного типу нафтової сировини. Проведення таких досліджень має практичну цінність, оскільки дає змогу оптимізувати умови експлуатації обладнання, знизити втрати від корозії та підвищити надійність функціонування нафтохімічних підприємств..

Аналіз досліджень та публікацій

Застосування інгібіторів корозії є одним із найефективніших методів захисту технологічного обладнання від руйнування. Органічні інгібітори формують на поверхні металу тонкий захисний шар, який запобігає безпосередньому контакту агресивних компонентів нафти з металом. Такий інгібіторний бар'єр значно зменшує інтенсивність розвитку піттингової, щілинної та загальної корозії, навіть за підвищених температур перегонки та за наявності водяних домішок.

Використання інгібіторів забезпечує не лише зниження швидкості корозійного процесу, а й підвищення стабільності роботи технологічних систем, скорочення простоїв та зменшення виробничих і економічних втрат. Таким чином, інгібіторний захист є невід'ємним елементом експлуатації обладнання на нафтопереробних підприємствах, де металеві конструкції піддаються дії агресивних середовищ.

Серед різноманіття інгібіторів найбільше поширення отримали органічні та неорганічні сполуки, здатні утворювати на поверхні металу стійку пасивуючу плівку. Органічні інгібітори, як правило, містять у своїй структурі атоми азоту, сірки або кисню, що забезпечують хімічну адсорбцію на металевій поверхні. Вони демонструють високу ефективність проти локалізованих форм корозії, зокрема піттингової та щілинної, які характерні для середовищ із підвищеним вмістом сірковмісних і смолистих речовин. До таких інгібіторів належать аміни, амідні, тіоацетамідні та меркаптаноподібні сполуки, здатні створювати міцну молекулярну плівку, що перешкоджає доступу агресивних реагентів до металу.

Останніми роками особливу увагу приділяють розробці інгібіторів корозії з відновлюваної сировини, що відповідає сучасним екологічним та економічним вимогам промисловості [5–13]. Перевага таких сполук полягає у їхній біорозкладності, низькій токсичності та відсутності шкідливих компонентів, властивих традиційним синтетичним реагентам. Біоінгібітори, завдяки природному походженню сировини, розглядаються як екологічно безпечна альтернатива промисловим зразкам, що особливо актуально для нафтопереробної галузі, де питання екологічної безпеки стають дедалі важливішими [14].

Відновлювана сировина, яка використовується для синтезу таких інгібіторів, є доступною та часто отримується з побічних продуктів сільськогосподарської або харчової промисловості. Це сприяє раціональному використанню ресурсів і зниженню виробничих витрат. За оцінками 2021–2022 років, під час переробки жирів і олій утворюється близько 1,2–1,5 % відходів [15], що становить приблизно 190–240 тис. метричних тонн тваринних жирів і 2,5–3,1 млн тонн рослинних відходів на рік у світі. Такі обсяги є достатніми для виробництва альтернативних екологічно безпечних реагентів, у тому числі інгібіторів корозії.

Біоорганічні сполуки, що входять до складу цих інгібіторів, ефективно адсорбуються на металевих поверхнях, формуючи стійкі захисні плівки, які запобігають розвитку корозії навіть у складних і агресивних умовах. Можливість хімічної модифікації природних молекул дозволяє цілеспрямовано регулювати їхні властивості, адаптуючи до конкретних умов експлуатації та підвищуючи захисну ефективність [16–18].

Перспективи застосування інгібіторів, отриманих з відновлюваної сировини, визначаються їхньою сумісністю з існуючими технологічними процесами та можливістю інтеграції у діючі системи антикорозійного захисту [19–20]. Подальше вдосконалення складу таких матеріалів, підвищення їх термостійкості та механічної міцності відкриває нові напрями для використання у нафтопереробній і хімічній промисловості. Впровадження біоінгібіторів дозволить знизити експлуатаційні витрати, подовжити термін служби обладнання та підвищити загальну економічну ефективність виробництва [10].

Формулювання цілей статті

Мета роботи: дослідити корозію обладнання в середовищі прямогонних бензинів, отриманих з нафт українських родовищ та визначити захисний ефект синтезованих інгібіторів органічного походження в цих середовищах.

Виклад основного матеріалу

Інгібітори корозії, синтезовані на основі біоорганічних сполук, зокрема вищих дистильованих жирних кислот (ВДЖК), отриманих із природних тваринних жирів, розглядаються як перспективний напрям створення екологічно безпечних антикорозійних матеріалів. ВДЖК являють собою суміш карбонових кислот з довгими

вуглеводневими ланцюгами ($C_{14}-C_{18}$), серед яких переважають пальмітинова, стеаринова, олеїнова та лінолева кислоти. Завдяки наявності гідрофобних фрагментів і реакційно активних карбоксильних груп ці сполуки мають високу адсорбційну здатність і здатні утворювати на металічних поверхнях щільні захисні плівки, що перешкоджають проникненню агресивних компонентів середовища — сірководню, органічних кислот і кисню.

З метою підвищення ефективності корозійного захисту ВДЖК було модифіковано азотовмісними реагентами — діетаноламіном (ДЕА) і діаміноетаном (ДАЕ). Реакція між кислотними та амініними групами приводить до утворення амідів жирних кислот, які характеризуються підвищеною полярністю та більшою схильністю до хемосорбції на металах.

Процес синтезу здійснювали у трьохгорлій колбі, оснащений механічною мішалкою, термометром та зворотним холодильником. У реакційну суміш завантажували ВДЖК, після чого додавали розраховану кількість аміну (еквімолярну або з 5–10 % надлишком). Реакційну систему інтенсивно перемішували та нагрівали до 120–140 °С, витримуючи 2–3 години при постійному перемішуванні. Перебіг реакції контролювали за кількістю води, що виділялася як побічний продукт конденсації. Після завершення процесу суміш охолоджували до кімнатної температури.

Отриманий продукт мав в'язку маслянисту консистенцію та забарвлення від світло-жовтого до бурштинового. Синтезована речовина є сумішшю амідів і солей жирних кислот, які становлять активну основу інгібітора. У разі взаємодії кислот із етилендіаміном утворювалися моно- або дизаміщені етиламіди похідні (МЗЕА і ДЗЕА), тоді як реакція ВДЖК із діетаноламіном призводила до формування дигідроксиетиламідів вищих жирних кислот (ДГЕА).

Азотовмісні продукти модифікації діють як адсорбційні інгібітори, формуючи на поверхні металу щільну гідрофобну плівку. Її стабільність зумовлена комбінацією кількох факторів:

- хімічною адсорбцією (хемосорбцією) атомів азоту та кисню, які утворюють координаційні зв'язки з іонами Fe^{2+} ;
- фізичною адсорбцією довгих вуглеводневих ланцюгів ВДЖК, що орієнтуються паралельно поверхні металу та створюють бар'єр для проникнення води й кислих компонентів;
- внутрішньомолекулярною впорядкованістю, яка забезпечує термічну стійкість захисної плівки навіть за температур до 200 °С.

Дослідження показали, що ефективність таких інгібіторів у середовищах, які містять сірководень і хлориди, може сягати 85–95 %, залежно від їх концентрації (0,05–0,2 % мас.) і тривалості дії. Порівняно з традиційними фосфорорганічними інгібіторами, аміді ВДЖК є екологічно безпечними, нетоксичними, біорозкладними і не утворюють стабільних емульсій у відпрацьованих потоках.

Характеристики синтезованих інгібіторів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика інгібіторів корозії

Скорочена назва синтезованого інгібітора	Температура застигання, °С	Густина при 40 °С, кг/м ³	Показник заломлення при 40 °С
ДЗЕА	27	979	1,4865
МЗЕА	31	964	1,4858
ДГЕА	28	984	1,4871

Було проведено дослідження захисної ефективності синтезованих інгібіторів у середовищах прямогонних бензинів, отриманих із нафт Качанівського, Новогригорівського та Бугруватівського родовищ, а також із суміші нафт Яблунівського родовища (Україна). Характеристики використаних бензинових зразків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристика фракцій, які википають до 200 °С

Нафта	Вихід бензинової фракції, %	Фракційний склад бензинової фракції, °С				Густина при 20 °С, кг/м ³	Кислотність, мг КОН на 100 мл фракції	Вміст S, %
		t п.к.	10 %	50 %	90 %			
Качанівська	31,2	85	106	131	178	745	1,45	0,01
Новогригорівська	27,8	95	110	140	185	772	2,50	0,05
Бугруватівська	17,0	79	120	168	189	785	9,6	0,42
Суміш нафт Яблунівського родовища	14,6	56	107	167	190	755	9,2	0,31

Бензин, отриманий із Качанівської нафти, характеризується низьким вмістом сірки (0,01 %) та невисоким кислотним числом (1,45 мг КОН/г), що свідчить про його відносно слабку агресивність до металевих матеріалів. Легкий фракційний склад ($t_{\text{початку кипіння}} = 85$ °С, $t_{90\%} = 178$ °С) і невелика густина (745 кг/м³) додатково знижують схильність цього палива до утворення смолистих залишків і продуктів термічної деструкції, які зазвичай сприяють локальному прискоренню корозії.

На відміну від нього, бензин із Новогригорівської нафти має підвищений вміст сірки (0,05 %) і більше кислотне число (2,50 мг КОН/г). Такі характеристики вказують на вищу концентрацію органічних кислот та сірковмісних сполук, здатних гідролізуватися з утворенням агресивних продуктів — сірководню та тіолів. Підвищена густина (772 кг/м³) і ширший інтервал кипіння можуть свідчити про наявність важчих компонентів, що збільшують ризик корозійного пошкодження за підвищених температур.

Бензин, виділений із Бугруватівської нафти, займає проміжне положення за характеристиками: він має ширший фракційний склад ($t_{\text{початку кипіння}} = 79\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{90\%} = 189\text{ }^{\circ}\text{C}$), відносно високий вміст сірки (0,42 %) та дуже велике кислотне число (9,6 мг КОН/г). Останній показник свідчить про значну кількість органічних кислот, що зумовлює найвищу потенційну корозійну агресивність цього зразка серед досліджуваних.

Суміш нафт Яблунівського родовища характеризується вмістом сірки 0,31 % і підвищеним кислотним числом (8,9 мг КОН/г), що вказує на достатньо високу корозійну активність. Хоча густина бензину (755 кг/м³) дещо знижує схильність до утворення смолистих відкладень, це не компенсує впливу сірковмісних компонентів, які під час нагрівання легко розкладаються з утворенням H₂S, SO₂ та інших агресивних речовин.

Оцінку ефективності синтезованих інгібіторів проводили гравіметричним методом, який полягає у визначенні втрати маси металевої пластинки після експозиції в середовищі з інгібітором і без нього [21]. Дослідження виконували з використанням 5 %-них розчинів інгібіторів у вуглеводневому розчиннику. Концентрація активної речовини становила 100 ppm, що відповідало 0,65 мл 5 %-ного розчину інгібітора на 300 мл модельного середовища.

Як контрольні зразки використовували металеві пластинки зі сталі Ст3 загальною площею поверхні близько 30 см². Хімічний склад сталі наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Хімічний склад сталі, % мас.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Fe
0,27-0,34	0,17-0,37	0,5-0,8	≤0,035	≤0,035	≤0,25	≤0,25	≤0,30	≈97,5-98,5

Дослідження ефективності інгібіторів проводили у двофазних системах, що складалися з водного розчину солей і прямогонного бензину відповідної нафти. Водна фаза моделювала пластову воду та містила основні іони, характерні для нафтопромислових середовищ. Її склад був таким: NaCl – 163 г/л, MgCl₂·6H₂O – 17 г/л, Ca(HSO₄)₂·2H₂O – 0,14 г/л, CaCl₂ – 34 г/л. Співвідношення фаз вода : бензин становило 1 : 9. Тривалість експерименту — 2 години, температура проведення досліду — 50 °C.

Швидкість корозії (V , г/(м²·год)) визначали як відношення втрати маси металевої пластинки внаслідок корозійного процесу до її поверхневої площі за певний проміжок часу, згідно з виразом:

$$V = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

де Δm – зменшення маси металевої пластинки внаслідок проходження корозії, г; τ – час проходження досліду, год; S – площа поверхні досліджуваної пластинки, м².

Кількісну оцінку впливу інгібітора певної концентрації на інтенсивність корозійного процесу здійснювали за показником захисної дії (Z).

Під захисною дією інгібітора Z розуміють виражене у відсотках відношення різниці між швидкістю корозії металу в середовищі без інгібітора (V_0) та зі введенням інгібітора (V_i) до швидкості корозії в агресивному середовищі без добавок:

$$Z = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100, \quad (2)$$

де V_0 – швидкості корозії металу в агресивному середовищі, г/(м²·год); V – швидкості корозії металу після введення інгібітора, г/(м²·год).

У табл. 4 наведено результати визначення захисної дії синтезованих інгібіторів у різних технологічних середовищах.

Аналіз отриманих даних свідчить, що корозійна агресивність прямогонних бензинів (ПБ) істотно залежить від вмісту сірки, показника кислотного числа, густини та фракційного складу. Зі зростанням концентрації сірковмісних сполук і органічних кислот посилюється агресивність середовища, що призводить до зменшення захисного ефекту інгібіторів. Натомість легкі бензинові фракції з низьким кислотним числом і малою густиною демонструють значно меншу корозійну активність та вищу ефективність інгібіторного захисту.

Отже, корозійна небезпека прямогонних бензинів переважно визначається співвідношенням кислотності та вмісту сірки. Найбільш агресивними серед досліджених є бензини Бугруватівської та Яблунівської нафт, де висока концентрація органічних кислот і сірковмісних сполук створює потенційно небезпечне середовище для вуглецевих сталей. Найнижчу корозійну активність демонструє Качанівський бензин, тоді як Новогригорівський займає проміжне положення за ступенем агресивності.

Залежність корозійної активності від властивостей прямих бензинів чітко простежується при порівнянні складу різних нафт. Основними чинниками, що визначають швидкість корозії металу у водно-бензинових середовищах, є кислотність, вміст сірки, густина та фракційний склад бензину.

Зі зростанням кислотності бензинових фракцій збільшується кількість органічних кислот, які можуть дисоціювати у водній фазі, утворюючи агресивне середовище для металу. Це призводить до підвищення швидкості корозії та зниження ефективності інгібіторів. Найнижчу швидкість корозії спостерігають у

середовищах із бензином Качанівської нафти, де кислотність становить лише 1,45 мг КОН/100 мл, а найвищу — з бензином Бугруватівської та Яблунівської нафт із кислотністю понад 9 мг КОН/100 мл.

Вміст сірки також прямо впливає на корозійні процеси. Сірковмісні сполуки (сірководень, меркаптани, сульфіді) здатні утворювати на поверхні металу плівки, які при певних умовах руйнуються, прискорюючи анодно-катодні реакції. Тому бензини з високим вмістом сірки (0,31–0,42 %) проявляють більшу корозійну активність, ніж малосірчисті (0,01–0,05 %).

Густина бензину відображає його вуглеводневий склад: важчі фракції з більшою густиною містять більше нафтоених і ароматичних сполук, які можуть підсилювати взаємодію з водною фазою і сприяти переносу агресивних компонентів до металевої поверхні. Відповідно, із зростанням густини від 745 до 785 кг/м³ спостерігається підвищення швидкості корозії.

Фракційний склад визначає температуру початку та кінця кипіння бензинової фракції, що впливає на наявність легких або важких компонентів. Легкі бензини з нижчими температурами кипіння менш агресивні, оскільки містять менше смолистих і кисневмісних сполук, тоді як важчі фракції сприяють утворенню більш активних корозійних середовищ.

Таблиця 4

Захисний ефект інгібіторів в різних технологічних середовищах

Інгібітор	Втрата маси пластинки, г	Швидкість корозії,	Захисний ефект, %
		г/м ² год	
водна фаза +ПБ Качанівської нафти			
без інгібітора	0,0035	0,7527	0
ДЗЕА	0,0007	0,1254	83,33
МЗЕА	0,0005	0,0896	88,10
ДГЕА	0,00015	0,0269	96,43
водна фаза + ПБ Новогригорівської нафти			
без інгібітора	0,0042	0,7527	0
ДЗЕА	0,0013	0,2330	69,05
МЗЕА	0,0008	0,1434	80,95
ДГЕА	0,0005	0,0896	88,10
водна фаза + ПБ Бугруватівської нафти			
без інгібітора	0,0056	1,0036	0
ДЗЕА	0,0021	0,3763	62,50
МЗЕА	0,0014	0,2509	75,00
ДГЕА	0,0009	0,1613	83,93
водна фаза + ПБ суміші нафт яблунівського родовища			
без інгібітора	0,0049	0,8781	0
ДЗЕА	0,0017	0,3047	65,31
МЗЕА	0,0011	0,1971	77,55
ДГЕА	0,0007	0,1254	85,71

Аналіз захисного ефекту інгібіторів у водно-бензинових середовищах різних нафт показує, що ефективність дії інгібіторів суттєво залежить від складу прямогонного бензину та природи інгібуючої сполуки.

У всіх досліджених середовищах застосування інгібіторів значно знижує швидкість корозії порівняно з контрольними зразками без добавок. Проте ступінь захисної дії різниться залежно від агресивності середовища та типу інгібітора.

Найвищі значення захисного ефекту спостерігаються у середовищі з бензином **Качанівської нафти** – до 95,45 % при використанні інгібітора ДГЕА. Це пояснюється низькою кислотністю (1,45 мг КОН/100 мл) і мінімальним вмістом сірки (0,01 %), що створює сприятливі умови для адсорбції інгібітора на поверхні металу та формування стійкої захисної плівки.

У середовищі з бензином **Новогригорівської нафти** захисний ефект дещо нижчий (до 87,5 %). Незважаючи на підвищення кислотності та сірковмісності порівняно з Качанівською нафтою, інгібітори все ще проявляють високу ефективність, що свідчить про їхню здатність працювати в середньоагресивних умовах.

Найменший захисний ефект спостерігається у середовищах з бензинами **Бугруватівської** та **Яблунівської** нафт, де кислотність перевищує 9 мг КОН/100 мл, а вміст сірки сягає 0,31–0,42 %. У цих умовах

агресивні компоненти руйнують або частково дезактивують захисні плівки, що формуються інгібіторами, тому ефективність знижується до 62–85 %.

Розроблені інгібітори належать до групи органічних поверхнево-активних сполук природного походження, синтезованих на основі ялового жиру. Завдяки високому вмісту у жирах насичених та ненасичених жирних кислот (стеаринової, пальмітинової, олеїнової тощо), а також завдяки модифікації їх у амід, отримані сполуки характеризуються вираженими адсорбційними властивостями і здатністю утворювати стабільні захисні плівки на поверхні металів.

Такі інгібітори поєднують переваги екологічності, біорозкладаності та високої ефективності, навіть в агресивних умовах, характерних для процесів первинної переробки нафти.

Механізм дії інгібіторів на основі ялового жиру полягає у формуванні захисного адсорбційного шару на поверхні металу. Полярні функціональні групи ($-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}-$) взаємодіють з активними центрами на поверхні сталі, утворюючи міцні хімічні або координаційні зв'язки. Гідрофобні вуглеводневі ланцюги жирних кислот орієнтуються назовні, створюючи бар'єр проти води, кисню, хлоридів і сірководню. Такий подвійний шар виконує роль електрохімічного ізолятора, зменшуючи різницю потенціалів між анодними та катодними ділянками поверхні та, відповідно, швидкість корозійного процесу.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Наведено результати експериментальних досліджень антикорозійних властивостей інгібіторів, отриманих з вищих дистильованих жирних кислот, в різних технологічних середовищах світлих нафтопродуктів, отриманих з нафт українських родовищ. Аналіз дії трьох інгібіторів показує чітку тенденцію до підвищення ефективності в ряду дизаміщений етиленамід < монозаміщений етиленамід < дигідроксietiламід. Це можна пояснити структурними особливостями сполук: збільшення кількості гідроксietiльних груп у молекулі підвищує її полярність і здатність до адсорбції на металі, що забезпечує кращу пасивацію поверхні та стійкішу захисну плівку. Дигідроксietiламід проявив найвищий захисний ефект на рівні 95 % в середовищі бензину, отриманого з Качанівської нафти. Даний бензин відрізнявся дещо легким фракційним складом, меншою кислотністю та меншим вмістом сірки.

Отже, захисний ефект інгібіторів визначається як хімічною природою інгібітора, так і складом бензину, з яким він взаємодіє. Найвищу ефективність вони проявляють у малокислотних, малосірчистих та легких бензинових середовищах. У більш агресивних середовищах інгібітори залишаються дієвими, але їхній захисний ефект знижується через ускладнення процесу адсорбції і часткове руйнування захисного шару активними компонентами палива.

Використання біологічно відновлюваних джерел (ялового жиру) у синтезі амідних інгібіторів відповідає принципам «зеленої хімії». Це дозволяє утилізувати вторинні органічні ресурси та замінити традиційні нафтохімічні реагенти менш агресивними та безпечними аналогами. Інгібітори сумісні з паливами та мастильними матеріалами, не змінюють їх експлуатаційних властивостей і забезпечують стабільний захисний ефект навіть у присутності агресивних домішок або при підвищених температурах.

Література

1. Saji V.S. Corrosion inhibitors in the oil and gas industry [Електронний ресурс] / V.S. Saji. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2020. – Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527822140>
2. Koteeswaran M. CO₂ and H₂S corrosion in oil pipelines : master's thesis in Chemical Engineering / M. Koteeswaran. – Stavanger : University of Stavanger, 2010. – 79 p.
3. Popoola L.T. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation / L.T. Popoola, A.S. Grema, G.K. Latinwo, B. Gutti, A.S. Balogun // International Journal of Industrial Chemistry. – 2013. – Vol. 4, No. 1. – P. 35. – DOI: <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>
4. Ezz A. Mitigating corrosion in downhole environments of oil and gas operations: mechanisms, challenges, and control strategies [Електронний ресурс] / A. Ezz, J. Liu. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/393351597_Mitigating_Corrosion_in_Downhole_Environments_of_Oil_and_Gas_Operations_Mechanisms_Challenges_and_Control_Strategies
5. Majeed M.H. Corrosion inhibition of carbon steel in 1 M HCl solution by Ruta graveolens extract / M.H. Majeed, A.-W.A. Sultan, H.H. Al-Sahlanee // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2014. – Vol. 6, No. 5. – P. 996–1001.
6. Jalab R. Biodegradable polysaccharide grafted polyacrylamide inhibitor for corrosion in CO₂-saturated saline solution / R. Jalab, M. Saad, A. Benali, I.A. Hussein, M. Khaled // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – e20304. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20304>
7. Onyeachu I.B. Green corrosion inhibitor for oilfield application II: the time–evolution effect on the sweet corrosion of API X60 steel in synthetic brine and the inhibition performance of 2-(2-pyridyl) benzimidazole under turbulent hydrodynamics / I.B. Onyeachu, I.B. Obot, A.Y. Adesina // Corrosion Science. – 2020. – Vol. 168. – 108589. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108589>
8. Obot I.B. Alternative corrosion inhibitor formulation for carbon steel in CO₂-saturated brine solution under high turbulent flow condition for use in oil and gas transportation pipelines / I.B. Obot, I.B. Onyeachu, S.A. Umoren // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 159. – 108140. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108140>

9. Su F. Inhibition of carbon steel corrosion in solution saturated with CO₂ by ginkgo leaves extract / F. Su, M. Gu, J. Zhao // Journal of Hebei University of Engineering. Natural Science Edition. – 2016. – Vol. 36. – P. 264–268. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11164-017-3017-1>
10. Palimi M.J. Green corrosion inhibitors for drilling operation: new derivatives of fatty acid-based inhibitors in drilling fluids for 1018 carbon steel in CO₂-saturated KCl environments / M.J. Palimi, Y. Tang, V. Alvarez, E. Kuru, D.Y. Li // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 288. – 126406. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126406>
11. Umoren P.S. Corrosion inhibition evaluation of chitosan–CuO nanocomposite for carbon steel in 5% HCl solution and effect of KI addition / P.S. Umoren, D. Kavaz, S.A. Umoren // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – 7981.
12. Srivastava M. Chitosan-based new nanocomposites for corrosion protection of mild steel in aggressive chloride media / M. Srivastava, S.K. Srivastava, N. Ji, G. Prakash // International Journal of Biological Macromolecules. – 2019. – Vol. 140. – P. 177–187.
13. Mobin M. Characterization and application of almond gum–silver nanocomposite as an environmentally benign corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl / M. Mobin, I. Ahmad, R. Aslam, M. Basik // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 289. – 126491.
14. Lavanya M. Surfactants as biodegradable sustainable inhibitors for corrosion control in diverse media and conditions: a comprehensive review / M. Lavanya, A. Avryl // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 908. – 168407. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168407>
15. Ukrainian Research Institute of Oils and Fats of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Oil and Fat Industry of Ukraine. Information and Analytical Bulletin of the Oil and Fat Industry of Ukraine. – 2021. – No. 2 (54).
16. Huang W. A green and effective anti-corrosion and anti-microbial inhibitor of citric acid-based carbon dots: experiment and mechanism analysis / W. Huang, Z. Tang, X. Liu [та ін.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 32. – P. 2149–2159. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.048>
17. Topilnytskyi P. Production of corrosion inhibitors for oil refining equipment using natural components / P. Topilnytskyi, V. Romanchuk, T. Yarmola // Chemistry & Chemical Technology. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 400–404. – DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.400>
18. Pyshyev S. Animal fats and vegetable oils – promising resources for obtaining effective corrosion inhibitors for oil refinery equipment / S. Pyshyev, O. Romanchuk, P. Topilnytskyi [та ін.] // Resources. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – 30. – DOI: <https://doi.org/10.3390/resources14020030>
19. Solmaz R. A comprehensive study on the adsorption, corrosion inhibition efficiency and stability of acriflavine on mild steel in 1 M HCl solution / R. Solmaz, A. Salci, Y.A. Dursun, G. Kardaş // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2023. – Vol. 674. – 131908. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131908>
20. Shang Z. Overview on plant extracts as green corrosion inhibitors in the oil and gas fields / Z. Shang, J. Zhu // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 5078–5094. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.095>
21. Пат. 64703 Україна, МПК (51) C23F 11/10, C10G 75/00, C10G 7/00. Спосіб визначення ступеня захисної дії інгібіторів корозії для нафтопереробного обладнання [Текст] / Романчук В.В., Топільницький П.І. ; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № u201106534 ; заявл. 24.05.2011 ; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21.

References

1. Saji V.S. Corrosion inhibitors in the oil and gas industry [Електронний ресурс] / V.S. Saji. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2020. – Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527822140>
2. Koteeswaran M. CO₂ and H₂S corrosion in oil pipelines : master's thesis in Chemical Engineering / M. Koteeswaran. – Stavanger : University of Stavanger, 2010. – 79 p.
3. Popoola L.T. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation / L.T. Popoola, A.S. Grema, G.K. Latinwo, B. Gutti, A.S. Balogun // International Journal of Industrial Chemistry. – 2013. – Vol. 4, No. 1. – P. 35. – DOI: <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>
4. Ezz A. Mitigating corrosion in downhole environments of oil and gas operations: mechanisms, challenges, and control strategies [Електронний ресурс] / A. Ezz, J. Liu. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/393351597_Mitigating_Corrosion_in_Downhole_Environments_of_Oil_and_Gas_Operations_Mechanisms_Challenges_and_Control_Strategies
5. Majeed M.H. Corrosion inhibition of carbon steel in 1 M HCl solution by Ruta graveolens extract / M.H. Majeed, A.-W.A. Sultan, H.H. Al-Sahlane // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2014. – Vol. 6, No. 5. – P. 996–1001.
6. Jalab R. Biodegradable polysaccharide grafted polyacrylamide inhibitor for corrosion in CO₂-saturated saline solution / R. Jalab, M. Saad, A. Benali, I.A. Hussein, M. Khaled // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – e20304. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20304>
7. Onyeachu I.B. Green corrosion inhibitor for oilfield application II: the time–evolution effect on the sweet corrosion of API X60 steel in synthetic brine and the inhibition performance of 2-(2-pyridyl) benzimidazole under turbulent hydrodynamics / I.B. Onyeachu, I.B. Obot, A.Y. Adesina // Corrosion Science. – 2020. – Vol. 168. – 108589. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108589>
8. Obot I.B. Alternative corrosion inhibitor formulation for carbon steel in CO₂-saturated brine solution under high turbulent flow condition for use in oil and gas transportation pipelines / I.B. Obot, I.B. Onyeachu, S.A. Umoren // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 159. – 108140. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108140>
9. Su F. Inhibition of carbon steel corrosion in solution saturated with CO₂ by ginkgo leaves extract / F. Su, M. Gu, J. Zhao // Journal of Hebei University of Engineering. Natural Science Edition. – 2016. – Vol. 36. – P. 264–268. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11164-017-3017-1>

10. Palimi M.J. Green corrosion inhibitors for drilling operation: new derivatives of fatty acid-based inhibitors in drilling fluids for 1018 carbon steel in CO₂-saturated KCl environments / M.J. Palimi, Y. Tang, V. Alvarez, E. Kuru, D.Y. Li // *Materials Chemistry and Physics*. – 2022. – Vol. 288. – 126406. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126406>
11. Umoren P.S. Corrosion inhibition evaluation of chitosan–CuO nanocomposite for carbon steel in 5% HCl solution and effect of KI addition / P.S. Umoren, D. Kavaz, S.A. Umoren // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – 7981.
12. Srivastava M. Chitosan-based new nanocomposites for corrosion protection of mild steel in aggressive chloride media / M. Srivastava, S.K. Srivastava, N. Ji, G. Prakash // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2019. – Vol. 140. – P. 177–187.
13. Mobin M. Characterization and application of almond gum–silver nanocomposite as an environmentally benign corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl / M. Mobin, I. Ahmad, R. Aslam, M. Basik // *Materials Chemistry and Physics*. – 2022. – Vol. 289. – 126491.
14. Lavanya M. Surfactants as biodegradable sustainable inhibitors for corrosion control in diverse media and conditions: a comprehensive review / M. Lavanya, A. Avryl // *Science of the Total Environment*. – 2024. – Vol. 908. – 168407. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168407>
15. Ukrainian Research Institute of Oils and Fats of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Oil and Fat Industry of Ukraine. Information and Analytical Bulletin of the Oil and Fat Industry of Ukraine. – 2021. – No. 2 (54).
16. Huang W. A green and effective anti-corrosion and anti-microbial inhibitor of citric acid-based carbon dots: experiment and mechanism analysis / W. Huang, Z. Tang, X. Liu [та ін.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 32. – P. 2149–2159. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.048>
17. Topilnytskyi P. Production of corrosion inhibitors for oil refining equipment using natural components / P. Topilnytskyi, V. Romanchuk, T. Yarmola // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 400–404. – DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.400>
18. Pyshyev S. Animal fats and vegetable oils – promising resources for obtaining effective corrosion inhibitors for oil refinery equipment / S. Pyshyev, O. Romanchuk, P. Topilnytskyi [та ін.] // *Resources*. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – 30. – DOI: <https://doi.org/10.3390/resources14020030>
19. Solmaz R. A comprehensive study on the adsorption, corrosion inhibition efficiency and stability of acriflavine on mild steel in 1 M HCl solution / R. Solmaz, A. Salci, Y.A. Dursun, G. Kardaş // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2023. – Vol. 674. – 131908. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131908>
20. Shang Z. Overview on plant extracts as green corrosion inhibitors in the oil and gas fields / Z. Shang, J. Zhu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 5078–5094. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.095>
21. Пат. 64703 Україна, МПК (51) C23F 11/10, C10G 75/00, C10G 7/00. Спосіб визначення ступеня захисної дії інгібіторів корозії для нафтопереробного обладнання [Текст] / Романчук В.В., Топільницький П.І. ; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № u201106534 ; заявл. 24.05.2011 ; опубл. 10.11.2011, Біул. № 21.