

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА  
УПРАВЛІННЯ

**СТЕПОВА Олена Валеріївна**

УДК 622.691:66.097.8]-044.82:502.172(043.5)

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ ДОВКІЛЛЯ  
ВНАСЛІДОК ВНУТРІШНЬОЇ ТА ЗОВНІШНЬОЇ КОРОЗІЇ СТАЛЕВИХ  
НАФТОПРОВІДІВ**

21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі прикладної екології та природокористування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ПЕТРУК Василь Григорович**, Вінницький національний технічний університет, директор інституту екологічної безпеки та моніторингу довкілля

доктор технічних наук, професор  
**ЗБЕРОВСЬКИЙ Олександр Владиславович**, Дніпровський державний технічний університет, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**ІВАНЮТА Сергій Петрович**, Національний інститут стратегічних досліджень, заступник завідувача відділу енергетичної та техногенної безпеки

Захист дисертації відбудеться «26» лютого 2020 р., о 10<sup>00</sup> годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01 у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Міністерства енергетики та захисту довкілля України, за адресою: вул. Митрополіта Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління, за адресою: вул. Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035 та на сайті [www.dea.ua](http://www.dea.ua).

Автореферат розіслано «23» січня 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01



Т.Г. Іващенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Україна має розгалужену мережу сталевих нафтопроводів сумарною протяжністю майже 5000 км, які є об'єктами підвищеної небезпеки з точки зору сучасних екологічних вимог. У разі їх розгерметизації виникають екологічні ризики забруднення довкілля внаслідок витоку нафтопродуктів, можливих пожеж, вибухів тощо. Наприклад, значна екологічна катастрофа, пов'язана з витоком нафтопродуктів через розгерметизацію нафтопроводу трапилася в 1994р. в Республіці Комі, Росія. В результаті появи на трубопроводі корозійних пошкоджень, стався масовий витік нафти. При цьому втрата нафтопродуктів склала до 580 тис. барелів. Площа забрудненої ґрунтової поверхні складала до 115 га. Одним із негативних чинників, які підвищують екологічні ризики виникнення надзвичайних ситуацій пов'язаних із забрудненням ґрунтів, водою, атмосферного повітря, є зовнішні та внутрішні корозійні процеси сталевих нафтопроводів. Загальними питаннями забезпечення безпеки експлуатації, у тому числі екологічної безпеки сталевих нафтопроводів, займалися такі вчені як Андрейків О.Є., Герасименко Ю.С., Грабовський Р.С., Дмитрах І.М., Ждек А.Я., Іваницький Я.Л., Клименко А.В., Крижанівський Є.І., Лобанов Л.М., Никифорчин Г.М., Побережний Л.Я., Скальський В.Р., Федірко В.М. та інші, проте в їх роботах недостатню увагу було приділено саме запобіганню ризиків забруднення довкілля внаслідок внутрішніх та зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів. Розуміння закономірностей таких процесів та їх урахування є науковим підґрунтям для визначення залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів, а також розроблення заходів щодо запобігання підвищенню ризиків забруднення довкілля під час їх експлуатації. Розвиток наукових основ забезпечення екологічної безпеки діючих сталевих нафтопроводів, які враховують особливості та закономірності процесів їх електрохімічної корозії як джерела забруднення довкілля є актуальною проблемою, вирішення якої створює передумови зменшення ризиків забруднення довкілля під час експлуатації зазначених об'єктів.

### **Зв'язок роботи із науковими програмами, планами і темами.**

Дисертаційну роботу виконано відповідно до «Основних засад (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2020 року» затверджених Законом України від 21.12.2010 р. №2818-VI, у рамках проведення науково-дослідної роботи в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка за темою: «Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів транспортування та зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах» (державний реєстраційний номер 0117U003086), в якій здобувач була виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у запобіганні забрудненню довкілля нафтопродуктами, продуктами їх згоряння або вибуху внаслідок процесів внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу їх експлуатації.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є створення наукових основ запобігання забрудненню довкілля, які враховують особливості та

закономірності процесів внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів.

Для досягнення визначеної мети поставлено до вирішення наступні **задачі досліджень**:

- провести аналіз сучасного стану науково-технічних досягнень з питань шкідливого впливу на довкілля внаслідок аварійних витоків, згоряння або вибухів нафтопродуктів на сталевих нафтопроводах і прилеглих до них територіях та виявити шляхи його запобігання;
- розробити методологію та обґрунтувати методи проведення дисертаційних досліджень;
- провести теоретичні розрахунки ймовірностей випадків забруднення довкілля внаслідок розгерметизації сталевих нафтопроводів, у тому числі із урахуванням зовнішніх та внутрішніх корозійних процесів;
- провести теоретичні дослідження з виявлення впливу агресивних розчинів ґрунтового середовища на ділянки пошкодження ізоляційних покриттів сталевих нафтопроводів на протікання їх зовнішніх корозійних процесів та побудувати карти ґрунтів за показниками їх корозійної активності на прикладі Полтавської області;
- провести теоретичні та експериментальні дослідження з виявлення впливу ступеня мінералізованості підтоварної води нафти на протікання внутрішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів;
- теоретично обґрунтувати хімічний склад, розробити способи синтезу екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії металів і осадковідкладень на внутрішніх поверхнях сталевих нафтопроводів;
- провести експериментальні дослідження з виявлення впливу типу інгібіторів на швидкість протікання внутрішніх корозійних процесів нафтопроводів та осадковідкладень, а також ефективності їх застосування;
- змоделювати процеси електрохімічної корозії сталевих труб у тріщинах ізоляційного покриття за впливу агресивних електролітичних розчинів та розрахувати швидкість електрохімічної корозії модельної ділянки нафтопроводу;
- розробити математичну модель корозії поверхні нафтопроводу за умов кисневої деполяризації діючого нафтопроводу;
- розробити розрахункові методики оцінювання глибини корозії сталевих нафтопроводів в тріщинах ізоляційного покриття та визначення залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації сталевих нафтопроводів з урахуванням зазначених корозійних процесів;
- перевірити адекватність запропонованої розрахункової методики оцінювання глибини корозійних уражень сталевих нафтопроводів в тріщинах ізоляційного покриття з результатами експериментальних досліджень;
- розробити рекомендації та пропозиції щодо застосування запобіжних заходів задля унеможливлення забруднення довкілля внаслідок корозійних процесів сталевих нафтопроводів.

**Об'єкт дослідження** – процеси внутрішньої та зовнішньої корозії діючих сталевих нафтопроводів як потенційні джерела забруднення довкілля внаслідок витоків нафтопродуктів, продуктів їх згоряння або вибуху.

**Предмет дослідження** – вплив чинників на процеси внутрішньої та зовнішньої корозії діючих сталевих нафтопроводів як потенційного джерела забруднення довкілля внаслідок витоку нафтопродуктів, продуктів їх згоряння або вибуху.

Для вирішення поставлених завдань у роботі використовувались сучасні методи наукових досліджень: аналіз – для узагальнення сучасних науково-технічних досягнень щодо запобігання забрудненню довкілля внаслідок корозійних процесів сталевих нафтопроводів та методів його захисту від корозійних пошкоджень; дисперсійний та кореляційно-регресійний аналіз – для встановлення закономірностей впливу розмірів пошкодження ізоляційного покриття на швидкість корозії; індикаційні методи – для оцінки корозійної активності ґрунтів території Полтавської області; математичне моделювання – при розробленні математичної залежності розрахунку глибини корозії стінки сталевих нафтопроводів при сталому та періодичному перебуванні агресивної рідини в тріщині ізоляційного покриття; гравіметричний метод оцінки швидкості корозії металів; при синтезі інгібіторів корозії та осадко відкладень – хімічні та фізико-хімічні та методи ЯМР спектроскопії для ідентифікації отриманих інгібіторів.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає:**

*уперше:*

- оцінено ймовірність виникнення випадків забруднення довкілля внаслідок протікання зовнішніх і внутрішніх корозійних процесів з розгерметизацією сталевих нафтопроводів, витоками нафтопродуктів, продуктами їх згоряння або вибухів, яка для нафтопроводів України становить 1 подію за 10 місяців протягом року;

- науково обґрунтовано та визначено хімічний склад і схему безвідходного процесу синтезу екологічно прийнятних інгібіторів корозії металів АС-1 та АС-2 з умістом рослинної олії відповідно 932г та 950г, поліетиленполіамінів (відповідно діетилентріаміну 270 г та етилендіаміну 240г) та 500 см<sup>3</sup> октанолу, а також інгібіторів осадковідкладень з умістом диметилфосфінової кислоти, диметилсульфонатфосфіату натрію, нітрилооксиетилдиметилфосфонової кислоти, які переважають відомі за економічними показниками щонайменше у 1,2 рази;

- із застосуванням математичної моделі електрохімічної корозії сталі нафтопроводу в тріщині ізоляційного покриття розроблено розрахункову методику визначення глибини корозії сталевих нафтопроводів при роботі макрогальванічної корозійної пари за впливу агресивного електролітичного розчину, а також методику розрахунку залишкового ресурсу його екологічно безпечної експлуатації, що дозволило прогнозувати розвиток корозійних процесів на сталевому нафтопроводі, планувати необхідні заходи щодо запобігання забрудненню довкілля;

*удосконалено:*

- неруйнівні методи контролю параметрів електрохімічної корозії сталевих нафтопроводів за наявності тріщин в ізоляційних покриттях в частині застосування запропонованої конструкції мідно-сульфатного електроду порівняння в експериментально-розрахунковій методиці оцінювання глибини корозії стінки нафтопроводу, що створило передумови прийняття обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на запобігання забрудненню довкілля внаслідок аварійних ситуацій на сталевих нафтопроводах та прилеглих до них територій;

набуло подальшого розвитку:

- використання математичного моделювання роботи макрогальванічної пари на сталевій ділянці під час локальної електрохімічної корозії сталевих труб в тріщинах ізоляційного покриття за умов впливу агресивних електролітичних розчинів, яке було покладено в основу запропонованої методики визначення залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації сталевих нафтопроводів.

**Практичне значення одержаних результатів роботи:**

- створені схеми синтезу диметилсульфонатфосфіату натрію та нітрилоксиетилендиметилфосфінової кислоти із доступних реагентів, що є екологічно та економічно вигідними;
- розроблена методика визначення залишкового ресурсу дає можливість раціонально спланувати ремонтні роботи, прогнозувати реальні строки роботи конструкції, переглянути режим експлуатації та запобігти забрудненню довкілля;
- отримані результати дозволяють більш достовірно оцінити несучу здатність нафтопроводів, що працюють за умов агресивного середовища із тріщинами в ізоляційних покриттях, що дозволяє зменшити екологічні ризики через недопущення аварійних розливів нафти;
- розроблена методика розрахунку залишкового ресурсу орієнтована на отримання вихідних даних неруйнівним методом на діючих нафтопроводах;
- результати даної наукової роботи в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні екологічні загрози від корозії трубопроводів та обладнання при використанні або утилізації підтоварних вод нафти, що дасть можливість розробити заходи по запобіганню виникнення шкідливих впливів при розгерметизації нафтопроводів.

Спосіб прогнозування розвитку корозії трубопроводів з часом контакту металевих труб з агресивним електролітом неруйнівним способом впроваджено у ТОВ «Праймгаз» (акт впровадження від 11.03.2019 р.).

Методика неруйнівного методу контролю процесів корозії металевих конструкцій об'єктів транспортування нафти впроваджено при виконанні робіт з держбюджетної тематики: «Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів транспортування та зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах» (акт впровадження від 5.02.2019р.).

Методика прогнозування розвитку корозії нафтопроводів з часом контакту металевих труб з агресивним електролітом неруйнівним способом впроваджена Науково-технічним центром Полтавського відділення Інженерної Академії України (акт впровадження від 5.03.2019р.).

Окрім того результати дисертаційного дослідження використані Полтавським національним технічним університетом імені Юрія Кондратюка в процесі викладання дисциплін «Техноекологія» для студентів спеціальностей 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (акт впровадження від 20.02.2019р.) та «Математичне моделювання якості навколишнього середовища» для студентів спеціальностей 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (акт впровадження від 20.02.2019р.)

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи забезпечуються конкретністю постановки задач досліджень; використанням в дослідженні комплексного підходу; обґрунтованим вибором припущень і обмежень; теоретичною послідовністю та коректністю розвинутих моделей; використанням адекватного математичного апарату; порівняльним аналізом результатів чисельних розрахунків; збіжністю теоретичних даних із результатом обчислювального експерименту.

**Особистий внесок автора** полягає в аналізі стану проблеми, формуванні та розробленні ідеї та теми дисертації, проведенні теоретичного обґрунтування напрямків досліджень, виконанні безпосередньо досліджень при оцінці впливу розмірів пошкоджень ізоляційного покриття на залишковий ресурс нафтопроводу, розробленні наукових положень визначення залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів за умов корозійних впливів зовнішнього агресивного середовища. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень, представлених у дисертаційній роботі, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій в авторефераті [1 – 41].

Особисто автором у роботах, опублікованих за співавторства було:

- проведений аналіз геоекологічних проблем експлуатації нафтопроводів та корозійної агресивності середовищ експлуатації нафтопроводів Полтавської області, та визначено райони області з найбільш корозійно-агресивними ґрунтами [1, 2, 26, 27–31, 38];
- розглянуто та досліджено електрохімічні характеристики зовнішнього середовища та фактори, що впливають на екологічну безпеку нафтопроводів [35];
- розроблено фізичну та математичну моделі електрохімічної корозії сталі нафтопроводу на ділянках з порушеною ізоляцією при дії електролітичних розчинів та проведено теоретичне дослідження математичної моделі локальної електрохімічної корозії [21 – 23];
- розроблено методикку визначення залишкової товщини стінки сталевих нафтопроводів та його залишкового ресурсу [24, 25, 35, 40, 41];
- проведено оцінювання техногенно-екологічної безпеки нафтопроводів [17, 37];
- виконано оцінювання корозійної активності мінералізованих пластових вод нафтових родовищ. Створено нові методи синтезу інгібіторів осадко відкладень та корозії із доступних реагентів. Досліджено ефективність інгібіторів корозії та осадко відкладень, показано, що вони, наряду з іншими фосфонатами є ефективними інгібіторами корозії металів у прісних водах. Їх ефективність зростає в присутності іонів цинку [16 – 18, 32, 39].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень за напрямком дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових, науково-практичних конференціях та семінарах різних рівнів, а саме: наукові конференції Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (м. Полтава, 2011-2017 р.р.) ІІ Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Екологія. Довкілля. Молодь» (м. Полтава, 2011 р.), V Всеукраїнський науково-практичний форум установ НАН України (м. Полтава, 2012 р.), ІІІ Міжнародна наукова конференція студентів, магістрантів, аспірантів та молодих вчених «Екологія, неоекологія,

охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» (м. Харків, 2013 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2014 р.), Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Екологія. Довкілля. Молодь» (Полтава, 2015 р.), 4-ий міжнародний конгрес: «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2016 р.), 77 Міжнародна науково - практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 2017 р.), 5-ий міжнародний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2018 р.), I Міжнародна азербайджансько-українська конференція «Building innovations – 2018», (Баку, 24-26.05.18.), I Міжнародна науково-практична конференція «Technology, Engineering and Science – 2018», (Лондон, 24-25.10.2018р.), XX Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Людина. Суспільство». Київ: НТУУ «КПІ імені І. Сікорського», (Київ, 23-24.05. 2019), I Міжнародна науково-практична конференція “Vin smart eco” КВНЗ –Вінницька академія неперервної освіти (Вінниця: 20-22.05. 2019), II Міжнародна українсько-азербайджанська конференція «Bulding Innovations - 2019», (Полтава, 23-24 травня 2019р. ); VII Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю, (Вінниця 25-27.09.19.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екології та енергозбереження», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, (Миколаїв, 20-22 вересня 2019 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи було опубліковано 41 наукових праць з яких: 3 монографії – за співавторства, 21 стаття, зокрема 17 статей – у наукових фахових виданнях з переліку МОН України, 5 статей – у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних, серед яких 2 статті індексуються у Scopus, 2 статті у періодичних наукових виданнях інших держав, 1 патент України на корисну модель та 17 матеріалів доповідей у збірниках праць конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, семі розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Матеріали дисертації викладено на 355 сторінках друкованого тексту. Список використаних джерел містить 291 найменування.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру і обсяг роботи.

**Перший розділ** присвячений огляду й аналізу праць вітчизняних та закордонних учених щодо аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань шкідливого впливу на довкілля внаслідок аварійних витоків, згоряння або вибухів нафтопродуктів на сталевих нафтопроводах і прилеглих до них територіях. Однією із проблем екологічної безпеки нафтопроводів є зовнішні та внутрішні корозійні процеси, що призводять до розгерметизації сталевих нафтопроводів та створення надзвичайних ситуацій. Наслідками зазначеного є значні екологічні збитки, пов'язані з втратою нафтопродуктів та значними впливами на компоненти



довкілля: забруднення атмосферного повітря, ґрунтового та водного середовища тощо. Під час експлуатації нафтопроводів їх негативний вплив на довкілля відбувається у разі витоків нафти та нафтопродуктів, вибухів та пожеж через їх розгерметизацію за причиною зовнішньої та внутрішньої корозії металу труб.

Схематичне зображення негативного впливу на довкілля внаслідок корозійних процесів з розгерметизацією сталевих нафтопроводів наведено на рис. 1

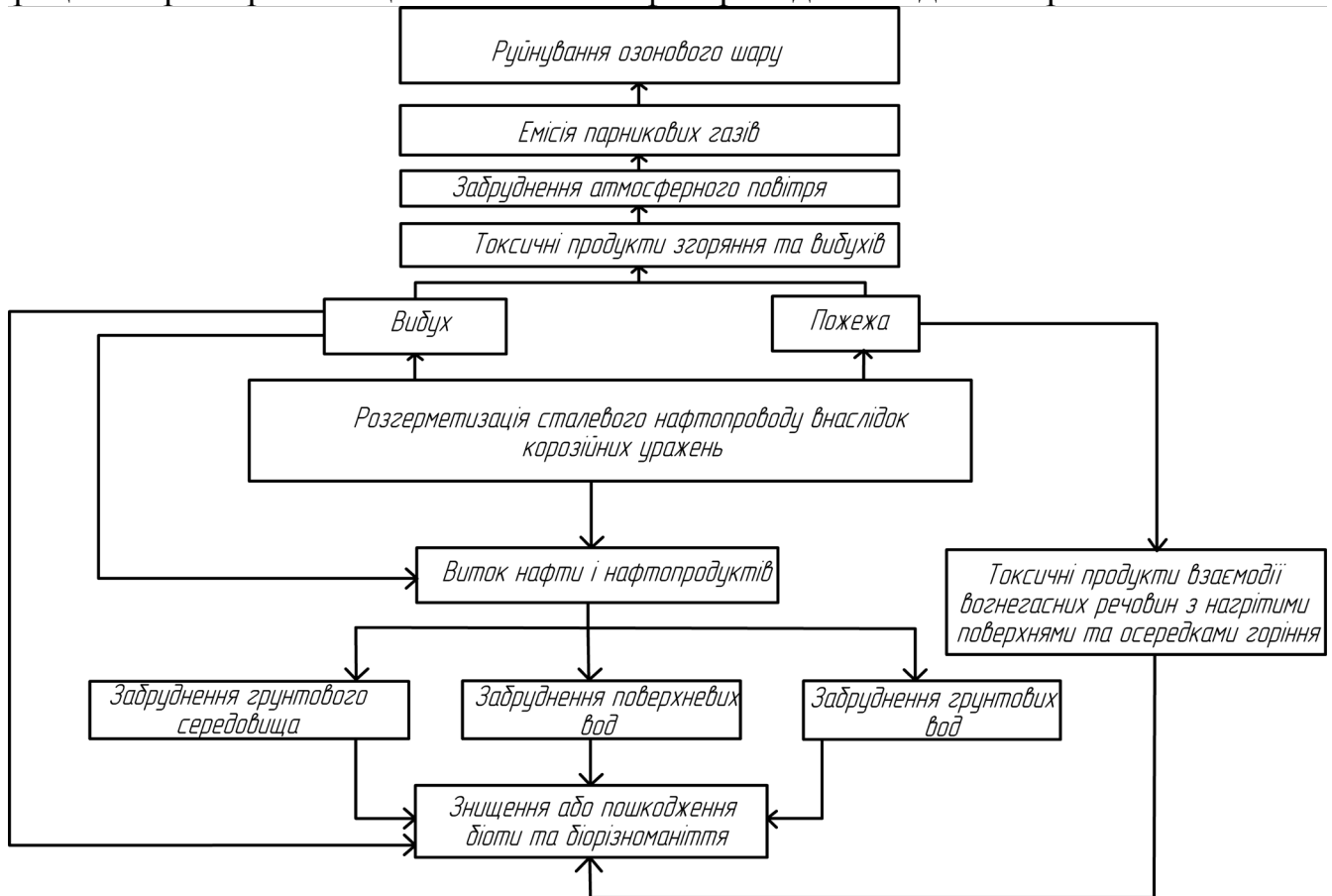


Рисунок 1 – Схематичне зображення негативного впливу на довкілля внаслідок корозійних процесів з розгерметизацією сталевих нафтопроводів

Однією із масштабних екологічних катастроф, пов'язаних з розгерметизацією нафтопроводу була в Росії на нафтопроводі «Коминнефть» у 1994 році, при цьому втрата нафти склала до 576000 барелів, площа забрудненої ґрунтової поверхні до 115 га.

Численні дослідження щодо поведінки сталі при електрохімічній корозії описані в багатьох працях, проте в них не враховано впливу локальних корозійних пошкоджень та умов експлуатації конструкцій.

Конкретні задачі, що пов'язані із безпекою сталевих нафтопроводів вирішувалися у ФМІ імені Г.В. Карпенка НАН України, ІФНТУ нафти і газу, НТУ України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Інституті електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, НУ «Львівська політехніка» та ін. Але в їх роботах недостатню увагу було приділено саме запобіганню ризиків забруднення довкілля внаслідок внутрішніх та зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів.

Корозійні процеси призводять до деградації фізико-хімічних властивостей сталі та утворенню корозійних дефектів на поверхні труби. Впровадження заходів, що

запобігають розвитку та протіканню корозії, допоможуть уникнути витоків нафти та нафтопродуктів. Ефективний захист від внутрішньої корозії нафтопроводу передбачає використання інгібіторів корозії та осадковідкладень. Існуючі високоефективні інгібітори корозії металів достатньо дорогі, а схеми їх синтезу екологічно не вигідні через утворення значної кількості агресивних відходів. Тому постає питання пошуку ефективних інгібіторів корозії металів, які б враховували екологічні та економічні вимоги.

Оцінювання дійсного технічного стану нафтопроводу на момент обстеження з врахуванням корозійного зносу стінки нафтопроводу дозволить оцінити його довговічність та попередити забруднення довкілля через унеможливлення аварійних витоків нафти, вибухів та пожеж. В розглянутих наукових працях відображено загальні підходи до визначення залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів в умовах дії агресивного середовища, а зовнішні корозійні процеси сталевих нафтопроводів представлені, головним чином, емпіричними залежностями. Розглянуті методи та моделі не враховують наявності пошкоджень ізоляційного покриття, змін середовища експлуатації нафтопроводів та ін. При визначенні залишкового ресурсу конструкцій, які працюють в агресивному середовищі з тріщинами в ізоляційних покриттях, необхідні чіткі уявлення про фізичні і фізико-хімічні процеси, які відбуваються в зоні тріщини труби, а розрахунки повинні базуватися на надійних даних про кінетику та особливості корозії сталі в тріщині. Відсутні систематизовані дані з розрахунку ресурсу нафтопроводів, що проектуються, не узгоджено методики оцінки залишкового ресурсу та не визначено конкретні заходи щодо забезпечення необхідного їй рівня.

Тому, на сьогодні існує необхідність розробки нових залежностей оцінювання корозійних процесів, які б враховували локальні впливи навколишнього середовища, особливості експлуатації нафтопроводів.

Отже, екологічна безпека нафтопроводів, а саме запобігання забрудненню довкілля шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу їх експлуатації не втрачає своєї актуальності.

На основі проведеного огляду зроблено такі висновки:

1. Одним із актуальних питань екологічної безпеки нафтопроводів є зовнішні та внутрішні корозійні процеси, що призводять до розгерметизації сталевих нафтопроводів та створення надзвичайних ситуацій. Наслідками зазначеного є значні екологічні збитки, пов'язані з втратою нафтопродуктів та значних забруднень компонентів довкілля. Не врахування корозійних процесів, відсутність наукових основ запобігання забрудненню довкілля, неузгодженість методик оцінювання залишкового ресурсу, застосування неефективних інгібіторів унеможливорює запобігання забрудненню довкілля та призводить до підвищення екологічної небезпеки нафтопроводів.
2. Не дивлячись на великий спектр існуючих інгібіторів осадковідкладень та корозії, проблема пошуку нових високоефективних реагентів залишається досить гострою. Пов'язано це із тим, що ряд ефективних інгібіторів є дорогими і застосування їх не рентабельне, інші – недостатньо ефективні. Крім того, в промисловості, особливо у

видобувній галузі, часто зустрічаються такі нестабільні щодо відкладення осадів середовища, в яких навіть найкращі інгібітори є неефективними.

3. Визначення залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів, що підлягають впливу агресивного середовища, є комплексним завданням, яке базується на отриманні інформації про технічний стан конструкції, розрахунках термінів та режимів екологічно безпечної роботи нафтопроводу.

4. Зважаючи на те, що робота нафтопроводу з тріщинами в ізоляційному покритті пов'язана із зовнішньою корозією сталі, основна увага при обстеженнях повинна приділятися визначенню корозійних втрат металу в тріщинах. Тому поряд із загальними показниками, що обов'язкові при визначенні технічного стану трубопроводів, необхідно виконувати також спеціальні обстеження, пов'язані із вивченням корозії у тріщинах ізоляційних покриттів. Відомі методи корозійних обстежень не завжди дають точні результати, а більш точні методи малодоступні та дорогі для використання на діючих трубопроводах.

5. Розглянуті методи відображають загальні підходи до визначення залишкового ресурсу трубопроводів в умовах дії агресивного середовища, а корозійні процеси сталі трубопроводу враховуються наближено і не витікають із основних законів електрохімічної корозії. При визначенні залишкового ресурсу конструкцій, які працюють в агресивному середовищі з тріщинами в ізоляційних покриттях, необхідні чіткі уявлення про фізичні і фізико-хімічні процеси, які відбуваються в зоні тріщини конструкцій, а розрахунки повинні базуватися на надійних даних про кінетику та особливості корозії сталі в тріщині.

6. Тріщини в ізоляційному покритті значно впливають на розвиток корозії трубопроводу, утворюючи умови для виникнення макрокорозійних пар, сила струму яких може бути використана як узагальнена характеристика при визначенні втрат товщини стінки.

7. Існує багато різних методів з визначення швидкості, глибини корозії, що відрізняються складністю, точністю результатів. Більшість методик базуються на емпіричних залежностях, недоступних для використання в умовах експлуатації нафтопроводу. Відсутні методики визначення корозії сталі, котрі б впливали із законів електрохімічної корозії металів.

8. В даній ситуації математична модель, яка будується на розподілі стаціонарного електрополя на ділянці сталевого трубопроводу, дає необмежені можливості для більш глибоких і точних досліджень з корозії трубопроводу в тріщині ізоляційного покриття. Математична модель дозволяє враховувати найрізноманітніші фактори та збурення з тим, щоб з'ясувати їх вплив, описати механізм накопичення уражень у сталі нафтопроводу.

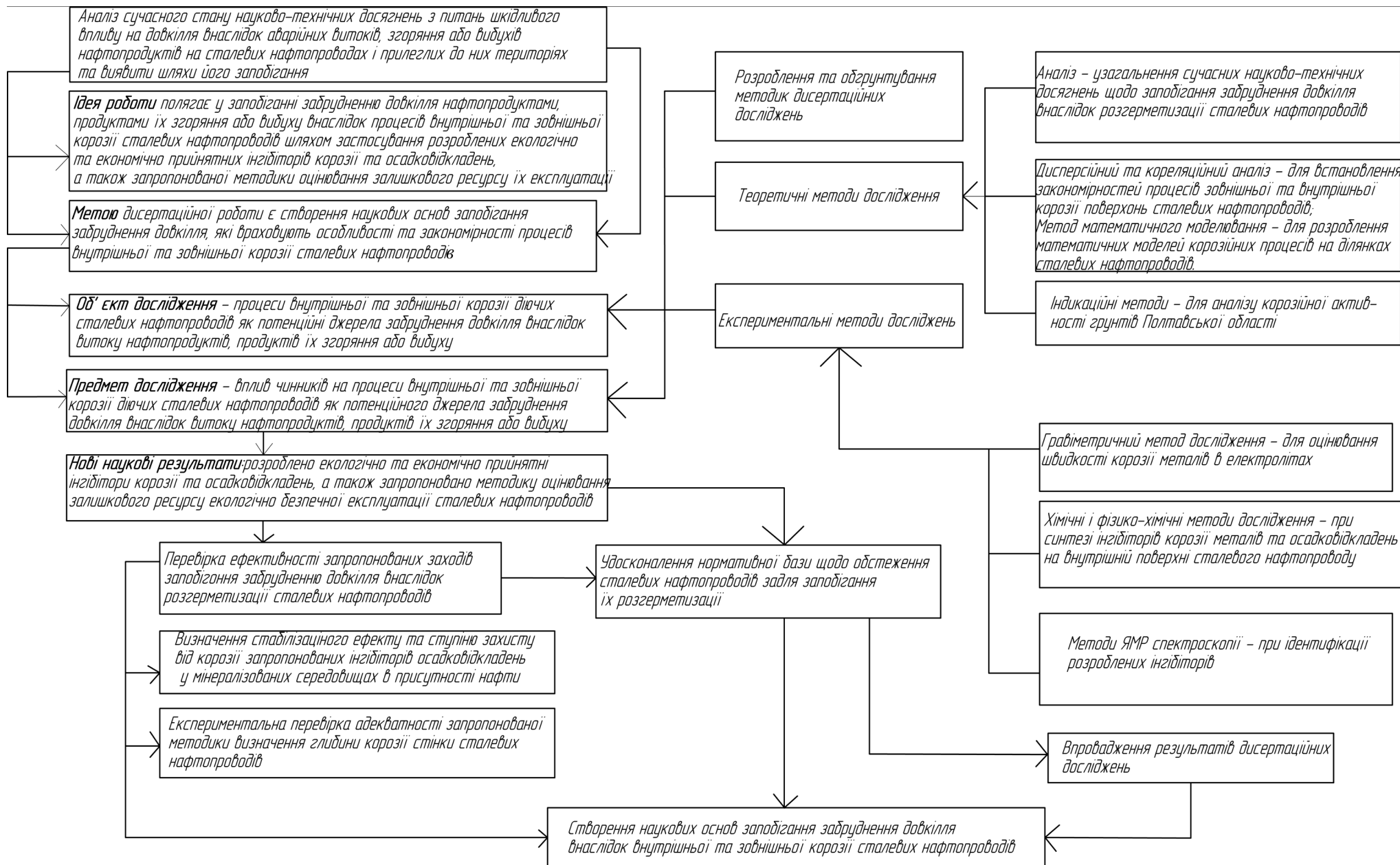


Рисунок 2– Схематичне зображення методології проведення дисертаційних досліджень

На основі огляду літератури і проведеного аналізу стану питання сформульовані мета, завдання та методологічну схему дисертаційних досліджень (рис. 2).

В результаті виконаного аналізу було вирішено першу та другу задачі роботи.

У **другому розділі** описані об'єкти дослідження, методи дослідження, методики проведення експериментів та математичні методи обробки результатів та методи та прилади контролю процесів. У розділі наведено дані щодо ґрунтових середовищ, аналіз корозійної активності яких проведений в роботі. Наведено характеристику водних середовищ, що використовувались при проведенні корозійних випробувань. Представлені методи синтезу інгібіторів осадковідкладень та корозії металів у водно-нафтових сумішах. Наведено методику оцінювання ефективності інгібіторів корозії металів у мінералізованих водах.

В розділі наведено методику оцінювання корозійної активності ґрунтів по відношенню до сталі; методику визначення глибини корозії сталі при роботі гальванопари; методику визначення впливу ширини ділянки ураження на глибину корозії ділянки сталевих нафтопроводів.

Наведені методики математичної обробки отриманих результатів.

**Третій розділ** присвячено моніторингу ґрунтів Полтавської області щодо їх корозійної активності відносно сталі нафтопроводів.

Магістральні нафтопроводи експлуатуються в природних умовах, головним чином, під землею, тому вони підлягають впливу підземної ґрунтової корозії. Дослідження корозійних властивостей ґрунтового середовища, в якому експлуатуються нафтопроводи України, зокрема Полтавської області, є особливо доречним, оскільки мережа нафтопроводів є розгалуженою, а ґрунти, в яких вони пролягають, є різноманітними за своїм типом, механічним складом й іншими показниками.

На основі моніторингових та науково-технічних літературних даних проведено аналіз ґрунтів Полтавської області по магістральним трасам прокладання нафтопроводів щодо їх корозійної активності за наступними показниками: механічний склад ґрунту, вологість, вміст гумусу, хлоридів, сульфатів, нітратів, електропровідність ґрунту тощо.

На основі отриманих даних побудовано карти корозійної активності ґрунтів за районами області та показниками, що впливають на агресивність ґрунту (рис. 3, 4).

Виявлено вплив агресивних розчинів ґрунтового середовища на ділянки пошкоджень ізоляційних покриттів сталевих нафтопроводів, а також на протікання корозійних процесів, побудовано карти ґрунтів за показниками їх корозійної активності на прикладі Полтавської області. Встановлено, що властивості ґрунтів Полтавської області сприяють виникненню та розвитку корозійних процесів на зовнішніх поверхнях нафтопроводів, що значно підвищує ймовірності випадків забруднення довкілля внаслідок розгерметизації сталевих нафтопроводів.

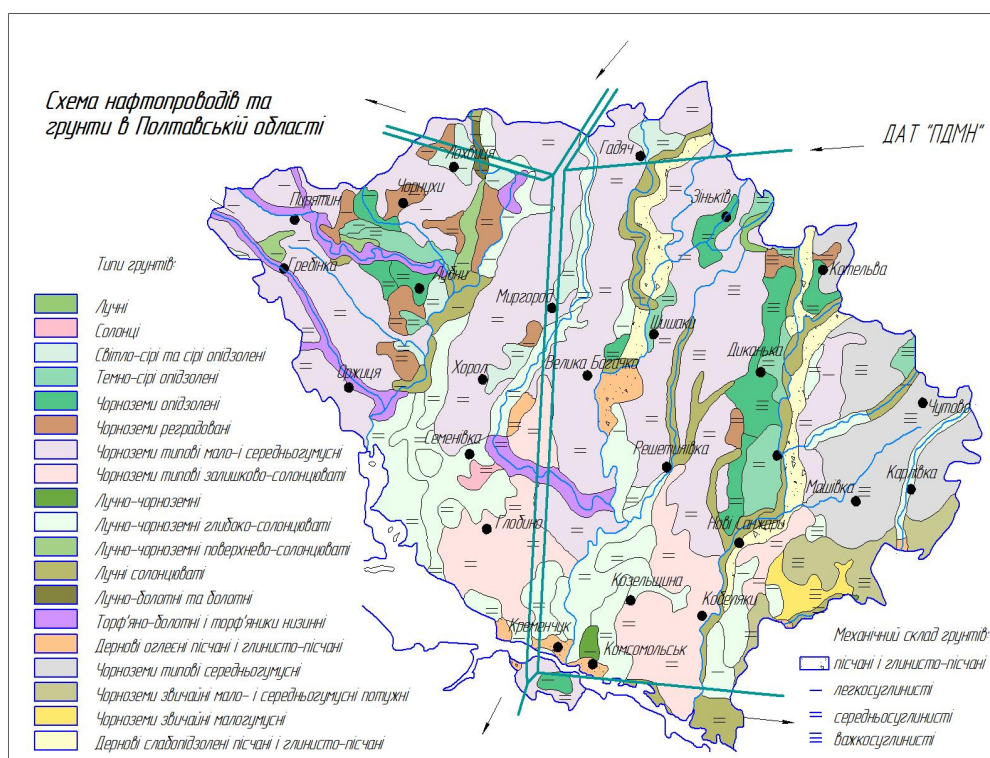


Рисунок 3 – Карта корозійної активності ґрунтів Полтавської області з урахуванням типу та механічного складу

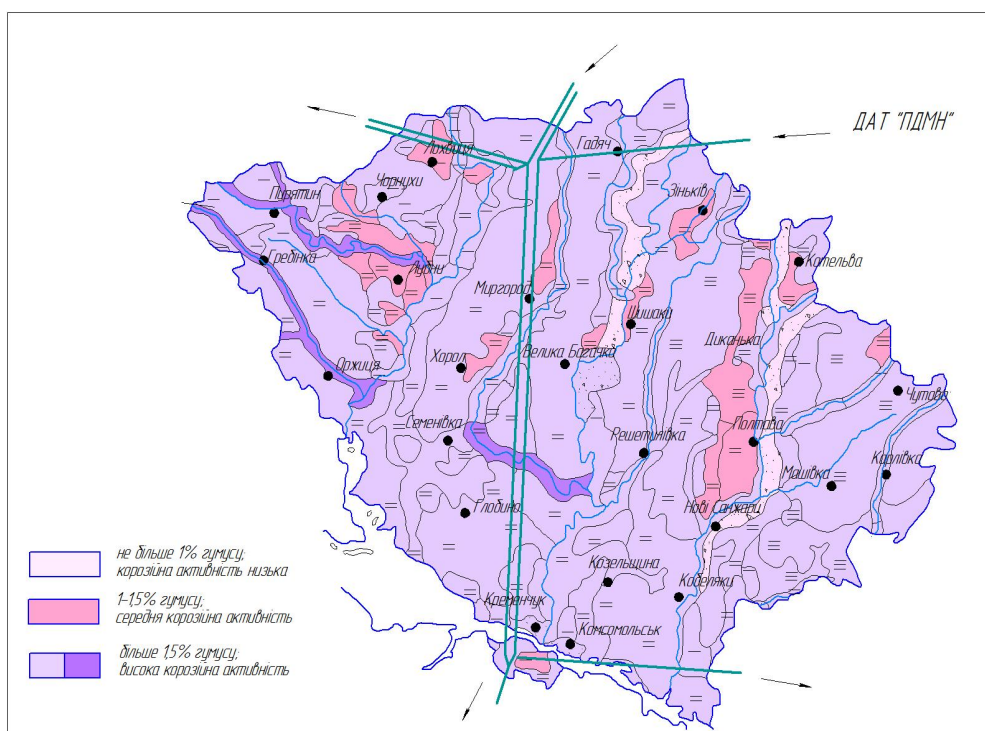


Рисунок – 4 Карта корозійної агресивності ґрунтів Полтавської області з урахуванням середнього вмісту гумусу

Таким чином на Полтавщині існують всі умови для розвитку й протікання корозійних процесів на зовнішніх ділянках нафтопроводів, оскільки нафтопроводи Полтавської області мають значну протяжність та експлуатуються в середовищах,

що характеризується різноманітністю едафічних показників, що значною мірою впливає на їх екологічну безпеку.

Проведені експериментальні дослідження щодо оцінювання корозійної активності залежно від типу ґрунту за струмовими, глибинними та ваговими показниками, які показали, що за всіма показниками найбільш корозійноактивний ґрунт відносно сталевих зразків є торф.

Екологічна безпека нафтопроводів визначається величиною ймовірності випадків забруднення довкілля внаслідок розгерметизації сталевих нафтопроводів, у тому числі із урахуванням зовнішніх та внутрішніх корозійних процесів. В цілому екологічний ризик розглядається як ймовірність настання небажаних подій та наслідків та є важливою ознакою екологічної безпеки. Ймовірність відмови нафтопроводу протягом року  $Q(t)$  доцільно вважати ймовірністю виникнення екологічного ризику.

Для розрахунку ймовірності випадків забруднення довкілля внаслідок розгерметизації сталевих нафтопроводів запропоновано теорію надійності. Відповідно до якої аварійні витіки нафти розглядають як еколого-техногенний ризик, що призводить до порушення стійкості компонентів навколишнього середовища. Згідно зазначеної теорії, показником надійності відновлюваних об'єктів, до яких відносять і нафтопроводи є безвідмовність. Безвідмовність оцінюється ймовірністю безаварійної роботи, параметром потоку аварійних подій та проміжком часу безаварійної роботи.

В розділі проведено розрахунок ймовірностей виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з витіком, згорянням або вибухами нафтопродуктів внаслідок розгерметизації нафтопроводів та шкідливим впливом на довкілля, результати якого наведені у таблиці 1.

Зважаючи на значну протяжність нафтопроводів територією України, у середньому слід очікувати 1 аварію на 10 місяців (7500 годин). Зрозуміло, що найбільшу небезпеку несуть нафтопроводи, які мають найбільшу протяжність, але треба враховувати також термін експлуатації трубопроводу.

Таблиця 1 – Результати розрахунку ймовірностей виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з витіком, згорянням або вибухами нафтопродуктів внаслідок розгерметизації нафтопроводів та шкідливим впливом на довкілля

Назва нафтопроводів	Параметр потоку аварійних подій, $\omega$ 1/рік	Проміжок часу безаварійної роботи, $T$ , рік	Ймовірність безаварійної роботи протягом року, $P(t)$	Ймовірність виникнення аварії протягом року, $Q(t)$
1	2	3	4	5
Мічуринськ-Кременчук	0,086975	11,5	0,91670	0,08330
Гнідинці- Глинсько- Розбишівська I, II нитки	0,031507	31,7	0,96898	0,03102
Глинсько- Розбишівська- Кременчук	0,036333	27,5	0,96432	0,03568
М Павлівка –Глинсько- Розбишівська	0,018056	55,4	0,98211	0,01789

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Самара-Лисичанськ	0,040351	24,8	0,96045	0,03955
Лисичанськ- Тихорецьк I, II нитки	0,101381	9,9	0,90359	0,09641
«НПС Лисичанськ»- Писичанський НПЗ I, II нитки	0,003430	291,5	0,99658	0,00342
Лисичанськ-Кременчук	0,103218	9,7	0,90193	0,09807
Кременчук-Херсон	0,096432	10,4	0,90807	0,09193
Снігурівка-Одеса	0,061176	16,3	0,94066	0,05934
Мозир-Броди I, II черга	0,178188	5,6	0,83678	0,16322
Броди-Держкородон I, II черга	0,159250	6,3	0,85278	0,14722
Відвід на Угорщину	0,005365	186,4	0,99465	0,00535
Одеса-Броди	0,165056	6,1	0,84785	0,15215
Долина-Дрогобич	0,014381	69,5	0,98572	0,01428
Жулин-Дрогобич	0,010559	94,7	0,98950	0,01050
Орив-Дрогобич	0,005831	171,5	0,99419	0,00581
Борислав-Дрогобич	0,001984	504,0	0,99802	0,00198
Всього	1,167915	0,856	0,31101	0,68899

Встановлено потенційні небезпеки при можливих витоках нафти і нафтопродуктів за допомогою моделювання розгерметизації лінійної частини магістрального нафтопроводу Глинсько-Розбишевське-Кременчук, розраховано об'єми витоків нафти при характерних розмірах дефектних пошкоджень, які показують, що з врахуванням режимів витоку нафти та розмірів пошкодженої ділянки труби середня кількість втрат нафти з моменту зупинки перекачування нафти до закриття засувки (з врахуванням сценаріїв аварій) складе 2774389,5 кг, при цьому площа забруднення ґрунтової поверхні складе 3552,44 м<sup>2</sup>.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили вирішити третю та четверту задачі дослідження в роботі.

**У четвертому розділі** проведено оцінювання корозійної активності мінералізованих вод та водно-нафтової суміші по відношенню до нелегованої сталі, їх стабільності щодо осадковідкладення.

Вивчено процеси корозії нелегованої сталі Ст20 та Ст3 в модельних розчинах з мінералізацією 25,025 – 94,585 г/дм<sup>3</sup>, розчинів хлориду та сульфату натрію з концентраціями від 1 до 100 мг/дм<sup>3</sup>, суміші розчинів хлориду натрію з концентраціями по хлориду натрію 30 та 100 г/дм<sup>3</sup> з нафтою при співвідношенні об'ємів водного розчину до об'єму нафти від 2:8 до 9,5:0,5 при температурах від 25 до 80<sup>0</sup>С. Суміші розчинів хлориду натрію та нафти містили оцтову кислоту в концентрації до 5 г/дм<sup>3</sup>. Процес корозії контролювали гравіметричним методом. Для порівняння використано водопровідну та артезіанську воду.

При зростанні концентрації солей у водному середовищі зростають концентрації аніонів та катіонів, що суттєво прискорює анодне розчинення металу. Але при цьому суттєво знижується розчинність кисню у воді, що з одного боку призводить до погіршення умов пасивації металу, а з іншого боку - знижує швидкість катодного процесу. Тому, за певних умов швидкість процесу зростає із підвищенням концентрації солей у розчині, а при подальшому підвищенні концентрації солей в розчині швидкість корозії, після проходження через максимум, сповільнюється через зниження швидкості анодного процесу.



Було перевірено залежність швидкості корозії сталі Ст3, латуні Л62 та міді М-2 від концентрації розчинів хлориду та сульфату натрію. Очевидно, що корозія сталі головним чином залежить від концентрації кисню у воді. Розчинність кисню у розчинах  $NaCl$  і  $Na_2SO_4$  поступово знижується із зростанням концентрації солі, але мало залежить від типу солі, особливо за високих рівнів мінералізації. За високих рівнів мінералізації швидкість корозії сталі мало знижується при зниженні концентрації розчиненого кисню від 8,31 – 8,47 мг/дм<sup>3</sup> до 4,35 – 4,5 мг/дм<sup>3</sup>. Результати по оцінюванні корозії металів в різних водних середовищах при температурі 15<sup>0</sup>С наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень швидкості корозії металів у водних розчинах від рівня їх мінералізації та типу металу при температурі 15<sup>0</sup>С

Досліджуване середовище	Мінералізація середовища, мг/дм <sup>3</sup>	Метал	Швидкість корозії металу	
			г/м <sup>2</sup> год	мм/рік
Водопровідна вода	410	Сталь Ст3	0,0390	0,0435
		Мідь М-2	0,0053	0,0052
		Латунь Л62	0,0066	0,0068
		Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	0,0008	0,0009
Артезіанська вода	435	Сталь Ст3	0,0324	0,0360
		Мідь М-2	0,0092	0,0090
		Латунь Л62	0,0112	0,0122
		Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	0,0016	0,0017
Модельний розчин №1	25029	Сталь Ст3	0,0480	0,05328
		Мідь М-2	0,0374	0,0364
		Латунь Л62	0,0386	0,0420
		Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	0,0007	0,0008
Модельний розчин №2	73533	Сталь Ст3	0,0628	0,0760
		Мідь М-2	0,0241	0,0235
		Латунь Л62	0,0339	0,0369
		Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	0,0008	0,0009
Модельний розчин №3	94585	Сталь Ст3	0,0675	0,0817
		Мідь М-2	0,0301	0,0294
		Латунь Л62	0,0389	0,0423
		Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	0,0006	0,0007

Крім водних середовищ з різним рівнем мінералізації води було досліджено корозійну активність як мінералізованих вод, так і сумішей мінералізованих вод з нафтою (таблиця 3).

Таблиця 3 – Результати експериментальних досліджень швидкості корозії сталі Ст20 від складу сольових розчинів та водно-нафтової суміші

Склад розчину (суміші)	t <sup>0</sup> С	Тривалість експериментального дослідження (τ), год	Швидкість корозії сталі за гравіметричним методом	
			г/м <sup>2</sup> год	мм/рік
1	2	3	4	5
NaCl, 30 г/дм <sup>3</sup>	25	72	0,05968	0,06624
NaCl, 30 г/дм <sup>3</sup>	80	4	0,3015	0,3346

1	2	3	4	5
NaCl, 100 г/дм <sup>3</sup>	25	72	0,045505	0,0500
NaCl, 100 г/дм <sup>3</sup>	80	4	0,1739	0,1931
95 см <sup>3</sup> р-ну NaCl, (100 г/дм <sup>3</sup> ), 5 см <sup>3</sup> нафти 0,5 г/дм <sup>3</sup> CH <sub>3</sub> C (O)OH	30	4	0,2783	0,3089
	60	4	1,6698	1,8534
	80	4	1,7045	1,8920
95 см <sup>3</sup> р-ну NaCl, (100 г/дм <sup>3</sup> ), 5 см <sup>3</sup> нафти	80	4	0,2971	0,3188
80 см <sup>3</sup> р-ну NaCl, (100 г/дм <sup>3</sup> ), 20 см <sup>3</sup> нафти	80	4	0,2899	0,3218
	25	72	0,01656	0,01838
10 см <sup>3</sup> р-ну NaCl, (100 г/дм <sup>3</sup> ),	25	168	0,2077	0,2305
90 см <sup>3</sup> нафти, 0,5 г/дм <sup>3</sup> CH <sub>3</sub> C (O)OH	80	4	1,6002	1,7762
20 см <sup>3</sup> 3% р-ну NaCl, 80 см <sup>3</sup> нафти	80	4	0,2899	0,3215
20 см <sup>3</sup> 3% р-ну NaCl, 80 см <sup>3</sup> нафти, 0,5 г/дм <sup>3</sup> CH <sub>3</sub> C (O)OH	80	4	1,5872	1,7657
20 см <sup>3</sup> 3% р-ну NaCl, 80 см <sup>3</sup> нафти, 3 г/дм <sup>3</sup> CH <sub>3</sub> C (O)OH	80	4	3,4508	3,8304
80 см <sup>3</sup> 3% р-ну NaCl, 20 см <sup>3</sup> нафти	80	4	0,3125	0,3448

При цьому визначено швидкість корозії сталі Ст20 як у розчинах хлориду натрію з концентрацією солі 30 та 100 г/дм<sup>3</sup> так і в сумішах розчинів хлориду натрію та нафти при різних співвідношеннях. При підвищенні температури швидкість корозії сталі Ст20 зростає. При використанні суміші нафти і води швидкість корозії сталі Ст20 при 25<sup>0</sup>С знизилась до 0,01838 мм/рік за рахунок гідрофобізації поверхні сталі, а при 80<sup>0</sup>С швидкість корозії сталі в суміші води з нафтою не перевищувала 0,3218 мм/рік. При наявності оцтової кислоти навіть у присутності нафти швидкість корозії нафти сягала 0,2305 мм/рік при 25<sup>0</sup>С, 0,3089 мм/рік при 30<sup>0</sup>С, 1,8534 мм/рік при 60<sup>0</sup>С і 1,8920 мм/рік при 80<sup>0</sup>С при використанні суміші, що містила 95 см<sup>3</sup> водного розчину NaCl (100 г/дм<sup>3</sup>) та 5 см<sup>3</sup> нафти. При збільшенні об'єму нафти до 90 см<sup>3</sup> на 10 см<sup>3</sup> розчину хлориду натрію швидкість корозії при 80<sup>0</sup>С сягала 1,7762 мм/рік.

Для оцінювання стабільності води щодо осадковідкладень розчини близькі за складом до під товарних вод нафти нагрівали протягом 6 годин при 95<sup>0</sup>С. Воду після нагрівання охолоджували, освітлену при відстоюванні воду фільтрували через фільтр «синя стрічка» та визначали залишкову жорсткість і лужність води. Модельні розчини, що близькі за складом до вод із свердловин нафтових родовищ, які мали лужність на рівні 4,0–4,5 мг-екв/дм<sup>3</sup> при високих концентраціях кальцію (> 21 мг-екв/дм<sup>3</sup>), але при відносно невисоких концентраціях сульфатів (< 20 мг-екв/дм<sup>3</sup>) були схильні до осадко утворення за рахунок виділення карбонатних відкладень. Але води з нафтових родовищ аналізувались в основному після виділення осадів. Судячи по хімічному складу відкладень у трубах, значний вклад в їх утворення вносить відкладення гіпсу. А якщо врахувати, що води із свердловин нафтових родовищ містять велику кількість іонів кальцію, то стає очевидним, що основна маса гіпсу відклалась в трубопроводах іще до виходу води на поверхню. Це підтверджують результати, отримані при використанні модельних розчинів, що містили крім іонів жорсткості, сульфати у концентраціях 166 та 438 мг-екв/дм<sup>3</sup>.

В розділі описано методику розроблення інгібіторів осадковідкладень у водах з високою мінералізацією. Найбільш ефективними інгібіторами осадковідкладень у водних середовищах із високим рівнем мінералізації є фосфонкарбонові або амінофосфонові кислоти та їх солі. Головним недоліком відомих інгібіторів осадковідкладень є їх висока вартість через використання дефіцитної сировини та складність процесів їх синтезу.

При розробці інгібіторів осадковідкладень виходили з того, що висока їх ефективність обумовлена структурами, що забезпечують хелатоутворення.

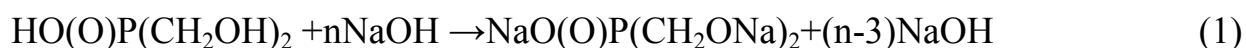
Розроблена нами технологія отримання диметилсульфонатфосфінату натрію (ДМСФН) основана на реалізації процесу, що проходить через стадії синтезу натрієвої солі диметилфосфінової кислоти (ДМФК) з отриманням при взаємодії із сульфідом натрію кінцевого продукту диметилсульфонатфосфінату натрію (ДМСФН).

Для синтезу алкіламінофосфонових кислот використали метилфосфонову кислоту, отриману при взаємодії фосфористої кислоти, отриманої при гідролізі трихлористого фосфору та параформу або формаліну.

При конденсації метилфосфонової кислоти з моноетаноламіном отримали нітрилоксиетилдиметиленфосфонову кислоту НОЕДМФК.

Для оцінювання ефективності інгібіторів осадковідкладень у мінералізованих водних середовищах як стабілізатори осадковідкладень використано відомі фосфонатні інгібітори, такі як оксиетилидендифосфорова кислота (ОЕДФК) та нітрилотриметилфосфорова кислота (НТМФК) та синтезовані нами фосфінатні інгібітори ДМФК, ДМСФН та фосфонатний інгібітор НОЕДМФК. Модельні розчини, що близькі за складом до підтоварних вод нафти були схильні до осадкоутворення за рахунок виділення карбонатних відкладень.

Відомо, що карбонатні відклади утворюються при нагріванні розчинів, що містять гідрокарбонат кальцію в концентраціях 2 – 5 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Тому ефективність розроблених інгібіторів щодо карбонатних відкладень можна було б оцінити за результатами отриманих по артезіанській воді (рис. 5). Як видно з рисунку, відомі інгібітори (ОЕДФК та НТМФК) забезпечували високий рівень стабілізаційного ефекту при використанні у дозах 2 – 5 мг/дм<sup>3</sup>. Високою також була ефективність синтезованих інгібіторів ДМСФН та НОЕДМФК. Дещо нижчою була ефективність диметилфосфінової кислоти. Пояснити це можна тим, що вона може утворювати хелатні сполуки лише в лужному середовищі за рахунок дисоціації метилольних груп.



Для оцінки впливу на ефективність інгібіторів осадковідкладення рівня мінералізації води було досліджено їх ефективність у 10%-ому розчині хлориду натрію в артезіанській воді. При підвищенні загального рівня мінералізації води, без зміни концентрацій іонів кальцію та гідрокарбонат аніонів, ефективність інгібіторів накипоутворення не змінилася.

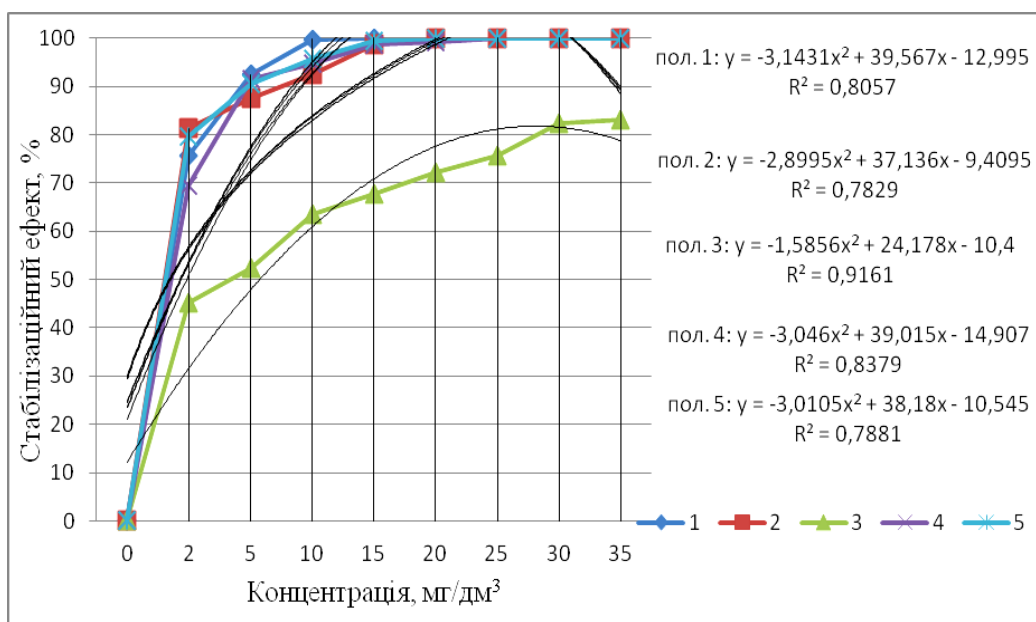


Рисунок 5 – Графіки залежності стабілізаційного ефекту від концентрації інгібітору осадковідкладень в артезіанській воді при нагріванні протягом 6 годин при температурі  $95^{\circ}\text{C}$  при використанні ОЕДФК (1), НТМФК (2), ДМФК (3), ДМСФН (4), НОЕДМФК (5)

При використанні інгібіторів для стабілізації модельного розчину ( $\text{Ca}^{2+}$   $180,2 \text{ мг/дм}^3$ , мінералізація  $94585,0 \text{ мг/дм}^3$ ), в якому мінералізація сягала  $\sim 25 \text{ г/дм}^3$ , а жорсткість сягала  $39,1 \text{ мг-екв/дм}^3$ , концентрація кальцію –  $21 \text{ мг-екв/дм}^3$ , ефективність інгібіторів була досить високою. Це пов'язано з тим, що в основному при нагріванні розчину без інгібіторів в осад випадав лише карбонат кальцію. Не дивлячись на високу концентрацію іонів кальцію в іншому розчині ( $180 \text{ мг-екв/дм}^3$ ), вміст сульфатів був заниженим ( $17,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ ) для того, щоб відбувалося виділення осаду гіпсу (рис. 6).

Зміна жорсткості в даному випадку була на рівні  $4,2 \text{ мг-екв/дм}^3$  при початковій гідрокарбонатній лужності  $5,6 \text{ мг-екв/дм}^3$ . Тому ефективність фосфонатних та фосфінатних інгібіторів була досить високою.

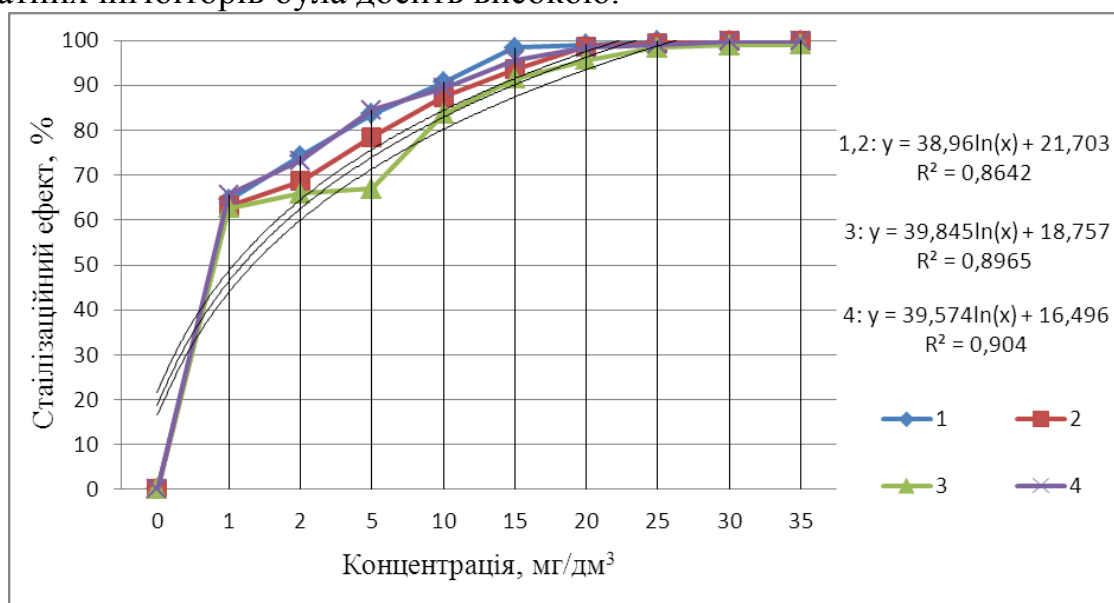


Рисунок – 6 Графіки залежності стабілізаційного ефекту інгібіторів: ОЕДФК (1), НТМФК (2), ДМСФН (3), НОЕДМФК (4) при нагріванні в модельному розчині

(концентрація  $\text{Ca}^{2+}$  180,4 мг/дм<sup>3</sup>, вміст сульфатів, 841,0 мг/дм<sup>3</sup>, жорсткість загальна 241,2 мг-екв/дм<sup>3</sup>) протягом 6 годин при температурі 95<sup>0</sup>С

Вже при концентрації інгібіторів 1 мг/дм<sup>3</sup> стабілізаційний ефект сягав 45 – 59%. При 5 мг/дм<sup>3</sup> стабілізаційний ефект для всіх інгібіторів перевищував 80%. У модельних розчинах, що характеризувались високими концентраціями сульфатів – відповідно 166 та 350 мг-екв/дм<sup>3</sup> при концентрації кальцію відповідно 180 та 190 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Ефективність інгібіторів була низькою при невисоких їх концентраціях, проте вона зростала при підвищенні концентрації інгібіторів.

ОЕДФК та ДМСФН в модельному розчині забезпечували стабілізаційний ефект понад 90% при їх концентраціях вищих 30 мг/дм<sup>3</sup>, а нітрилфосфонові кислоти при концентраціях більше 20 мг/дм<sup>3</sup>. Дещо вищою була ефективність нітрилфосфонових кислот. Це пов'язано з тим, що дані сполуки мають специфічну структуру, що забезпечує ефективне їх комплексоутворення із кальцієм в сполуках сульфату кальцію. Із приведених результатів видно, що розроблені інгібітори, поряд з відомими інгібіторами забезпечують ефективну стабілізацію мінералізованих підтоварних вод нафти, що утворюються в процесі нафтовидобування, по відношенню до осадковідкладення.

Відомо, що розглянуті вище інгібітори осадковідкладення на основі фосфонових та фосфінових кислот, так само як і поліфосфати та ортофосфати є ефективними інгібіторами корозії сталі пасиваційного типу. Як інгібітори пасиваційного типу в даній роботі були використані відомі та розроблені нами стабілізатори накипоутворення, такі як ОЕДФК, НТМФК, ДМСФН та НОЕДМФК. Оцінка ефективності ОЕДФК (10 мг/дм<sup>3</sup>) в присутності іонів цинку (5 10 мг/дм<sup>3</sup>) як інгібітора корозії сталі в різних водних середовищах при температурі 25<sup>0</sup>С показала, що інгібітор надійно захищає сталь Ст20 та Ст3 у водопровідній та артезіанській воді. Менш виражений інгібуючий ефект був для міді та латуні. В усіх інших середовищах, мінералізація яких була більше 25 г/дм<sup>3</sup> ефекту зниження швидкості корозії не було відмічено. Головна причина в тому, що хлориди та сульфати руйнують захисну пасиваційну плівку. Ефективність інших фосфонатних та фосфінатних інгібіторів була оцінена на прикладі корозії сталі Ст20. У мінералізованому розчині (модельний розчин, що містить  $\text{Ca}^{2+}$  180,2 мг/дм<sup>3</sup>, мінералізація 94585,0 мг/дм<sup>3</sup>), жодний із інгібіторів не забезпечив зниження корозії сталі. Очевидно, що за високих концентрацій хлоридів та сульфатів формування пасиваційної кисневої плівки неможливе.

У мінералізованих водах кращими є інгібітори адсорбційного типу, які здатні тонкою плівкою сорбуватись на поверхні металу, суттєво знижуючи швидкість окислення металу при взаємодії із водою.

Для захисту металів у водно-нафтових сумішах частіше за все використовують інгібітори на основі алкілімідазолінів, суміші алкілімідазолінів з алкілпірідінієвими та/або четвертинними амонійними сполуками розчинними в середовищі метанолу. До них відносяться інгібітори «Корр Мастер 1045» (ТУ 2458 – 003 – 50622652 – 2002), «АКМА» (ТУ 2415 – 005 – 39174041 – 2002), «JN – ЕСО168» (ТУ У24.5 – 34841217 – 002:2008). Головним недоліком даних інгібіторів є високі ціни при відносно значних їх витратах.

Для отримання екологічно та економічно прийнятних інгібіторів нами проведено синтез алкілімідазолінів з використанням соняшникової олії та диетилентриаміну і етилендіаміну. Про проходження реакції з отриманням імідазоліну судили по сигналах в ПМР спектрі в області 3,2 – 3,7 м.д.

Диетилентриамін дорожчий за етилендіамін й витрата етилендіаміну на отримання 1 кг імідазоліну на 30% менша, тому проведено синтез з використанням етилендіаміну. Вихід продукту був кількісним.

В подальших дослідженнях визначали ефективність інгібіторів, синтезованих при конденсації олії з диетилентриаміном (АС-1) та етилендіаміном (АС-2).

Як видно з рис. 7 дані інгібітори були досить ефективними у водно-нафтовій суміші із об'ємним вмістом нафти 80%. За відсутності кислоти у суміші навіть при 80°C швидкість корозії сталі Ст20 була відносно невеликою і сягала 0,3191 мм/рік. Інгібітори використовували в дозах від 5 до 50 мг/дм<sup>3</sup>. Уже при концентрації інгібітору АС-1 ступінь захисту від корозії сягав 68%, а при 50 мг/дм<sup>3</sup> -94%. При використанні інгібітору АС-2 ступінь захисту сягав 88% при дозі 5 мг/дм<sup>3</sup>. При 25 мг/дм<sup>3</sup> ступінь захисту перевищував 90%.

Високою була ефективність даних інгібіторів і при співвідношенні об'ємів нафти та води у суміші як 2:8.

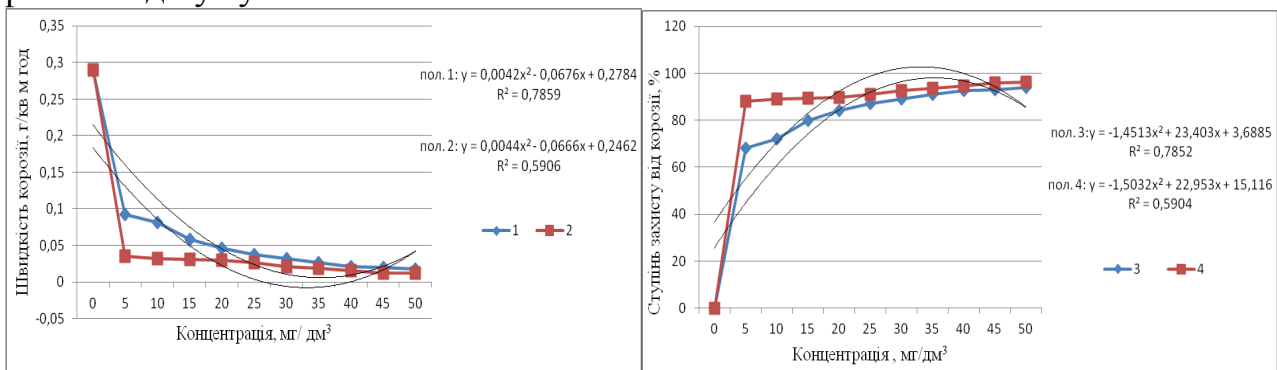


Рисунок – 7 Графіки зміни швидкості корозії сталі Ст20 (1; 2), ступеню захисту її від корозії (3; 4) при підвищенні концентрації інгібіторів АС-1 (1; 3) та АС-2 (2; 4) при 80°C в середовищі водно-нафтової суміші, що містить в 1 дм<sup>3</sup> 200 см<sup>3</sup> 3%-го розчину NaCl, та 800 см<sup>3</sup> нафти

При температурі 80°C ступінь захисту від корозії сталі Ст20 при дозі інгібітора 5 мг/дм<sup>3</sup> сягав 66 – 68% (рис. 8), а при 50 мг/дм<sup>3</sup> ступінь захисту для обох інгібіторів переважав 90%.

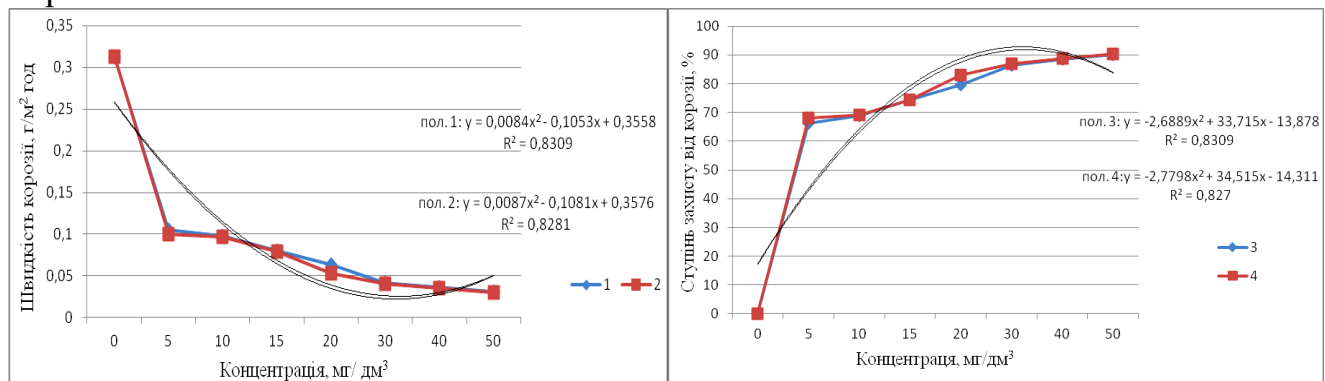


Рисунок 8 – Графіки залежності швидкості корозії сталі Ст20 (1; 2), ступеню її захисту від корозії (3; 4) від концентрації інгібіторів АС-1 (1; 3) та АС-2 (3; 4) при

80<sup>0</sup>С у водно-нафтовій суміші, що містила в 1 дм<sup>3</sup> 800 см<sup>3</sup> 3% розчину NaCl та 200 см<sup>3</sup> нафти

Дещо нижчою була ефективність даних інгібіторів в середовищі, яке складалось на 95% із розчину 3%-го хлориду натрію і 5% нафти (рис. 9).

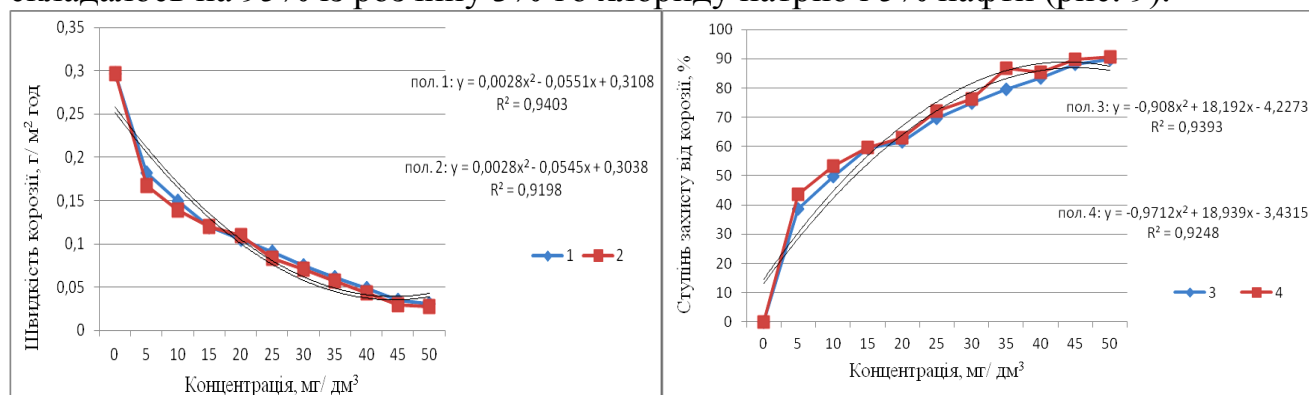


Рисунок 9 – Графіки залежності швидкості корозії сталі Ст20 (1; 2), ступеню захисту її від корозії (3; 4) від концентрації інгібіторів АС-1 (1; 3) та АС-2 (2; 4) в середовищі водно-нафтової суміші (950 см<sup>3</sup> 3% розчину NaCl, 50 см<sup>3</sup> нафти) при 80<sup>0</sup>С)

В цьому випадку при концентрації інгібітору 5 мг/дм<sup>3</sup> ступінь захисту сталі Ст20 від корозії для інгібітору АС-1 склав 38,6%, а для АС-2 – 43,6%. При концентрації 50 мг/дм<sup>3</sup> ступінь захисту сталі від корозії сягав 90%.

При подальших дослідженнях визначали ефективність даних реагентів у середовищах, що містять оцтову кислоту. Так у суміші, що містила 200 см<sup>3</sup> 3% розчину хлориду натрію та 800 см<sup>3</sup> нафти при концентрації оцтової кислоти відповідно - 0,5 та 3 г/дм<sup>3</sup> при температурі 80<sup>0</sup>С ефективність інгібіторів була досить високою. При концентрації оцтової кислоти 0,5 дм<sup>3</sup> при концентрації інгібіторів 10 мг/дм<sup>3</sup> досягнуто ступеню захисту сталі від корозії на рівні 56 – 57% (рис. 10).

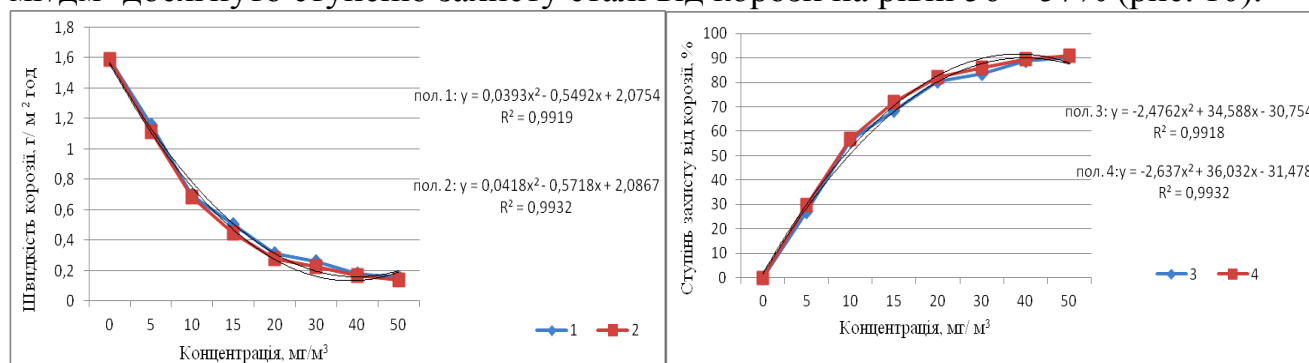


Рисунок 10 – Графіки залежності швидкості корозії сталі Ст20 (1; 2) та ступеню захисту від корозії (3; 4) від концентрацій суміші (200 см<sup>3</sup> 3% розчину хлориду натрію, 800 см<sup>3</sup> нафти, 0,5 г СН<sub>3</sub>С(О)ОН)

При концентрації інгібіторів на рівні 50 мг/дм<sup>3</sup> ступінь захисту сягав 90 – 91%. Високі результати отримано і при використанні інгібіторів АС-1 та АС-2 у суміші води та нафти, що містила 3 г/дм<sup>3</sup> оцтової кислоти (рисунок 11). При концентраціях інгібіторів 10 – 50 мг/дм<sup>3</sup> ступінь захисту від корозії сталі Ст20 сягав 64 – 92%.

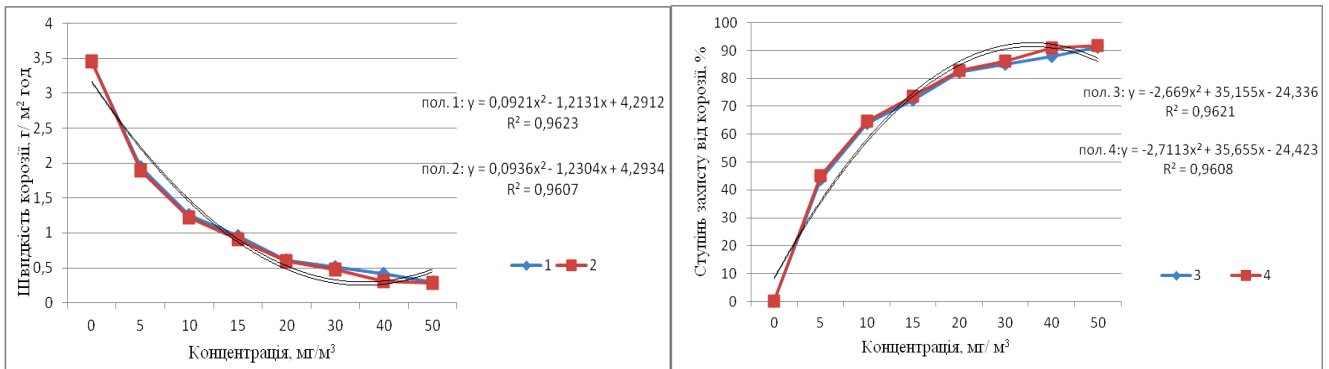


Рисунок 11 – Графіки залежності швидкості корозії сталі Ст20 (1; 2) та ступеню захисту від корозії (3; 4) від концентрації інгібіторів АС-1 (1; 3) та АС-2 (3; 4) при температурі 80<sup>0</sup>С у водно-нафтовій суміші (200 см<sup>3</sup> 3% розчину хлориду натрію, 800 см<sup>3</sup> нафти, 3 г СН<sub>3</sub>С(О)ОН)

Таким чином, синтезовані інгібітори на основі олії та поліетиленполіамінів, які містять імідазоліни, отримані шляхом безвідхідних технологій, за якістю не поступаються кращим відомим інгібіторам корозії сталі у водно-нафтових сумішах. Вони є перспективними, екологічно та економічно прийнятними при захисті нафтопроводів від внутрішньої корозії.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили вирішити п'яту, шосту та сьому задачі дослідження в роботі.

**В п'ятому розділі** розв'язане завдання моделювання електрохімічної корозії сталі нафтопроводу в тріщині ізоляційного покриття при дії агресивного по відношенню до металу трубопроводу електролітичного середовища, яке зводиться до визначення стаціонарного електричного поля, що виникає при роботі гальванопари з анодом на металі нафтопроводу в тріщині й катодом на металі трубопроводу під ізоляційним покриттям.

Розглянуто електричне поле біля гетерогенного електроду, модель якого складається із 2-х ділянок довільної ширини, котрі відрізняються стаціонарними потенціалами.

Локальний корозійний елемент представлений ділянкою трубопроводу під ізоляційним покриттям (катод) і ділянкою трубопроводу в тріщині під електролітом (анод) (рис. 12).

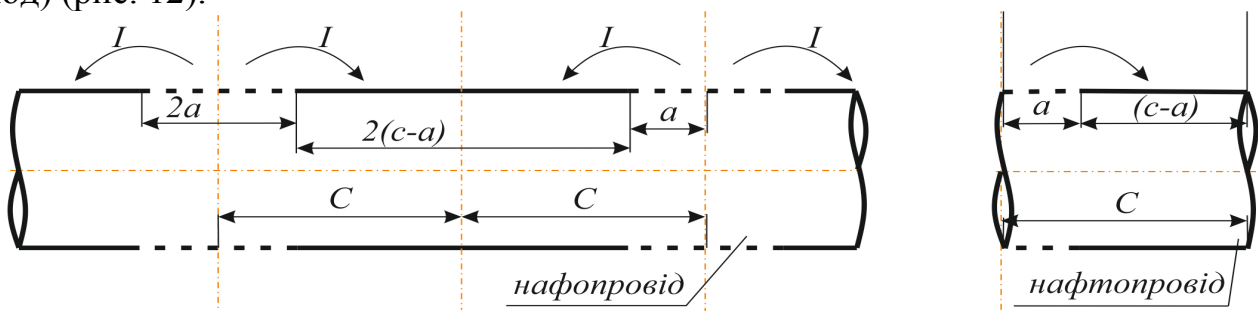


Рисунок 12 – Схема локального корозійного елементу на трубопроводі в ізоляційному покритті з тріщиною,  $c$  – відстань між серединами ділянок;  $2a$  – ширина анодної ділянки;  $2(c - a)$  – ширина катодної ділянки



Визначення розподілу потенціалу електричного поля у даному випадку може бути зведено до вирішення двохмірного рівняння Лапласа із заданими граничними умовами. Рішення якого може бути отримано методом Ейлера-Фур'є:

$$\begin{aligned}\phi(x, y) &= \frac{a(E_a - E_K) + cE_K}{c} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2(E_a - E_K)}{\pi k \left(1 + \frac{\pi k}{c} L\right)} \sin \frac{\pi k}{c} a \cos \frac{\pi k}{c} x e^{-\frac{\pi k}{c} y} = \\ &= \frac{a(E_a - E_K) + cE_K}{c} + \frac{2(E_a - E_K)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi k}{c} a}{\left(1 + \frac{\pi k}{c} L\right) k} \cos \frac{\pi k}{c} x e^{-\frac{\pi k}{c} y}.\end{aligned}\quad (2)$$

Враховуючи, що  $i = -\gamma \left( \frac{d\phi}{dy} \right)_{y=0}$  із (2) отримано вираз для визначення розподілу щільності струму на поверхні одного локального елемента.

$$i(x) = \frac{2(E_a - E_k) \gamma}{c} \sum_{k=1}^{\infty} k \frac{\sin \frac{\pi k a}{c} \cos \frac{\pi k x}{c}}{k \left(1 + \frac{\pi k l}{c}\right)}.\quad (3)$$

де:  $E_a, E_k$  – безструмові (стаціонарні) потенціали анодної та катодної ділянок;  
 $\gamma$  – питома електропровідність корозійного електролітичного середовища;  
 $b$  – коефіцієнт поляризації сталі нафтопроводу в даному середовищі;  
 $a$  – половина ширини анодної ділянки;  
 $c$  – відстань між центрами анодної та катодної ділянок;  
 $L = \gamma \cdot b$  – характеристика поляризації.

Щільність струму на поверхні локального елемента змінюється по довжині. Інтегруючи вираз від 0 до  $a$ , знайдемо анодний струм одного елемента

Проведені теоретичні дослідження щодо визначення впливу параметрів даної моделі на струм гальванопари та швидкість корозії сталі трубопроводу. Побудовано номограми для експрес визначення сили струму гальванічного елемента нафтопроводу при локальному пошкодженні ізоляційного покриття в різних типах ґрунтів.

Характерною особливістю підземної корозії трубопроводів є можливість доступу кисню до їхньої поверхні. Для визначення значення щільності струму при кисневій деполаризації розглянуто переріз трубопроводу діаметром  $2r$ , який знаходиться на глибині  $h$  в ґрунті з постійною концентрацією кисню  $C_n$ .

Якщо на електроді справедливі умови дифузної кінетики, то в стаціонарному стані щільність струму може бути виражена через швидкість дифузії деполаризатора, віднесеної до одиниці площі поверхні електрода. В цьому випадку справедливим є перший закон Фіка згідно з яким потік кисню ( $q$ ) в умовах лінійної дифузії буде дорівнювати:

$$q = -D \left( \frac{\partial C}{\partial \rho} \right)_{y=0}\quad (4)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії кисню в ґрунті,  $m^2/рік$ ;

$\frac{\partial C}{\partial \rho}$  – градієнт концентрації кисню поблизу поверхні нафтопроводу.

За розрахованою щільністю потоку кисню ( $q$ ) може бути визначений розподіл щільності струму навколо перерізу трубопроводу:

$$i = \frac{F \times q}{M_k} \quad (5)$$

В кінцевому вигляді отримана залежність:

$$i = \frac{1,91 \times 10^{-4} \times C_i \times D \times (a^2 - 1)}{r(1 + a^2 - 2a \times \cos \theta) \ln a} \quad (6)$$

де  $i$  – щільність струму, А/м<sup>2</sup>;

$F$  – число Фарадея,  $F = 96485$  А·с/моль;

$C_H$  – початкова концентрація кисню, г/м<sup>3</sup>;

$M_k$  – молярна маса кисню,  $M_k = 15,9994$  г/моль;

$\theta$  – кут, під яким надходить деполяризатор (кисень) до нафтопроводу;

$a$  – коефіцієнт, що залежить від радіуса нафтопроводу та глибини закладання.

Результати досліджень дозволили вирішити восьму та дев'яту задачі дисертаційних досліджень.

У **6 розділі** отримана залежність для розрахунку глибини корозії на основі математичної моделі локальної електрохімічної корозії сталі трубопроводу в тріщині ізоляційного покриття

$$h = \frac{12KI}{\pi \times D \times a^2} t \quad (7)$$

де  $K$  – електрохімічний коефіцієнт металу, г/А·год;

$I$  – струму, який проходить через площу поперечного перерізу поверхні виразки, А/см<sup>2</sup>;

$D$  – питома вага металу трубопроводу (заліза), г/см<sup>3</sup>;

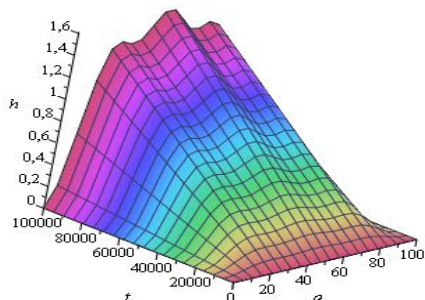
$a$  – діаметр корозійної виразки, мм;

$t$  – тривалість часу, год;

Основними параметрами, які впливають на глибину корозійного пошкодження ділянки нафтопроводу, є розміри анодно-катодних ділянок та характеристики перебігу електрохімічної корозії.

Результати дослідження залежності глибини корозії від часу та розмірів анодної ділянки наведені на рис. 13.

а)



б)

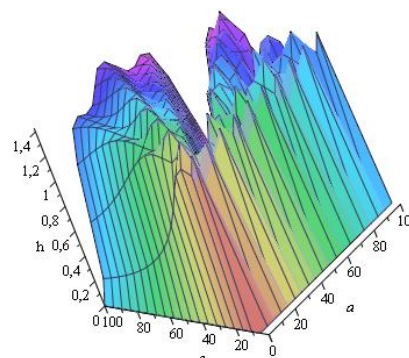


Рисунок 13 – Поверхня відгуку глибини корозії від часу (а) та розмірів (б) анодної ділянки

Залишкова товщина стінки нафтопроводу визначається як

$$\Delta\delta = \delta - h, \quad (8)$$

де  $\delta$  – номінальна товщина стінки ділянки нафтопроводу, мм.

Для експериментальної перевірки запропонованої методики розрахунку глибини корозії стінки ділянки трубопроводу при роботі гальванопари в ґрунтових умовах проведено дослідження на малих зразках сталі марки.

Для проведення експерименту було заготовлено 10 елементів-зразків сталевих циліндрів марки Ст 20 товщиною 1 та 6 мм (T1-T10). Сталеві зразки заізольовані мають випуски із одного боку, вони моделювали трубопровід у тріщині ізоляційного покриття. Зразки товщиною 6 мм мають випуски на поверхню із припаяного ізольованого холоднотянутого дроту. Перед ізоляцією зразки було очищено і зважено на аналітичних вагах. Для дослідження корозійних втрат сталі при роботі макрогальванопар в процесі експерименту було створено пристосування, котре складалося з пластикової ємності, заповненої агресивною рідиною, і напівзанурених у рідину підготовлених зразків. В якості агресивного середовища для прискорення корозії вибрано 3%-ий розчин NaCl. Кожний зразок занурюється в розчин на половину товщини з розрахунку, щоб оголені випуски зразків знаходилися в агресивному розчині. Неповне занурення дослідних зразків дозволяє створити на трубі гальванопару диференціальної аерації із анодами на оголених випусках зразків і катодами на ділянках труби в ізоляції, що відображає реальні умови при зволоженні сталі нафтопроводу в тріщині ізоляційного покриття.

В процесі експерименту періодично проводилися заміри стаціонарних потенціалів сталевих зразків на анодних і катодних ділянках. В якості електродів порівняння використаний мідно-сульфатний та хлор-срібний електроди.

Після чого визначали ваговий показник корозії, швидкість корозії в струмових показниках визначалась за формулою (3) та глибинний показник корозії. Результати порівняння наведено на рис. 14.

За отриманими значеннями струму електрохімічної корозії за ваговими показниками та запропонованою математичною моделлю розраховані відповідні глибини корозійних пошкоджень. Результати розрахунків наведено на рис. 15.

$I, A \times 10^{-4}$

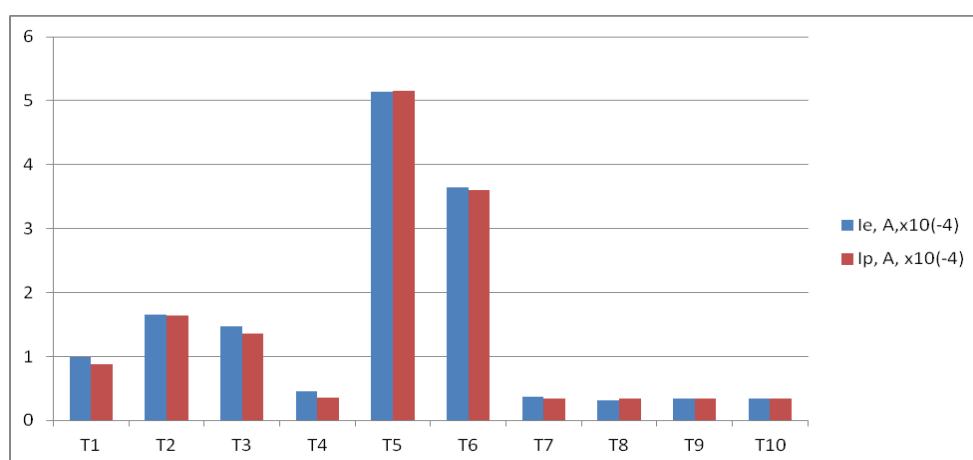


Рисунок 14 – Порівняльна діаграма значень струму електрохімічної корозії за ваговими показниками та запропонованою математичною моделлю локальної електрохімічної корозії ділянки сталевих нафтопроводу

$h, мм$

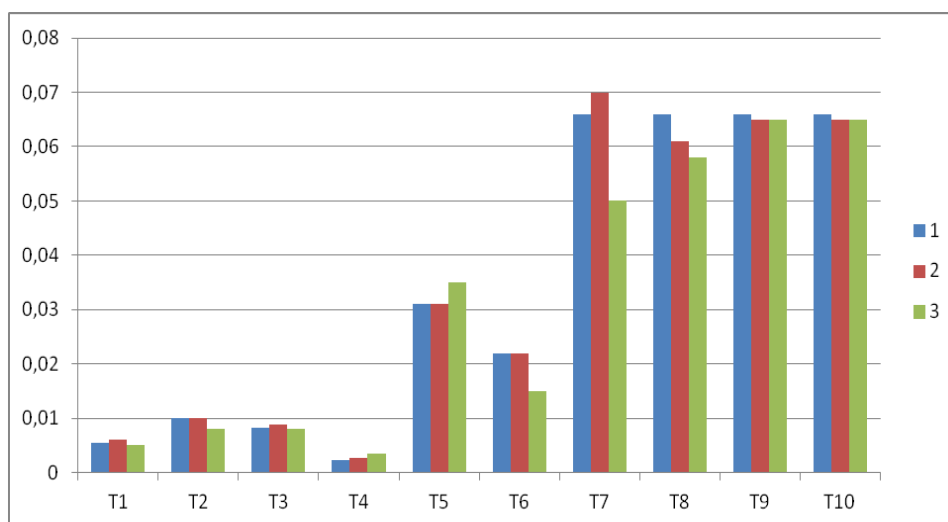


Рисунок 15 – Порівняльна діаграма глибини корозії ділянки нафтопроводу в тріщині ізоляційного покриття за:

- 1- за розрахунковим значенням струму;
- 2- за ваговими показниками;
- 3- за безпосередніми замірами.

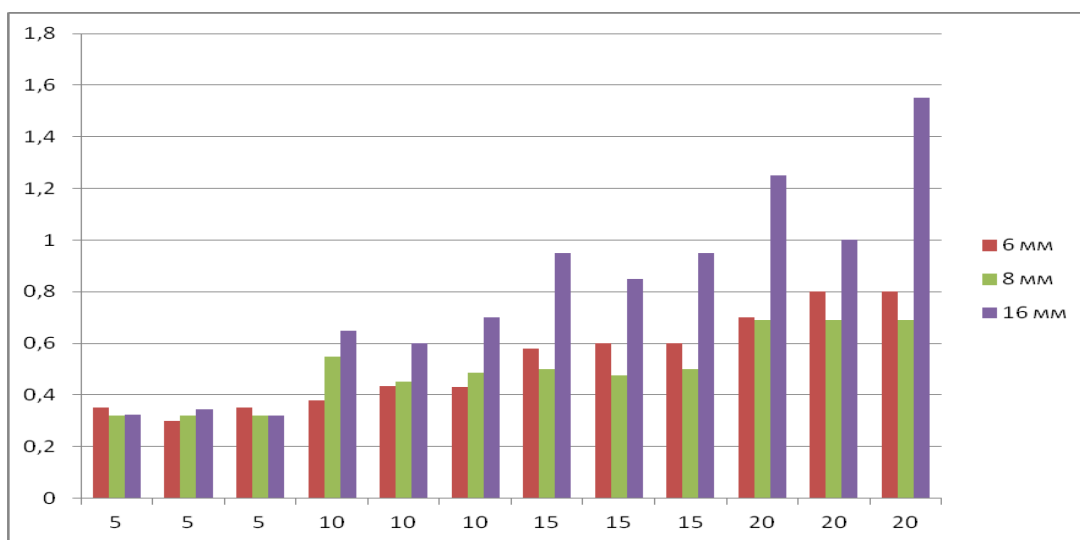
Другим етапом експериментальних досліджень було визначення впливу ширини ділянки уражень на глибину ураження.

Для досліджень використані фрагменти-зразки сталі марки Ст 20 товщиною 6, 8, 16 мм. Повна довжина сталевих зразків складала 350 мм. Всього було підготовлено 36 сталевих зразків. Локальні корозійні ураження на зразках були утворені шляхом травлення струмом. Зразки було покрито лакофарбовим покриттям, а місця, що підлягають корозії, були оголені посередині від фарби на ширину 5; 10; 15 і 20 мм. Оголені ділянки імітували довжину ділянки трубопроводу в зоні пошкодженої ізоляції, що підлягає ураженню. На кожен ширину ділянок виготовлено по три однакові зразки і три зразки без уражень.

В якості агресивного середовища для прискорення корозії вибрано 3%-ий розчин NaCl, який є стандартним електролітом при електрохімічних дослідженнях корозії металів. Кожний зразок було занурено в ємність з агресивним середовищем (3% розчин NaCl).

З метою прискорення процесу локальної корозії сталеві зразки включались в електричний ланцюг, у якому анодом виступала оголена ділянка зразка, а катодом – смуга з нержавіючої сталі, що огинала на відстані оголені місця на зразках. Струм пропускали від потенціостата ПИ 50-1, котрий працював у режимі «гальваностат». Час травлення складав 1 годину. Для отримання різних співвідношень між шириною і глибиною уражень сила струму змінювалася в межах 0,03 – 0,8 А, а щільність струму – в межах 0,23 – 0,49 А\см<sup>2</sup>.

Основною характеристикою, що впливає на залишковий ресурс трубопроводу, є втрата товщини стінки трубопроводу у місцях локальних уражень, яка суттєво залежить від розмірів ділянки з пошкодженою ізоляцією (рис. 16).



a, мм

Рисунок 16 – Діаграма впливу ширини анодної ділянки на глибину корозії залежно від товщини сталевих зразків

При збільшенні розмірів анодних ділянок від 5 до 20 мм спостерігається збільшення глибини корозії стінки нафтопроводу на цій ділянці. Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили вирішити десяту та одинадцяту задачі дослідження в роботі.

**В сьомому розділі** розроблена методика визначення залишкового ресурсу нафтопроводу за фактором корозії сталі в тріщині ізоляційного покриття, яка виконується шляхом врахування зменшення товщини стінки нафтопроводу, що вводиться в розрахунок. Допустима залишкова товщина стінки нафтопроводу відповідає повному вичерпанню ресурсу конструкції.

Товщина стінки трубопроводу є визначальним параметром, що характеризує його міцність. Кожна труба повинна розраховуватись на міцність, для чого їй необхідно знати фактичну товщину стінки з врахуванням робочого тиску і гранично допустиму товщину стінки при якій не виникне аварійний вилів нафти або нафтопродуктів.

Перевірка міцності нафтопроводу здійснюється за відомим методом граничних станів. Розглядається такий напружений стан нафтопроводу, при якому його подальша експлуатація неможлива. Характеристикою несучої здатності трубопроводів є тимчасовий опір металу труб, або межа міцності.

За відмову трубопроводу за несучою здатністю прийнятий стан, коли напруження від розрахункових навантажень і впливів на досліджуваній ділянці в тріщині, що залишилася після корозії, перевищить межу плинності трубної сталі:

$$\sigma > R \quad (9)$$

де  $\sigma$  – поздовжнє осьове напруження від розрахункових навантажень і впливів, МПа;

$R_s$  – розрахунковий опір матеріалу труби (межа плинності).

Міцність трубопроводу забезпечується шляхом розрахунку напружень, що виникають у ньому в процесі експлуатації та порівняння їх з опором матеріалу труби  $R$ . При визначенні напруженого стану трубопроводу для перевірки першого граничного стану враховуються напруження, які впливають на руйнівний тиск.

Перевірку на міцність підземних трубопроводів з метою виключення недопустимих деформацій виконують виходячи із умов згідно СНіП

$$[\sigma_{npN}] \leq \phi_2 R_1, \quad (10)$$

$$\sigma_{кц} \leq \frac{m}{0,9k_n} R_2^n \quad (11)$$

де  $[\sigma_{npN}]$  – поздовжнє осьове напруження від розрахункових навантажень та впливів, МПа;

$\phi_2$  – коефіцієнт, що враховує двоосний напружений стан металу труби (при розтягуючи напруженнях приймається рівним 1);

$R_1, R_2$  – розрахункові опори розтягу (стиску), МПа.

$$R_1 = \frac{R_1^n m}{k_1 k_n}, \quad R_2 = \frac{R_2^n m}{k_2 k_n}, \quad (12)$$

$m$  – коефіцієнт умов роботи нафтопроводу;

$k_1, k_2$  – коефіцієнти надійності за матеріалом трубопроводу;

$k_n$  – коефіцієнт надійності за призначенням нафтопроводу.

Поздовжні осьові напруження визначаються із розрахункових навантажень та впливів з врахуванням пружньопластичної роботи сталі. Для прямолінійних ділянок підземних трубопроводів при відсутності поздовжніх та поперечних переміщень та просадок ґрунту поздовжні осьові напруження від впливу внутрішнього тиску, температурного перепаду і пружного згину, МПа, визначаються за формулою

$$\sigma_{npN} = \frac{0,15 p D_{вн}}{\delta} - \alpha E \Delta t \pm \frac{E D_{зовн}}{2\rho}, \quad (13)$$

де  $p$  – робочий тиск, МПа;

$D_{вн}$  – внутрішній діаметр ділянки нафтопроводу, см;

$$\sigma_{кц} = \frac{p D_{вн}}{2\delta}. \quad (14)$$

$\delta$  – номінальна товщина стінки ділянки нафтопроводу, см;

$\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення металу труб, град<sup>-1</sup>;

$E$  – змінний модуль пружності матеріалу труби, МПа;

$\Delta t$  – розрахунковий температурний перепад, °С;

$\rho$  – мінімальний радіус пружного вигину осі трубопроводу, см.

Різниця між граничною несучою здатністю на момент обстеження і розрахунковим зусиллям, що діє на конструкцію під час експлуатації, створює запас за несучою здатністю, який може бути врахований при розрахунках залишкового ресурсу конструкції з ураженою корозією ділянки трубопроводу в тріщинах ізоляційного покриття.

Розрахунок дійсних напружень, що виникають в трубопроводі на момент обстеження виконують шляхом врахування зменшення товщини стінки нафтопроводу, що вводиться в розрахунок.

Для забезпечення міцності рівень кільцевого напруження в нафтопроводі, що має корозійні ураження, має відповідати умові

$$\frac{p(D_{\text{вн}} + 2h)}{2(\delta - h)} \leq [\sigma_{\text{кц}}] \quad (15)$$

де:  $h$  – глибина корозії ділянки трубопроводу, мм;

$p$  – робочий тиск на ділянці нафтопроводу, МПа;

$D_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр труби, мм;

$[\sigma_{\text{кц}}]$  – допустиме кільцеве напруження.

Допустима глибина корозії стінки труби  $[h]$  розраховується за формулою

$$[h] = \delta - \frac{pD_3}{2([\sigma_{\text{кц}}] + p)} \quad (16)$$

де  $D_3$  – зовнішній діаметр трубопроводу, мм.

Так як для труб  $\delta \ll D$ , формулу (16) можна застосовувати для випадків внутрішньої та зовнішньої корозії. Формула (16) може бути записана так:

$$[\varepsilon] = \left(1 - \frac{p \times D_3}{2\delta([\sigma_{\text{кц}}] + p)}\right) 100\% \quad (17)$$

де  $[\varepsilon] = \frac{[h]}{\delta}$  – допустиме відносне стоншення стінки нафтопроводу.

Визначення залишкового ресурсу конструкцій – це комплекс робіт, які починаються із оперативної функціональної діагностики, поточного розрахунку міцності і закінчуються розрахунками безпечної роботи конструкції від моменту її технічного діагностування, до переходу в граничний стан.

Визначення залишкового ресурсу нафтопроводу за фактором корозії сталі в тріщині ізоляційного покриття виконується шляхом врахування зменшення товщини стінки нафтопроводу, що вводиться в розрахунок.

Залишковий ресурс нафтопроводу доцільно визначити із залежності (7), отримаємо тривалість часу до утворення першої виразки  $t$ , знаючи загальну тривалість експлуатації нафтопроводу  $t_e$  можна оцінити залишковий ресурс ділянки нафтопроводу.

$$t = \frac{0,08 \times h \times \pi \times D \times a^2}{K \times I}, \quad (18)$$

де  $I = \frac{2\gamma(E_a - E_k)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{k\pi a}{c}}{k(1 + \frac{\pi k L}{c})}$  – струм електрохімічної корозії, А;

$D$  – питома вага металу трубопроводу, г/см<sup>3</sup>.

$$T = t - t_g \quad (19)$$

де  $t$  – тривалість до першого витoku нафти, років;

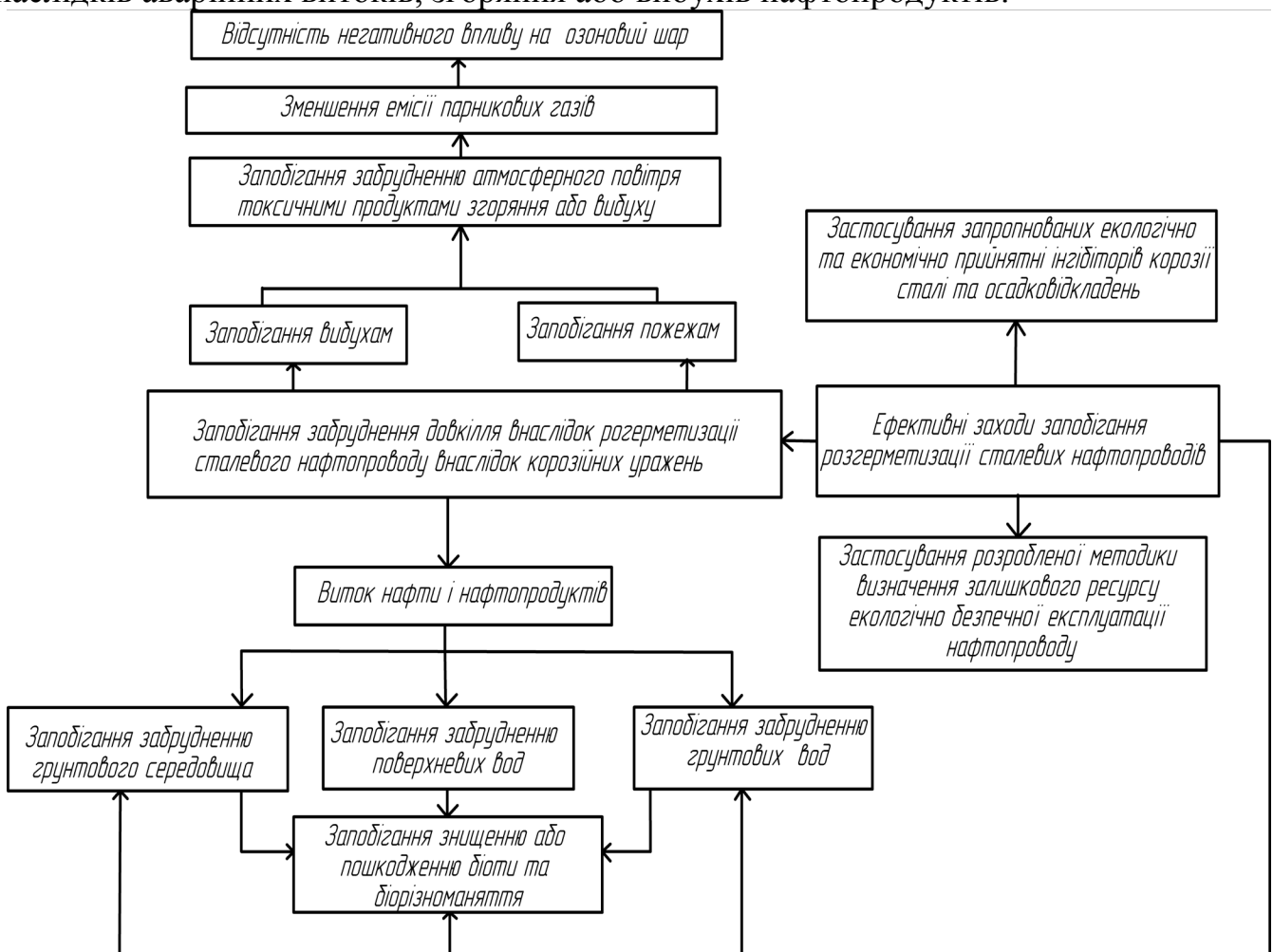
$t_g$  – тривалість знаходження трубопроводу в даних умовах, років.

Крім того, маючи значення допустимого розміру ураженої ділянки нафтопроводу і знаючи швидкість корозійного процесу можна визначити залишковий ресурс нафтопроводу

$$T = \frac{[h]}{i} - t_g \quad (20)$$

де  $[h]$  – допустима глибина корозії ділянки нафтопроводу, мм;  
 $i$  – швидкість корозії на досліджуваній ділянці нафтопроводу, мм/рік.

Таким чином, застосування запропонованих екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії металів та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу безпечної експлуатації нафтопроводів унеможливить забруднення довкілля нафтопродуктами, продуктами їх згоряння або вибуху внаслідок процесів внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів. На рисунку 17 наведено запропоноване за результатами узагальнення схематичне зображення впливу екологічно прийнятних інгібіторів корозії металів і осадковідкладень та запропонованої методики визначення залишкового ресурсу нафтопроводів на запобігання негативного впливу на довкілля наслідків аварійних витоків, згоряння або вибухів нафтопродуктів.



Рисунку 17 – Схематичне зображення впливу екологічно прийнятних інгібіторів корозії металів і осадковідкладень та запропонованої методики визначення залишкового ресурсу нафтопроводів на запобігання негативного впливу на довкілля наслідків аварійних витоків, згоряння або вибухів нафтопродуктів

В розділі наведено рекомендації по визначенню корозійного стану нафтопроводу та отримання спеціальних даних для розрахунку його корозії.



## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі, яка є завершеною кваліфікаційною самостійно виконаною науковою працею, наведено розв'язання актуальної наукової проблеми створення наукових основ запобігання забрудненню довкілля внаслідок процесів внутрішньої чи зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації зазначених нафтопроводів. Основні результати досліджень наведено нижче.

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

2. Висунуто ідею роботи, яка полягала у запобіганні забрудненню довкілля нафтопродуктами, продуктами їх згоряння або вибуху внаслідок процесів внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадко відкладень, а також застосування науково обґрунтованої методики оцінювання залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації зазначених об'єктів.

3. Запропоновано методологію та обґрунтовано методики проведення досліджень, які передбачали застосування як теоретичних так і експериментальних методів, зокрема методи дисперсійного та кореляційно-регресійного аналізу; індикаційні методи; метод математичного моделювання; гравіметричний метод; хімічні та фізико-хімічні та методи ЯМР спектроскопії тощо .

4. Розраховано ймовірність виникнення екологічної загрози внаслідок прояву корозійних процесів на сталевих нафтопроводах і визначено її значення, яке складає одну аварію за 10 місяців. Проведено розрахунки можливого аварійного витоку нафти для трьох характерних розмірів дефектних уражень на лінійній частині магістрального нафтопроводу Глинсько-Розбишевське-Кременчук та визначено потенційні загрози довкіллю.

5. Виявлено вплив агресивних розчинів ґрунтового середовища на ділянки пошкоджень ізоляційних покриттів сталевих нафтопроводів, а також на протікання корозійних процесів, побудовано карти ґрунтів за показниками їх корозійної активності на прикладі Полтавської області. Встановлено, що за своїми властивостями ґрунти Полтавської області обумовлюють виникнення та розвиток корозійних процесів на зовнішніх поверхнях нафтопроводів, це значно підвищує ймовірності випадків забруднення довкілля внаслідок розгерметизації сталевих нафтопроводів.

6. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що швидкість корозії нелегованої та нержавіючої сталі, міді, а також латуні підвищується із зростанням ступеня мінералізованості підтоварної води нафти, а швидкість корозії у мінералізованих водах та у сумішах мінералізованої води із

нафтою зростає при підвищенні температури з 30<sup>0</sup> до 80<sup>0</sup>С у діапазоні від 3 до 6 разів. Також встановлено, що у разі присутності карбонових кислот у нафті швидкість корозії сталі Ст20 за 80<sup>0</sup>С зростає від 1,9 до 3,8 мм/рік.

7. Теоретично обґрунтовано хімічний склад та схеми безвідходних процесів синтезу екологічно прийнятних інгібіторів корозії металів АС-1 та АС-2 з умістом рослинної олії відповідно 932 г та 950 г, поліетиленполіамінів (відповідно діетилентріаміну 270 г та етилендіаміну 240г) та 500 см<sup>3</sup> октанолу, а також інгібіторів осадковідкладень з умістом диметилфосфінової кислоти, диметилсульфонатфосфіату натрію, нітрилооксиетилендиметилфосфонової кислоти, які переважають відомі за економічними показниками щонайменше у 1,2 рази.

8. Встановлено, що запропоновані інгібітори осадковідкладень порівняно із відомими інгібіторами за однакових концентрацій забезпечують досягнення значення стабілізаційного ефекту понад 90% у разі наявності в нафтопроводі мінералізованих підтоварних вод нафти за температури до 95<sup>0</sup>С. Також встановлено, що запропоновані інгібітори корозії металів за своїм ефектом якістю не поступаються відомим, але переважають їх за економічними показниками щонайменше у 1,2 рази.

9. Змодельовано процес електрохімічної корозії сталевих труб у тріщинах ізоляційного покриття за впливу агресивних електролітичних розчинів та показано, що основну роль у протіканні корозійних процесів відіграє робота макрогальванічних пар «сталь нафтопроводу в тріщині – сталь нафтопроводу під ізоляційним покриттям». Струм даних гальванопар є показником для розрахунку залишкової товщини стінки у тріщинах задля запобігання аварійному витоку нафти і забруднення довкілля. Розраховано швидкість електрохімічної корозії модельної ділянки нафтопроводу в тріщинах ізоляційного покриття у разі впливу на них агресивних електролітичних розчинів.

10. Змодельовано процес електрохімічної корозії за умов кисневої деполяризації в умовах експлуатації нафтопроводу на основі рівняння дифузії кисню та побудовано номограму для визначення щільності струму при кисневій деполяризації та карту щільностей корозійного струму на ділянках нафтопроводів Полтавської області.

11. Змодельовані процеси покладено в основу методології визначення залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації нафтопроводу, що дозволяє прогнозувати розвиток зовнішніх корозійних процесів сталевих нафтопроводів з часом та запобігати забрудненню довкілля.

12. Розроблено рекомендації та пропозиції щодо застосування запобіжних заходів задля унеможливлення забруднення довкілля внаслідок корозії сталевих нафтопроводів шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу їх експлуатації.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### *Монографії*

1. **Степова О.В.** Підвищення екологічної безпеки нафтогазопроводів /В.О. Онищенко, Ю.Л. Винников, М.Л. Зоценко, С.Ф. Пичугін, М.О. Харченко, **О.В. Степова**, В.М. Савик, П.О. Молчанов, П.Ю. Винников, О.М. Ганошенко //

Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів транспортування нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах. Кол. монографія. Полтава: ФОП Пусан А.Ф. 2018. С. 180–224 *Автору належить розробка концепції підвищення екологічної безпеки нафтогазопроводів*

2. **Stepova O.V.** Environmental problems of non-conventional gas exploration and production in the regions of Ukraine. Monograph. Group of authors. Association agreement: driving integrational changes Accent Graphics Communication. Chicago. Illinois. USA. 2019. P. 60 –71. *Автору належить аналіз екологічних проблем, пов'язаних з видобутком газу в Україні*

3. Bredun V.I., **Stepova O.V.**, Maksiuta N.S. Objective-oriented approach to improving environmental security of production technologies and processing of mining / Modernization and engineering development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: Universitas Publishing, 2019. P.380–393 *Автору належить дослідження використання та розробка інгібіторів корозії металів та осадковідкладень на внутрішній поверхні сталевих нафтопроводів*

**Статті, які входять до наукометричних баз даних та до фахових видань України**

4. **Степова О.В.** Результати випробувань на розтяг локально уражених корозією арматурних стрижнів. *Науковий вісник будівництва*. Вип. 61. Харків: ХНУБА. 2010. С. 99 – 103.

5. **Степова О.В.** Методика розрахунку втрати площі перерізу при корозії арматури в нормальній тріщині балкових залізобетонних конструкцій. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр.* Вип. 21. Рівне: НУВГП. 2011. С. 346 – 352

6. **Степова О.В.** Забезпечення екологічної безпеки експлуатації нафтопроводів за допомогою моніторингу електрохімічних параметрів. *Збірник наукових праць (технічні науки)*. Вип. 1(53). Рівне: НУВГП. 2011. С.201 – 207

7. **Степова О.В.** Техногенна безпека експлуатації магістральних нафтопроводів. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Вип. 2(30). Полтава: ПолтНТУ. 2011. С. 266 – 269

8. **Степова О.В.** Оцінка залишкового ресурсу екологічно безпечної експлуатації магістральних нафтопроводів. *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов*. Вып. 61. Д.: ПГАСА. 2011. С. 419 – 423

9. **Степова О.В.** Оцінка залишкового ресурсу балкових залізобетонних конструкцій за умов корозії багатоеlementної арматури в нормальній тріщині *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Вип.1 (29). Полтава: ПолтНТУ. 2011. С. 110 – 115

10. **Степова О.В.** Врахування електрохімічних параметрів для забезпечення екологічної безпеки експлуатації нафтопроводів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр.* Вип. 22. Рівне: НУВГП. 2011. С.737 – 742.

11. **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

12. **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.
13. **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.
14. **Степова О.В.** Розрахунок швидкості електрохімічної корозії під час роботи повздовжніх макрогальванічних пар на ділянці нафтопроводу. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА, 2019. №(1)24. Т.2 С. 55 – 59.
15. Гомеля М.Д., **Степова О.В.** Оцінка рівня техногенно-екологічної безпеки експлуатації нафтопроводів. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА. 2019. №(2)25. Т.2 С. 12 – 15. *Автору належить аналіз показників, що оцінюють техногенно-екологічний ризик експлуатації нафтопроводів, запропоновано використання параметра потоку відмов, як показника, що оцінює рівень екологічної безпеки*
16. Гомеля М.Д., **Степова О.В.** Оцінка корозійної активності мінералізованих пластових вод нафтових родовищ. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА, 2019. Випуск 3(26). Т.2 С. 5 – 11. *Автору належить проведення експериментальних досліджень щодо визначення залежності корозійної активності води від рівня мінералізації щодо нелегованої сталі, міді, латуні та нержавіючої сталі*
17. Гомеля М.Д., **Степова О.В.**, Камаєв В.С. Розробка інгібіторів осадковідкладень у водах з високою мінералізацією. *Наук. журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. К.:ТНУ. 2019. Том 30(69). №5. Частина 2. С. 55 – 61. *Автору належить проведення та обробка експериментальних досліджень щодо синтезу інгібіторів осадковідкладень на основі продуктів сульфонування диметиллофосфінової кислоти та нітрилоксиетилдиметилфосфонової кислоти*
18. Гомеля М.Д., **Степова О.В.**, Камаєв В.С. Розробка інгібіторів корозії металів у водних середовищах з різним рівнем мінералізації. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Головний редактор О.І. Бондар. К.: ДЕА. 2019. Випуск 4(27). Т.1 С. 21 – 27. *Автору належить розроблення нового методу синтезу алкілімідазолінів на основі олії та поліетиленполіамінів*
19. Stepova O., Paraschienko I. Mathematical modeling of local corrosion element in pipelines at galvanic couple's operation in soil conditions. *Геотехнічна механіка*. 2016. Вип. 127. С. 49 – 55. (**ResearchBib; Open Academic Journals Index (OAJI)**) *Автору належить розроблення математичної моделі локальної електрохімічної корозії на ділянці нафтопроводу*
20. **Stepova O.**, Paraschienko I. Modeling of the corrosion process in steel oil pipelines in order to improve environmental safety. *Eastern-european journal of enterprise technologies, industrial and technology systems*. Vol. 2, no 1 (86) 2017. P. 15 – 20. *Автору належить проведення математичного дослідження моделі локальної електрохімічної корозії на ділянці нафтопроводу*

21. **Е. Stepovaja**, Holik Yu., Fraňa K. Methods for precautionary management of environmental safety at energy enterprises. *Науковий вісник Національного гірничого університету. Науково-технічний журнал №6 (168)*. Дніпропетровськ, 2018. С.173 – 177 **Scopus** Автору належить дослідження управління екологічною безпекою підприємств енергетичної галузі
22. **Stepova O.**, Homenko A., Roma V. Calculation of steel pipeline corrosion depth for various conditions of electrolyte solutions in cracks. *International Journal of Engineering & Technology*. Vol.7. No4.8. 2018. P. 636 – 640 Автору належить розробка методики розрахунку залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів
23. **Stepova O.**, Paraschienko I., Lartseva I. Calculation of steel pipeline corrosion depth at the work of galvanic corrosive element operating. *International Journal of Engineering & Technology*. Vol.7. No3.2. 2018. P. 431 – 435 Автору належить експериментальна перевірка методики розрахунку залишкового ресурсу нафтопроводу при роботі макрогальванічної пари

#### **Публікації в матеріалах конференцій:**

24. **Степова О.В.**, М.А. Листопад Вплив навколишнього середовища на стан конструкцій будівельних споруд. Матеріали III Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Екологія. Довкілля. Молодь». (Полтава, 11 – 12 травня 2011 р.). Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С.43 – 45 Автору належить дослідження та оцінка впливу агресивного навколишнього середовища на корозійні процеси будівельних споруд
25. **Степова О.В.**, В.І. Галькевич Моніторинг корозійної безпеки газопроводів Полтавської області. Збірник наукових праць за матеріалами V Всеукраїнського науково-практичного форуму установ НАН України «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки». (Полтава, 12 – 14 грудня 2012 р.). Полтава: ПолтНТУ, 2012. С.15 – 16 Автору належить моніторинг ґрунтових показників корозійної безпеки газопроводів на території Полтавської області
26. **Степова О.В.**, Рома В.В., Гудзь Я.Р. Проблеми впливу ґрунтового середовища на корозію магістральних нафтопроводів у Полтавській області. Тези 65-ї конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 2. (Полтава, 22 квітня – 15 травня 2013 р.) Полтава: ПолтНТУ, 2012. С. 14 – 16 Автору належить оцінка зовнішнього середовища експлуатації магістральних нафтопроводів з точки зору корозійної активності
27. **Степова О.В.**, Гудзь Я.Р. Аналіз стану ґрунтового середовища та його вплив на корозію магістральних нафтопроводів Полтавської області. Матеріали III Міжнародної наукової конференції студентів, магістрантів, аспірантів та молодих вчених. «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». (Харків, 26 – 27 листопада 2014 р.). Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2014. С. 83 – 86. Автору належить аналіз показників ґрунтового середовища, в якому експлуатуються нафтопроводи Полтавської області
28. **Степова О.В.**, В.В. Рома Аналіз корозійної активності ґрунтів в місцях розташування нафтопроводів Полтавської області. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми екологічної безпеки». (Кременчук, 8 – 9 жовтня

2014 р.). Кременчук: КрНУ. 2014. С. 52 – 54. *Автору належить побудова карт корозійної активності ґрунтів Полтавської області*

29. **Степова О.В.**, Заливчий В.О. Геоекологічні проблеми експлуатації підземного трубопровідного транспорту Полтавської області. Матеріали Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «*Екологія. Довкілля. Молодь*». (Полтава, 22 – 23 жовтня 2015 р.). Полтава: ПолтНТУ. С. 129 – 133. *Автору належить дослідження геоекологічних проблем експлуатації сталеві підземної мережі трубопроводів*

30. **Степова О.В.**, Заливчий В.О. Оцінка корозійних втрат на поверхні трубопроводу в ґрунтових умовах. Тези 68-ї конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.). Полтава: ПолтНТУ. 2015. С. 270 – 271 *Автору належить розрахунок корозійних втрат на поверхні сталевих трубопроводів, математичне обґрунтування результатів розрахунків*

31. **Степова О.В.** Оцінка втрати площі перерізу трубопроводу при роботі гальванічного елемента на поверхні трубопроводу в ґрунтових умовах. Матеріали 4-ого Міжнародного конгресу «*Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*». (Львів, 21 – 23 вересня 2016 р.). Львів: НУ «Львівська політехніка». С. 148 – 149.

32. Гомеля М.Д., **Степова О.В.** Розробка інгібіторів осадковідкладень у водах з високою мінералізацією. Збірник наук. праць XII Міжнародної науково-практичної конференції «*Академічна та університетська наука – результати та перспективи*». (Полтава, 6 грудня 2019р.). Полтава: ПолтНТУ. 2019. С.138 – 141. *Авторка сформулювала ідею, проблему та методику досліджень, узагальнила результати досліджень, сформулювала висновки/*

33. **Степова О.В.**, Ганошенко О.М. Екологічна безпека експлуатації споруд залізничного транспорту. Матеріали 77 Міжнародної науково-практичної конференції «*Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*». (Дніпро, 11-12 травня 2017р.). Днепр. 2017. С. 269 – 271. *Автору належить дослідження корозійних процесів при експлуатації споруд залізничного транспорту*

34. **Степова О.В.**, Кузнецова Ю., Хоменко А. Розрахунок глибини корозії сталевих трубопроводів за різних умов перебування електролітичного розчину в тріщинах. Тези 5-го Міжнародного конгресу «*Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*» (Львів, 26 – 29 вересня 2018 р.). Львів: НУ «Львівська політехніка». С. 122 – 123.

35. **Степова О.В.**, Хоменко А.С. Оцінка рівня техногенно-екологічної експлуатації нафтопроводів. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «*Екологія. Людина. Суспільство*». (Київ, 23 травня 2019 р.). Київ: НТУУ «КПІ імені І. Сікорського». 2019. С. 101 – 102 *Автору належить розрахунок параметру потоку відмов для нафтопроводів України*

36. **Степова О.В.**, Хоменко А.С. Оцінка впливу показників ґрунтового середовища на корозійний стан сталевих нафтопроводів. Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «*Vin smart eco*». (Вінниця, 16 – 18 травня 2019 р.). Вінниця: КВНЗ «Вінницька академія неперервної освіти». 2019. С. 266 – 269.

*Автору належить проведення експериментальних досліджень щодо виявлення найбільш корозійно активного ґрунту із досліджуваних*

37. **Степова О.В.**, Рассоха І., Блажко Л., Ганошенко О. Розрахунок залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів за умов впливу корозійного середовища. Збірник наукових праць II Міжнародної українсько-азербайджанської конференції «*Bulding Innovations - 2019*». (Полтава, 23-24 травня 2019р.). Полтава:ПолтНТУ. 2019. С. 190 – 193

*Автору належить розроблення номограми для експрес оцінювання залишкового ресурсу нафтопроводів, що експлуатуються в різних ґрунтових умовах*

38. **Степова О.В.** Розрахунок швидкості корозії підземних нафтопроводів в ґрунтових умовах Полтавської області. Збірник наукових праць за матеріалами VII-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю «*Екологія/Ecology–2019*». (Вінниця, 25–27 вересня 2019 р.). Вінниця: ВНТУ. 2019. С.42-43

39. Гомеля М.Д., **О.В. Степова** Оцінка корозійної активності мінералізованих пластових вод нафтових родовищ. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження*». (Миколаїв, 20–22 вересня 2019 р.). Миколаїв: Видавець Торубара В.В. 2019. С. 19 – 22. *Автору належить проведення хімічного дослідження щодо оцінки корозійної активності мінералізованих пластових вод щодо нелегованої сталі*

40. **Степова О.В.** Оцінка зміни товщини стінки сталевих трубопроводів при роботі гальванічного корозійного елемента. Матеріали 6-ої Міжнародної науково – практичної інтернет - конференції «*Енергетика, екологія, безпека життєдіяльності та комп'ютерні технології у будівництві*». (Дніпро, 25 – 27 квітня 2018р.). ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». 2018. С. 115 – 119. *Автору належить розробка залежності, що дозволяє розрахувати залишкову товщину стінки трубопроводу при роботі макрогальванічних корозійних пар за умов періодичного перебування агресивного розчину.*

#### **Патенти на корисну модель:**

41. Пат № 82560 на корисну модель України МПК G01N17/00 Мідно-сульфатний електрод порівняння / В.О. Бондар, **О.В. Степова**, Л.В. Бондар; заявник і патентовласник Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – №201303831 заявл. 28.03.2013; опубл. 12.08.2013, Бюл. №15.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Степова О.В. Наукові основи запобігання забрудненню довкілля внаслідок внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека. – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної проблеми розв'язання актуальної наукової проблеми створення наукових основ запобігання забрудненню довкілля внаслідок внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів.

У результаті проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень у дисертації запропоновано та обґрунтовано нові наукові положення, висновки та рекомендації, які дозволяють запобігти підвищенню ризиків забруднення довкілля нафтопродуктами, продуктами їх горіння або вибуху внаслідок процесів внутрішньої та зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу їх експлуатації.

Розроблені рекомендації та пропозиції щодо застосування запобіжних заходів задля унеможливлення забруднення довкілля внаслідок корозії сталевих нафтопроводів, шляхом застосування розроблених екологічно та економічно прийнятних інгібіторів корозії та осадковідкладень, а також запропонованої методики оцінювання залишкового ресурсу їх експлуатації.

**Ключові слова:** екологічна безпека, охорона довкілля, сталевий нафтопровід, електрохімічна корозія, тріщини в ізоляційному покритті, залишковий ресурс, інгібітор осадковідкладень, інгібітор корозії

## АННОТАЦІЯ

**Степовая Е.В. Научные основы предотвращения загрязнения окружающей среды вследствие внутренней и внешней коррозии стальных нефтепроводов.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи. Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 21.06.01 – Экологическая безопасность. – Национальный университет «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка». – Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы решения актуальной научной проблемы создания научных основ предотвращения загрязнения окружающей среды вследствие внутренней и внешней коррозии стальных нефтепроводов.

Украина имеет разветвленную сеть стальных нефтепроводов суммарной протяженностью около 5000 км, которые являются объектами повышенной опасности с точки зрения экологических требований. В случае их разгерметизации возникают экологические риски загрязнения окружающей среды вследствие утечки нефтепродуктов, возможных пожаров, взрывов и тому подобное.

Одним из негативных факторов, которые повышают экологические риски возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с загрязнением почв, водоемов, атмосферного воздуха, являются внешние и внутренние коррозионные процессы стальных нефтепроводов.

Понимание закономерностей таких процессов и их учета является научным основанием для определения остаточного ресурса стальных нефтепроводов, а также разработка мероприятий по предотвращению повышения рисков загрязнения окружающей среды при их эксплуатации. В результате проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований в диссертации предложено и обосновано новые научные положения, выводы и рекомендации, которые



позволяют предотвратить повышение рисков загрязнения окружающей среды нефтепродуктами, продуктами их горения или взрыва вследствие процессов внутренней и внешней коррозии стальных нефтепроводов путем применения разработанных экологически и экономически приемлемых ингибиторов коррозии и осадкоотложений, а также предложенной методики оценки остаточного ресурса их эксплуатации.

Теоретически обосновано химический состав и схемы безотходных процессов синтеза экологически приемлемых ингибиторов коррозии металлов с содержанием растительного масла, полиэтиленполиамин и растворителя (АС-1, АС-2), а также ингибиторов осадкоотложений с содержанием диметиллолфосфиновой кислоты, диметилсульфонатфосфинату натрия, нитрилоксиэтилендиметилфосфоновой кислоты. Установлено, что предложенные ингибиторы осадкоотложений по сравнению с известными ингибиторами при одинаковых концентрациях, обеспечивающих достижение значения стабилизационного эффекта более 90% при наличии в нефтепроводе минерализованной подтоварной воды нефти при температуре до 95<sup>0</sup>С. Также установлено, что предложенные ингибиторы коррозии металлов по своему эффекту не уступают известным, а и превосходят их по экономическим показателям минимум в 1,2 раза.

На основе смоделированных процессов электрохимической коррозии наружной поверхности стальных нефтепроводов разработана методология определения остаточного ресурса экологически безопасной эксплуатации нефтепровода, которая позволяет прогнозировать развитие внешних коррозионных процессов стальных нефтепроводов со временем и предотвращать загрязнение окружающей среды.

Разработаны рекомендации и предложения по применению мер для предотвращения загрязнения окружающей среды в результате коррозии стальных нефтепроводов путем применения разработанных экологически и экономически приемлемых ингибиторов коррозии и осадкоотложений, а также предложенной методики оценки остаточного ресурса их эксплуатации.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, охрана окружающей среды, стальной нефтепровод, электрохимическая коррозия, трещины в изоляционном покрытии, остаточный ресурс, ингибитор осадковидкладень, ингибитор коррозии

## ABSTRACT

**Stepova O.V. Scientific basis for prevention of environmental pollution due to internal and external corrosion of steel oil pipelines.** – Qualified scientific work on the rights of the manuscript. Thesis for a degree Doctor of Technical Sciences in specialty 21.06.01 – Environmental Safety. – National University «Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic». – State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of solving the actual scientific problem of developing scientific bases for the prevention of environmental pollution due to internal and external corrosion of steel oil pipelines.

As a result of complex theoretical and experimental research in the dissertation, new scientific provisions, conclusions and recommendations are proposed and substantiated to prevent the increase of risks of environmental pollution by petroleum products, products

of their combustion or explosion, due to internal and external corrosion processes of steel oil pipelines, through the application of environmentally and economically acceptable corrosion inhibitors and sediment inhibitors, as well as a proposed method for estimating the residual life of their operation.

Recommendations and suggestions for preventive measures to prevent environmental pollution due to corrosion of steel oil pipelines, through the application of environmentally and economically acceptable corrosion inhibitors and sediment, as well as a proposed method for estimating the residual life of their operation.

**Keywords:** environmental safety, environmental protection, steel pipeline, electrochemical corrosion, cracks in insulation, residual life, sediment inhibitor, corrosion inhibitor