УДК (504.05 +504.06) 622
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.22

ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІОКОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПОВЕРХНІ НАФТОПРОВОДІВ

Степовий Є.Б.
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава
alenastepovaja@gmail.com

Промисловий трубопровідний транспорт є важливою частиною видобування та переробки нафти. Проте, на будь якому етапі транспортування нафти існує значна ймовірність забруднення компонентів довкілля нафтопродуктами через розгерметизацію ділянок нафтопроводів, що призводить до колосальних втрат сировини та значного негативного впливу на довкілля. Однією з поширених причин порушення герметичності ділянок нафтопроводів є корозійні процеси. Магістральні нафтопроводи переважно експлуатуються підземно, у середовищі ґрунту, де присутні мікроорганізми, біологічна активність яких сприяє розвитку біологічної корозії. Для захисту зовнішньої поверхні нафтопроводів використовують ізоляційне покриття, яке під час тривалої експлуатації може зазнавати пошкодження та утворення тріщин на поверхні. На підземних трубопроводах у місцях порушення ізоляційного покриття відбуваються суттєві зміни анодних і катодних поляризаційних характеристик сталі, що, у свою чергу, призводить до зміни електродних потенціалів металу на цих ділянках. З урахуванням наявності ґрунтових мікроорганізмів, які беруть участь у реакціях, що змінюють електрохімічні умови на поверхні сталі та сприяють утворенню агресивних метаболітів, формується сприятливе середовище для розвитку біоелектрохімічної корозії. Біологічна активність цих мікроорганізмів зумовлює перебіг мікробіологічних процесів, унаслідок яких змінюються електрохімічні параметри металевої поверхні, що, своєю чергою, призводить до прискорення процесів руйнування сталі.

Оскільки експлуатація нафтопроводу з дефектами ізоляції безпосередньо пов'язана з інтенсифікацією біоелектрохімічної корозії металу, під час обстеження трубопроводу особливу увагу необхідно приділяти визначенню характеристик корозійного процесу. Струм, що виникає в таких гальванічних парах, є універсальним показником для оцінювання швидкості біокорозії та розрахунку втрат металу, зокрема у тріщинах ізоляційного покриття.

Біологічна корозія нафтопроводів є одним з найбільш небезпечних видів корозії, яку спричиняють бактерії, що утворюють біоплівки на поверхні труби та призводять до їх біопошкодження та розгерметизації.

Одним із напрямів забезпечення екологічної надійності експлуатації нафтопроводів є врахування факторів, що впливають та оцінюють біокорозійні процеси на поверхні нафтопроводу. В роботі досліджено кількісну характеристику біокорозійних процесів модельних ділянок сталевого нафтопроводу за умов впливу біокорозійного середовища. Змодельовано процес біоелектрохімічної корозії сталевих пластин в лабораторних умовах та експериментально визначено швидкості біокорозії сталевих пластин. Доведено, що торфяні ґрунти мають найвищу біокорозійну активність за швидкістю корозії.

Змодельовані процеси покладено в основу розрахунку глибини біокорозійного ураження конструкції, що дозволяє прогнозувати розвиток зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів з часом та вчасно запобігати забрудненню довкілля.
Ключові слова: екологічна безпека, біологічна корозія, мікроорганізми, швидкість біокорозії.

Investigation of the quantitative characteristics of biocorrosion processes on the surface of oil pipelines. Stepovyi Ye.

Industrial pipeline transport is an important part of oil production and processing. However, at any stage of oil transportation, there is a significant probability of contamination of environmental components with petroleum products due to depressurization of oil pipeline sections, which leads to enormous losses of raw materials and a significant negative impact on the environment. One of the common causes of violation of the tightness of oil pipeline sections is corrosion processes. Main oil pipelines are mainly operated underground, in the soil environment, where microorganisms are present, the biological activity of which contributes to the development of biological corrosion. To protect the outer surface of oil pipelines, an insulating coating is used, which during prolonged operation may be damaged and cracks may form on the surface. On underground pipelines, in places where the insulating coating is broken, significant changes occur in the anodic and cathodic polarization characteristics of the steel, which, in turn, leads to a change in the electrode potentials of the metal in these areas. Given the presence of soil microorganisms that participate in reactions that change the electrochemical conditions on the steel surface and contribute to the formation of aggressive metabolites, a favorable environment is formed for the development of bioelectrochemical corrosion. The biological activity of these microorganisms determines the course of microbiological processes, as a result of which the electrochemical parameters of the metal surface change, which, in turn, leads to the acceleration of steel destruction processes.

Since the operation of an oil pipeline with insulation defects is directly related to the intensification of bioelectrochemical corrosion of the metal, during the inspection of the pipeline, special attention must be paid to determining the characteristics of the corrosion process. The current that arises in such galvanic pairs is a universal indicator for assessing the rate of biocorrosion and calculating metal losses, in particular in cracks in the insulating coating.

© Степовий Є.Б., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Biological corrosion of oil pipelines is one of the most dangerous types of corrosion caused by bacteria that form biofilms on the surface of the pipe and lead to their biodamage, depressurization and the occurrence of emergency situations.

To prevent environmental pollution during the operation of oil pipelines, it is necessary to assess the operating conditions of the structure and consider the regularities and mechanisms of biocorrosion processes on the surface of the pipes to assess reliability and trouble-free operation.

One of the ways to increase the environmental safety of the operation of oil pipelines is to consider factors that characterize biocorrosion processes on the metal of the pipeline. The work investigated the quantitative characteristics of biocorrosion processes of model sections of a steel oil pipeline under the influence of a biocorrosion environment. The process of bioelectrochemical corrosion of steel plates was modeled in laboratory conditions and the rates of biocorrosion of steel plates were experimentally determined. It was proven that peat soils have the greatest biocorrosion activity relative to St20 steel in terms of corrosion rate.

The simulated processes are used as the basis for calculating the depth of biocorrosion damage to the structure, which allows predicting the development of external corrosion processes of steel oil pipelines over time and preventing environmental pollution in a timely manner. *Key words:* environmental safety, biological corrosion, microorganisms, biocorrosion rate.

Постановка проблеми. Враховуючи підземні умови експлуатації магістральних нафтопроводів вони можуть підлягати впливу ґрунтової корозії, яка значною мірою визначається ґрунтовою біокорозією. Мережа нафтотранспортної системи України, зокрема і Полтавської області є достатньо розгалуженою, а ґрунти, в яких вони пролягають – надзвичайно різноманітними за своїм складом, типом, pH й іншими властивостями. Тому, аналіз й оцінювання біокорозійних характеристик ґрунтів є доречним. До того ж, узагальнених праць з цього питання, зокрема для Полтавської області, не існує, а їх наявність в комплексі з іншими дослідженнями дасть змогу оцінити вплив біологічної корозії за кількісною характеристикою корозійного процесу, а саме щільністю струму, що дозволить запобігти виникненню нештатних ситуацій, повязаних з розгерметизацією нафтопроводів.

Універсальною кількісною характеристикою корозійного процесу є струм корозії *I*, А або щільність струму *i*, А/см^2. Тому метою роботи стало встановлення та дослідження струмових показників біокорозійних процесів на зовнішній поверхні нафтопроводів за умов впливу біокорозійного середовища.

Актуальність дослідження. Оскільки магістральні нафтопроводи експлуатуються в складних та неоднорідних ґрунтових умовах, де спостерігаються зміни вологості, кислотності, мікробіологічного складу та вмісту агресивних домішок, виникнення корозійних процесів є практично неминучим. Основним механізмом такої корозії, як правило, виступає електрохімічна взаємодія між матеріалом трубопроводу та агресивними компонентами навколишнього середовища.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження корозійних процесів, що виникають на зовнішній поверхні нафтопроводів. Ретельний аналіз факторів, що впливають на розвиток корозії, а також вивчення її природи дозволяють розробляти ефективні методи профілактики та захисту. Своєчасне виявлення ознак корозійного ураження, його оцінка та усунення є критично важливими для забезпечення надійної та екологічно безпечної експлуатації магістральних нафтопроводів. Це, у свою чергу, дозволяє запобігати витокам нафти, зменшити техногенне навантаження на довкілля та підвищити загальну ефективність роботи трубопровідного транспорту.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дане дослідження здійснено в рамках пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок України у сфері раціонального природокористування. Авторська робота спрямована на вирішення актуальних завдань щодо сталого використання природних ресурсів, охорони навколишнього середовища та забезпечення екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес корозії нафтопроводів залежить не тільки від ґрунтових умов, але й від сорту сталі, якості і матеріалу зварних з'єднань, товщини стінки трубопроводів, якості захисного покриття, а також від умов експлуатації трубопроводу [1, 2].

На протікання корозійних процесів впливає чимало факторів, важливість яких не можна недооцінювати. Причинами розвитку корозійних процесів у підземному середовищі є неоднорідність сольового складу та кислотності ґрунтів, порушення на окремих ділянках суцільності ізоляційного покриття, неоднакова вологість ґрунтів. Характер і кількість водорозчинних солей у ґрунті визначають його корозійну активність.

Проте в ґрунтовому середовищі є всі умови для існування різноманітних мікроорганізмів. Життєдіяльність деяких мікрооргагнізмів сприяє розвитку та протікання корозійних процесів на зовнішній поверхні нафтопроводів, тобто розвитку біокорозії [3, 4].

Аналіз сучасних науково-технічних розробок у сфері впливу аварійних витоків нафтопродуктів на навколишнє середовище засвідчив, що одним із ризиків є зовнішня біокорозія сталевих нафтопроводів. Такі процеси можуть призводити до розгерметизації трубопроводів і спричиняти аварійні ситуації. Такі події, у свою чергу, зумовлюють значні екологічні втрати, включно з витоком нафтопродуктів і серйозним забрудненням компонентів довкілля [5 – 10]. В попередніх дослідженнях ґрунтів Полтавської області експериментально підтверджено наявність умов для розвитку біокорозійних

процесів за індикаторами pH, наявність сульфатів та вологість ґрунту [11].

З мікроорганізмів, що беруть участь у процесах корозії, велику роль відіграють сульфатовідновлюючі бактерії типу Sporovibrio desulfuricans (найбільш поширені у природі), тіосульфатоокиснюючі типу Thiobacillus thioparus, сіркобактерії типу Thiobacillus thiooxidans, залізоспоживаючі типу Gallionella ferruginea, водозв'язуючі типу Hydrogenomonas flava, залізні бактерії типу Crenothrix і Leptothrix і нітратовідновлюючі типу Thiobacillus denitrificans [12].

Ступінь небезпеки біокорозії встановлюють бактеріологічним аналізом зразків ґрунту, який дозволяє виявити перераховані вище мікроорганізми [6, 7, 13]. Отже, наявність та активну життєдіяльність мікроорганізмів, що активують корозійні процеси на зовнішній поверхні труби можна оцінити, здійснивши моніторинг показників-індикаторів зазначених мікроорганізмів.

Науковцями доведено, що мікроорганізми можуть брати участь у корозійних процесах, шляхом використання іонів конструкційних матеріалів для своєї життєдіяльності [13]. Найчастіше мікробіологічна корозія викликає розвиток локальних видів електрохімічної корозії. Першість серед мікроорганізмів, що спричиняють руйнування обладнання на нафтопромислах по праву займають СВБ, які представлені наступними родами: *Desulfomonas*, *Desulforomonas*, *Desulfovibrio* и *Desulfotomaculum*, які піддають біологічній корозії багато конструкційних матеріалів, в тому числі сталь.

Однією з перших моделей, які описують руйнування металу під впливом навколишнього агресивного середовища, є закони Фарадея. Існують й інші математичні моделі руйнування металу трубопроводів під дією оточуючого середовища інших авторів і вчених, але усі вони є в дечому подібними і схожими. Це виявляється в тому, що у залежності моделей входять багато різних поправкових коефіцієнтів, які враховують вплив лише деяких факторів навколишнього середовища та є справедливими лише для трубопроводів, які не зазнають локального агресивного впливу. Тож наведені моделі не дають змогу з достатньою точністю описати процеси електрохімічної корозії нафтопроводів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Чисельні дослідження щодо поведінки сталі при біоелектрохімічній корозії описані в багатьох працях, але при дослідженнях не враховано реальних умов експлуатації конструкцій. Отже, необхідність розробки залежностей, які б враховували впливи навколишнього середовища, в тому числі і локальні, особливості експлуатації нафтопроводів та інші можливі фактори, не втрачає своєї актуальності.

Новизна. За результатами проведених досліджень встановлено кількісні характеристики біокорозії сталі в ґрунтових умовах Полтавської області. Змодельовано процес біоелектрохімічної корозії сталевих пластин і експериментально визначено швидкість їх біокорозійного руйнування. Дослідження підтвердили, що торф'яні ґрунти виявляють найвищу біокорозійну активність щодо сталі Ст20 за показником швидкості корозії.Отримані результати моделювання стали основою для розрахунку глибини біокорозійного ураження конструкцій, що дає змогу прогнозувати динаміку зовнішніх біокорозійних процесів у сталевих нафтопроводах та своєчасно вживати заходів для запобігання забрудненню навколишнього середовища.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати наукового дослідження в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні екологічні ризики при експлуатації споруд нафтової галузі, що дасть можливість розробити заходи із запобігання виникнення шкідливих впливів при розгерметизації нафтопроводів, раціонально планувати ремонтні роботи, прогнозувати реальні строки роботи.

Викладення основного матеріалу. Для оцінювання швидкості біокорозійного руйнування металу використовують кількісні показники корозії, до яких відносять: масовий показник корозії K_m; глибинний показник корозії; об'ємний показник швидкості корозії $_{Коб}$ та струмовий показник швидкості корозії i.

Для визначення впливу типу ґрунту на інтенсивність біокорозії сталі у дослідженні застосовано гравіметричний метод. Було відібрано ґрунтові зразки трьох типів, характерних для Полтавської області: чорнозем, глину та торф. Ґрунтові грудки подрібнювали у порцеляновій ступці за допомогою товкачика з гумовим наконечником.

Від кожного типу ґрунту відважували по 100 грамів повітряно-сухої, ретельно подрібненої маси на лабораторних вагах, після чого до кожної проби додавали по 20 мл дистильованої води. Експеримент проходив у два етапи: дослідження в звичайному ґрунтовому середовищі та в біологічно активному.

Для першого етапу було підготовлено 10 сталевих зразків у формі прямокутних пластин товщиною 3 мм. Перед експериментом зразки очищали від іржі та сторонніх нашарувань: шліфували і полірували дрібнозернистим абразивом до досягнення рівної поверхні, а знежирення виконували етанолом. Далі кожен зразок зважували на аналітичних вагах з точністю ±0,0001 г і поміщали в підготовлене корозійне середовище.

Після завершення експерименту зразки вилучали з ґрунту, промивали та очищували від корозійних продуктів гумкою, а за потреби – обробляли 0,5% розчином сірчаної кислоти з додаванням уротропіну. При візуальному огляді на деяких зразках були виявлені сліди корозійного ураження. Очищені зразки висушували та повторно зважували. Швидкість корозійного процесу визначали за втратою маси зразків

певної площі за встановлений період дії середовища.

Результати досліджень наведено в таблиці 1.1 та на діаграмах 1.1 – 1.2.

Другий етап досліджень проводили аналогічно, але в підготовленому біокорозійному середовищі. Біокорозійне середовище формували шляхом додавання до підготовленого ґрунту бактеріально розкладених яєць, вітаміну В та води. Яйця виступали живильним середовищем для розвитку мікроорганізмів, зокрема сіркобактерій. У результаті їхньої життєдіяльності відбувався розпад білкових сполук із подальшим утворенням сірководню, що визначався за характерним запахом. Зразки сталевих пластин перебували у контакті з таким біологічно активним ґрунтовим середовищем протягом трьох місяців. Протягом усього періоду дослідження щотижня здійснювали відбір ґрунтових проб з метою контролю рівня pH і вмісту сульфатів. Результати досліджень наведено в таблиці 1.2.

При експериментальному дослідженні відбувався контроль pH та наявніть сульфатів. Замічено, що з часом значення pH у всіх пробах зростало, а кількість сульфатів зменшувалась.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що зволожені торф'яні ґрунти з біологічним забрудненням проявляють найвищу корозійну агресивність щодо сталі Ст20, що підтверджується значеннями швидкості біокорозії. Виявлено також, що в таких ґрунтових умовах інтенсивність корозійного руйнування сталі істотно перевищує показники загальної ґрунтової корозії.

Висновки. В результаті проведення наукових досліджень та розв'язанні поставлених завдань зроблені наступні висновки:

За результатами аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань шкідливого впливу на довкілля внаслідок аварійних витоків, виявлено, що одним із небезпечних чинників є зовнішні біокорозійні процеси з наступною розгерметизації сталевих нафтопроводів і виникненням аварійних ситуацій. Наслідками зазначеного є значні екологічні збитки, пов'язані з втратою нафтопродуктів та суттєвими забрудненнями компонентів довкілля.

За результатами аналізу науково-технічної літератури встановлено основні індикатори активної життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів, які сприяють біокорозійним процесам.

Змодельовано процес біоелектрохімічної корозії сталевих пластин в лабораторних умовах та експериментально визначено швидкості біокорозії сталевих

Таблиця 1

Результати розрахунків швидкості корозії сталі в грунтах в вагових показниках $К_{ваг}$, глибинних показниках, $К_і$, та струмовому показнику I (II етап)

g_0, г вага до корозії	g_1, г вага після корозії	Тип ґрунту	Вологість грунту	$К_{ваг}$, г/см²рік	$К_і$, мм/рік	i, А/см²
43,06255	42,8643	Торф	сухий	7,44718 E-06	7,42599 E-06	7,25762 E-10
11,14025	11,0324	Чорнозем	сухий	7,25383 E-06	7,23319 E-06	7,06919 E-10
28,4043	28,2716	Глина	сухий	7,91509 E-06	7,89257 E-06	7,71362 E-10
44,23605	43,78045	Торф	вологий	1,81166 E-05	1,80651 E-05	1,76555 E-09
16,85685	16,7014	Чорнозем	вологий	9,56281 E-06	9,5356 E-06	9,31939 E-10
29,51645	29,27305	Глина	вологий	1,91051 E-05	1,20707 E-05	1,1797 E-09

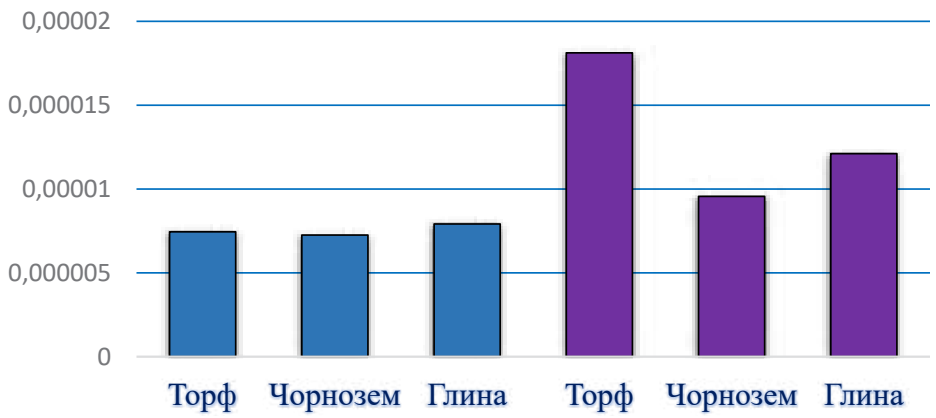

Рис. 1. Діаграма залежності швидкості корозії сталі Ст2 в масовому показнику від типу та вологості ґрунту

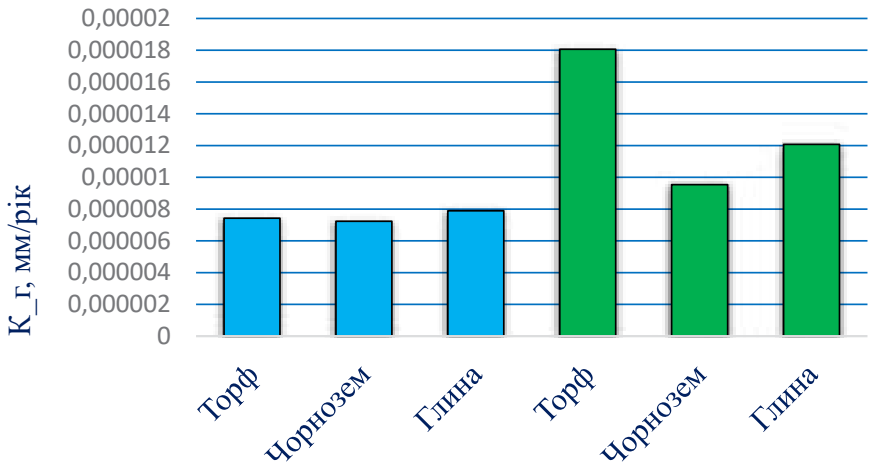

Рис. 2. Діаграма залежності швидкості корозії сталі Ст2 в глибинному показнику від типу та вологості ґрунту

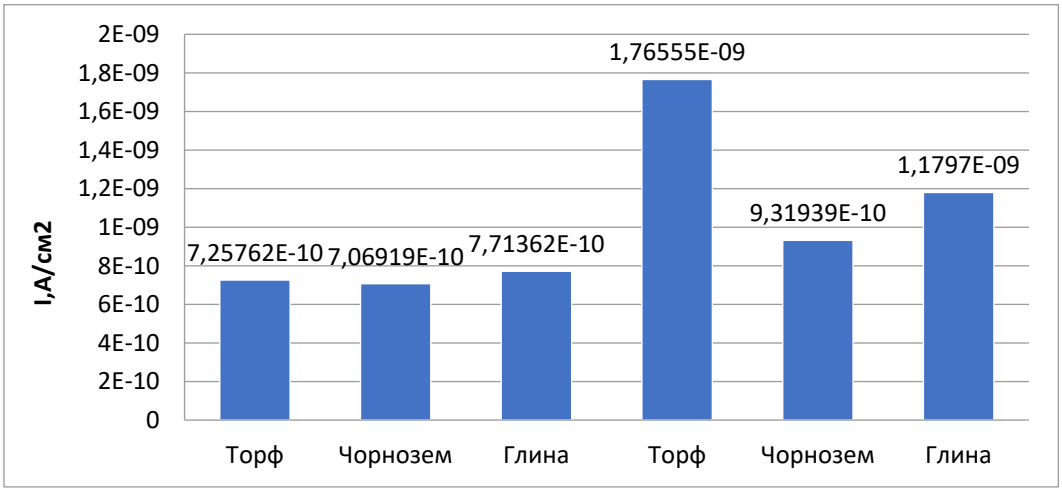

Рис. 3. Діаграма залежності швидкості корозії сталі Ст2 в струмовому показнику від типу та вологості ґрунту

Таблиця 2

Результати розрахунків швидкості корозії сталі в ґрунтах в вагових показниках $К_{ват}$, глибинних показниках, $К_і$, та струмовому показнику I (III етап)

g_0, г вага до корозії	g_1, г вага після корозії	Тип ґрунту	$К_{ват}$, г/см²рік	$К_і$,мм/рік	*i*, А/см²
28,0960	26,2200	Торф	0,2777	0,309	0,000026
11,9200	11,10	Чорнозем	0,258	0,28	0.00002407
16,5964	16,52	Глина	0.0467	0.052	0.00000448

пластин. Доведено, що торфяні ґрунти мають найбільшу біокорозійну активність відносно сталі Ст20 за показником швидкість корозії.

Змодельовані процеси покладено в основу розрахунку глибини біокорозійного ураження конструкції, що дозволяє прогнозувати розвиток зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів з часом та вчасно запобігати забрудненню довкілля.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати дозволяють більш достовірно оцінити умови експлуатації нафтопроводів в ґрунтах Полтавської області, що дозволяє прогнозувати реальні строки роботи конструкції, переглянути режим експлуатації зменшити екологічні ризики через недопущення аварійних розливів нафти.

Література

1. Алімов В.І., Дурягіна З.А. Корозія та захист металів від корозії. Донецьк-Львів: ТОВ «Східний видавничий дім», 2012. 328 с.
2. Сопрунюк П. М., Юзевич В. М. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів. Львів : ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Вид-во «Сполом», 2005. 292 с.
3. Андреюк К. І., Козлова І. П., Коптєва Ж. П. Мікробна корозія підземних споруд. Київ: Наук. думка, 2005. 259 с.
4. Приходько С.В., Курмакова І.М., Третяк О.П. Бактерії-деструктори як чинник біопошкодження підземних металевих конструкцій. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія.* Випуск 20. 2007. С. 253 – 256.
5. Полутренко М.С. Екологічний аудит корозійної активності грунтів прокладання магістральних газопроводів. *Науково-технічний журнал* № 2. (10). 2014. 63 – 69.
6. Степова О. В., Бондар О. В., Кущ О. Ю., Степовий Д. Є. Дослідження біокорозійних процесів у грунтовому середовищі. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах нажзвичайних ситуацій:* зб. матеріалів І Міжнар. наук.-практ. конф. Полтава: НУПП. 2022. С. 561-563
7. Степова О.В., Бондар О.В., Степовий Д. Врахування умов експлуатації нафтопроводів щодо оцінки біокорозійних процесів. *Регіональні проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування.* Матеріали Міжнар. наук. конф., 21-22 вересня 2022. Одеса: ОДЕКУ. 2022. С. 26-30
8. Степова О.В., Галькевич В.І., Гудзь Я.Р. Аналіз стану корозійної безпеки газопроводів в Полтавській області. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. Полтава. 2013. № 2. С. 132 – 135
9. Степова О.В. Врахування корозійних процесів сталевих нафтопроводів з метою підвищення екологічної безпеки. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА. 2018. №(1)20. Т.2. С. 15 – 21.
10. Степова О.В. Районування території Полтавської області за показниками корозійної агресивності ґрунтів. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА. 2018. №(3)22. С. 106 – 112.
11. Степова О.В., Степовий Є.Б. Біокорозійна активність грунтів Полтавської області *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА, 2023. №.4 С. 3-10
12. Крикунов В.Г. Лабораторний практикум по ґрунтознавству: навч. посіб. Біла Церква, 2003. 83 с.
13. Полутренко М.С. Екологічний аудит корозійної активності грунтів прокладання магістральних газопроводів. *Науково-технічний журнал* № 2. (10). 2014. 63–69.

Дата першого надходження статті до видання: 12.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026