

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



**Юзевич Лариса Володимирівна**

УДК 006:004.9:60:620

**УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ЯКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ГАЗОПРОВОДІВ**

Спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та  
метрологічне забезпечення

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Микийчук Микола Миколайович,**  
директор Інституту комп'ютерних технологій,  
автоматики та метрології Національного університету  
«Львівська політехніка»,  
м. Львів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Трищ Роман Михайлович,**  
завідувач кафедри охорони праці, стандартизації та  
сертифікації Української інженерно-педагогічної  
академії,  
м. Харків

кандидат технічних наук  
**Середюк Денис Орестович,**  
начальник науково-дослідної лабораторії Центру  
наукового забезпечення вимірювань ДП «Івано-  
Франківськстандартметрологія»,  
м. Івано-Франківськ

Захист дисертації відбудеться «29» листопада 2018 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.21 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С.Бандери, 28а, ауд. 713 п'ятого навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «\_\_» жовтня 2018 р.

*Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д. т. н., доцент*



Т. З. Бубела

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надійність трубопровідного транспорту – основа своєчасних постачань газу для держави на внутрішній і зарубіжний ринки. Відмови підземних газопроводів пов'язані з суттєвими матеріальними та екологічними втратами, призводять до локальних забруднень довкілля, створюють загрозу для здоров'я обслуговуючому персоналу та населенню, що проживає на відповідній території.

Газопроводи, як правило, у процесі експлуатації піддаються впливу циклічних механічних навантажень і одночасної дії корозійних середовищ. Корозійні процеси та втрата стійкості металу є головними чинниками, що призводять до зменшення ресурсу підземних сталевих газопроводів. Велика частина труб знаходиться в умовах контакту з ґрунтовим електролітом, який проникає в дефекти між металом і захисним покриттям. В період експлуатації трубопроводу (газопроводу) проявляються різні типи корозійної пошкоджуваності, а також зростає вірогідність аварійних відмов, пов'язаних із стрес-корозійним розтріскуванням під напругою.

Нові підходи з даної проблематики стосуються стрес-корозійних дефектів на поверхні металу, характер розвитку яких під час експлуатації труб доцільно уточнювати та удосконалювати на основі інформації, отриманої в результаті моніторингу трубопроводу, а також результатів математичного моделювання. Відповідні дослідження у цьому напрямку допоможуть уточнити надійність, ефективність та якість катодного захисту (КЗ) трубопроводів.

Такого типу методи контролю спрямовані, в основному, на прогнозування характеру стрес-корозійного руйнування, зокрема, оцінювання глибини міжфазного дефекту, а також густини корозійного струму, що дозволяє забезпечити аналіз технічного стану системи “підземний газопровід (ПГ) – установка катодного захисту (УКЗ)”, виходячи з критеріїв міцності металу з корозійними дефектами і обмежень, які накладають на досліджувану систему нормативні документи.

В останній час інтенсивно розвиваються методи неруйнівного контролю, які застосовуються для моніторингу газопроводів. Вони допомагають створювати різнопрофільні бази даних. Ті дані в основному неструктуровані та характеризуються великим обсягом. Відбір та впорядкування відповідної інформації і створення єдиної бази даних характеризується певними труднощами, оскільки потрібно враховувати значну кількість параметрів і приймати рішення про оптимізацію процесів керування процедурами електрохімічного захисту (ЕХЗ).

Потребують подальших глибоких досліджень питання нормативно-технічного забезпечення газопроводів, що експлуатуються в умовах малоциклової корозійної втоми. Важливим завданням у цьому напрямку є розроблення теоретичної бази, уніфікованого підходу та модифікованого стандарту, орієнтованих на оптимізацію процесів керування параметрами ЕХЗ та на оцінювання якості системи “ПГ – УКЗ”.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка», а саме: “Розвиток теоретичних і методичних засад нормування характеристик якості продукції і послуг та створення метрологічного забезпечення для їх вимірювання та контролю

при сертифікації і її підтвердженні відповідності”. Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт: “Розроблення та дослідження нових методів і засобів експрес-контролю характеристик якості та безпечності продукції” (№01107U001097), а також “Дослідження властивостей та показників якості процесів, матеріалів і продукції оптичними, електромагнітними (безконтактними) методами” (№0107U006223).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є удосконалення нормативно-технічного забезпечення якості для підземних металевих газопроводів на основі **аналізу** математичної моделі, яка описує корозійні процеси, втому та результати технічного діагностування в елементах конструкцій.

Досягнення поставленої мети передбачає розв’язання таких наукових і прикладних завдань:

1. Проаналізувати причини руйнування підземних газопроводів, а також методи оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій.

2. Систематизувати вимоги до метрологічного забезпечення контролю якості складних технічних систем (на основі урахування функціоналу якості).

3. Виокремити, систематизувати, дослідити та обґрунтувати чинники впливу на лінійну частину підземного газопроводу в процесі експлуатації з урахуванням вимог до катодного захисту.

4. Розробити спосіб ідентифікації дефектів металу та методи оцінювання якості системи «трубопровід – катодний захист» у процесі функціонування ЕХЗ.

5. Розробити метод прийняття рішень щодо якості функціонування системи «трубопровід – катодний захист» з урахуванням якості та надійності прогнозу.

6. Розробити рекомендації щодо оптимізації нормативних документів, які характеризують процедуру функціонування системи «підземний газопровід – установка катодного захисту».

7. Розробити проект нормативного документу щодо експлуатації лінійної частини підземного газопроводу з урахуванням корозійної втоми.

*Об’єктом дослідження* є процес оцінювання та удосконалення якості системи «трубопровід – катодний захист» у процесі функціонування електрохімічного захисту.

*Предмет дослідження* – методи контролю якості і нормативно-технічна документація газопровідного транспорту в умовах ризику.

**Методи дослідження.** Для досягнення визначеної мети та розв’язання поставлених завдань використано методи: наукового пізнання – для встановлення суті наукових та практичних завдань; діалектичний – для аргументації взаємозв’язку інформаційних потоків; порівняльного аналізу – для інтерпретації параметрів якості; факторного аналізу – для дослідження структури процесів; системного підходу – для встановлення оптимізаційних критеріїв; інформаційних технологій – для прогнозування етапів функціонування системи; оптимізації – для впорядкування інформаційного наповнення математичної моделі; кореляційного аналізу – для порівняння процесів; експертних оцінок – для встановлення зв’язку між параметрами; теорії ризиків – для встановлення умов виникнення критичних ситуацій; статистичний – для відбору інформації щодо об’єкту дослідження і процесів; математичного моделювання – для опису процесів та ризиків у системі “трубопровід – катодний захист”.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше запропоновано метод оцінювання якості лінійної частини підземного металевих газопроводу (ПМГ) і системи катодного захисту ПМГ, за яким ураховано корозійну втому та стрес-корозійне розтріскування, що може бути покладено в основу розроблення єдиного нормативного документу.

2. Вперше на основі результатів метрологічних досліджень, пов'язаних із струмом корозії підземного газопроводу, запропоновано функціонал якості та відповідність інформаційних показників вимогам міжнародних стандартів, зокрема, NACE SP0285-2011 (External Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection) і SP0169-2013 (Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems).

3. Удосконалено методику для системи “металева труба – ізоляційне діелектричне покриття”, яка містить такі основні процедури, як: оцінювання граничних та оптимальних значень потенціалів і струмів для системи катодного захисту трубопроводу; встановлення критеріїв міцності металу на межі метал – діелектричне покриття і в дефекті ізоляційного покриття, яке моделюємо каверною (пітингом) з тріщиною у вершині.

4. Виявлено закономірності зміни інформативних параметрів у системі моніторингу підземних газопроводів, які характеризують покращення системи протикорозійного захисту з урахуванням обернених зв'язків і принципів інженерії якості.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблено проект стандарту “Електрохімічний захист від корозії лінійної частини підземних металевих газопроводів з урахуванням втомної довговічності”, який дає змогу підвищити вірогідність інформації про рівень небезпеки процесів лінійної частини газопроводу.

Структурна схема підсистеми моніторингу системи “ПГ – УКЗ” дозволяє визначати небезпечні ділянки ПГ і сприяє підвищенню ефективності контролю умов технічного діагностування на основі оптимізації УКЗ. Впровадження методики ранжування ділянок ПГ за концентрацією дефектів і оптимізація діагностичних процедур дозволяє знизити обсяги діагностування небезпечних ділянок.

Запропоновано рекомендації щодо оцінювання ресурсу металу газопроводу з урахуванням результатів моделювання процесу поширення корозійної тріщини.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри “Інформаційно-вимірювальні технології” Національного університету “Львівська політехніка” для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології», а саме при вивченні дисциплін «Вимірювальний контроль у машинобудуванні», «Оцінювання якості», «Фізико-хімічні вимірювання».

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримано автором особисто. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві наукового ступеня належать: [1], [7], [8] – математичне моделювання фізико-механічних та корозійних процесів у дефектах на поверхні підземних трубопроводів; [2], [10], [11] – проаналізовано і узагальнено нормативне забезпечення якості підземних трубопровідних систем; [3], [12] – проаналізовано і

узагальнено нормативне забезпечення щодо захисту підземних трубопровідних систем від корозії, впливу температури та механічного навантаження; [4], [16] – сформульовано комплексний показник якості і критерій якості, який дозволяє оптимізувати процеси контролю трубопроводів з урахуванням втомної довговічності; [6] – запропоновано алгоритми щодо оцінювання ризиків і опрацювання інформації, які характеризують систему корозійних дефектів на поверхні металевого підземного трубопроводу.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та наукові результати доповідались та обговорювались на 7 міжнародних і одній всеукраїнській науково-технічних конференціях:

1. III науково-практична конференція студентів і молодих вчених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2011).

2. 17 Міжнародна науково-технічна конференція “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2012” (м. Львів, 2012).

3. I Міжнародна науково-практична конференція “Актуальні проблеми прикладної фізики”, секція “Метрологія, автоматизація та інформаційні системи”. (м. Севастополь, 2012).

4. IX Міжнародна науково-технічна конференція “Методи і засоби вимірювань фізичних величин”, Температура-2012 (м. Львів, 2012).

5. Міжнародна науково-практична конференція "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи" (м. Львів, 2013).

6. II Міжнародна науково-практична конференція "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи" (м. Львів, 2015).

7. VI Міжнародна науково-практична конференція "Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи" (м. Одеса, 2016).

8. III Міжнародна науково-практична конференція "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи" (м. Львів, 2017).

**Публікації.** За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 16 науково-технічних статей (з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому фаховому виданні України, що включено до міжнародної наукометричної бази, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав та 8 тез доповідей).

**Структура та об’єм роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг роботи становить 188 сторінок, у тому числі 133 сторінки основного тексту, рисунків – 16, таблиць – 8, додатків – 3 на 30 сторінках. Бібліографія включає 212 джерел і викладена на 25 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраного напрямку досліджень, визначено предмет і об’єкт досліджень, сформульовано мету, задачі та методи досліджень процесів для газопроводу, поміщеного в ґрунтовий електроліт, і

проблеми у сфері відповідного нормативно-технічного забезпечення, визначено наукову новизну і практичну цінність результатів, подано відомості про їх апробацію та публікації у наукових виданнях.

У першому розділі дисертації “Правила технічної експлуатації підземних трубопроводів” виконано аналіз нормативно-технічного забезпечення та методів оцінювання якості інформації щодо лінійної частини підземних металевих газопроводів, які піддаються впливу періодичних механічних навантажень та агресивних середовищ.

Запропоновано процедуру відбору інформації та елементи імітаційної математичної моделі для опису балансових процесів у ґрунтовому електроліті з урахуванням відповідних умов та чинників, які проілюстровано на рис. 1.

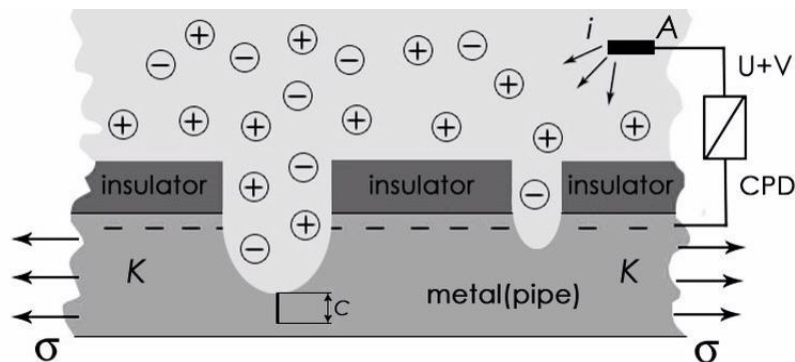


Рисунок 1 – Поверхневий шар металу з діелектричним покриттям у розчині електроліту; metal (pipe) – метал труби;  $c$  – глибина тріщини;  $K$  – катод;  $A$  – анод; insulator – діелектрик (покриття);  $U+V$  – різниця потенціалів;  $\sigma$  – механічне напруження;  $i$  – електричний (корозійний) струм; CPD (*cathodic protection device*) – пристрій катодного захисту

Основним принципом організації спостережень та експериментальних досліджень корозійних процесів для підземних трубопроводів є їх комплексність, яка передбачає узгоджену програму робіт з позицій електрохімії, механіки руйнування та термодинаміки нерівноважних процесів з використанням міжнародних стандартів типу NACE SP0285-2011 External Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection і SP0169-2013 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.

Такі дослідження забезпечують вичерпну інформацію щодо якості системи ПГ – УКЗ за електрофізичними та механічними показниками, а також дозволяють визначити необхідну оптимальну кількість нормативних документів (стандартів, регламентів) для забезпечення якості ЕХЗ відповідно до потреб практики та технологічного менеджменту. Деяку частину множини зарубіжних та вітчизняних нормативних документів подано на рис. 2.

## Трубопроводи. Корозія. Малоциклова втома

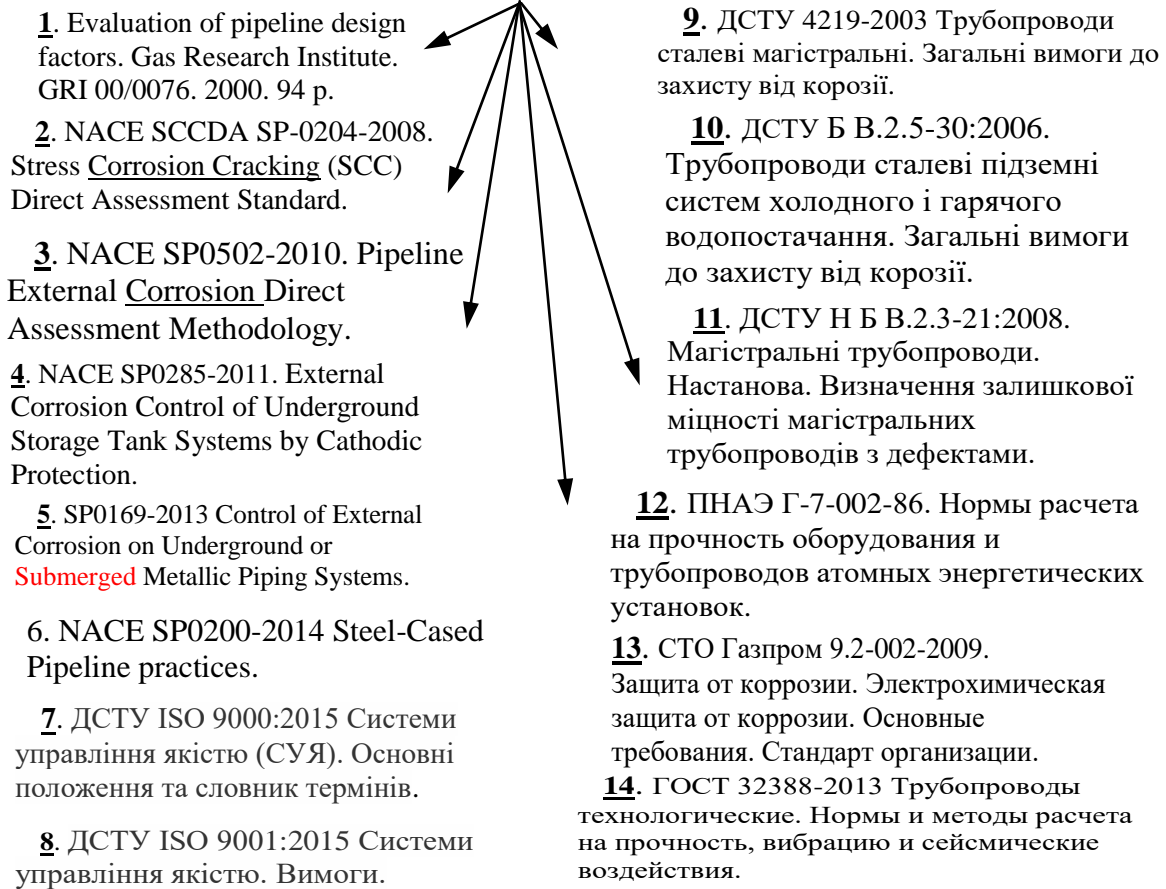


Рисунок 2 – Нормативна документація (щодо якості ЕХЗ), яка може бути корисною для підземних газопроводів (ПГ)

Якість системи ПГ – УКЗ розглядаємо у контексті функціональності та надійності. Уведемо в розгляд інтегральний показник якості функціонування системи моніторингу ПГ з доповненням параметрами системи управління якістю (СУЯ):

$$E_F = f(F(R), F(D), F(Q), F(I_b, P_t), FB(X_i), U_p) \Rightarrow opt. \quad (1)$$

Тут  $F(R)$  – показник якості використання ресурсів з погляду моделі корозіометрії;  $F(D)$  – показник якості діяльності структурних підрозділів, які мають відношення до ПГ;  $F(Q)$  – показник якості процесів у результаті функціонування СУЯ;  $F(I_b, P_t)$  – функція результативності, а також ефективності діяльності працівників (персоналу);  $I_t$  – індекс творчого потенціалу, кваліфікації та лояльності працівників;  $P_t$  – параметри моделі вибору поведінки працівників (персоналу);  $FB(X_i)$  – параметр, який характеризує обернений зв'язок;  $U_p$  – поляризаційний потенціал (ПП).

З використанням показника якості  $E_F$  сформовано послідовність дій (алгоритм) і схему контролю процесів у системі ПГ–УКЗ відповідно до рис. 2.

У **другому розділі** “Моделювання процесів у підземних трубопровідних системах” розглянуто удосконалену модель корозіометрії з урахуванням малоциклової втоми (МЦВ) металів, а також відповідну інформаційну технологію.

Інформаційна технологія для моделювання процесів у системі ПГ–УКЗ, зокрема ПГ, має вигляд (рис. 3).





Рисунок 3 – Структурна схема інформаційної технології для моделювання процесів у підземних газопроводах

Для оптимізації інформаційних потоків  $P_k(X_i)$  у системі ПГ–УКЗ і покращення засобів протикорозійного захисту ПГ використовуємо функціонал якості, а також фактори: функціональності та надійності, ефективності, інформаційної ємності і фактори ризику, пов’язані з програмним забезпеченням для опрацювання результатів розрахунків.

Щоб оцінювати надійність лінійних ділянок трубопроводів між катодними станціями, використовуємо співвідношення для “інтегрального” коефіцієнта надійності  $k_N$  (коефіцієнта безпеки) газопроводу:

$$k_N = k_M k_P S_{AD} / k_U, \quad k_N \Rightarrow opt, \quad (2)$$

де  $k_M, k_P$  – коефіцієнти надійності за матеріалом та призначенням відповідно;  $k_U$  – коефіцієнт умов праці;  $S_{AD}$  – узагальнений показник адгезії (безрозмірний відносний параметр) металевої конструкції (зокрема, труби з покриттям). Друге співвідношення зі (2) трактуємо як елемент критерію якості лінійної ділянки ПГ.

В основу моделі корозійної втоми металу покладено енергетичний критерій механіки руйнування, згідно з яким у довільному елементарному об’ємі матеріалу відбувається акт руйнування, якщо сумарна незворотньо розсіяна в ньому енергія пластичного деформування  $W$  за всі цикли навантаження досягне критичного значення  $W_Z$ , яке рівне енергії руйнування матеріалу:

$$W = \alpha_m \times W_Z \Rightarrow W_Z = \alpha_m \times \sigma_{of} \times \delta_{fc} \times \Delta a, \quad (3)$$

де  $W_Z$  – енергія руйнування матеріалу за його однократного статичного навантаження;  $\alpha_m$  – коефіцієнт Морроу;  $\Delta a$  – зміна (приріст) довжини тріщини;  $\sigma_{of} \approx (\sigma_T + \sigma_B)/2$ ;  $\sigma_T, \sigma_B$  – границі текучості та міцності матеріалу;  $\delta_{fc}$  – критичне розкриття вершини тріщини;  $\gamma_T = \sigma_{of} \times \delta_{fc}$  – питома енергія руйнування, потрібна для утворення одиниці довжини тріщини.

Характеристики деформування і руйнування металу труби зв’язані з інформацією про розкриття тріщини  $\delta_1$  та електрохімічне перенапруження  $\eta$ . Критичне розкриття  $\delta_{fc}$  вершини тріщини входить у КРТ критерій міцності (критичного розкриття тріщини). Цей критерій визначає гранично рівноважний стан пружнопластичного тіла з тріщиною і записується у вигляді:

$$\delta_1(\eta, \sigma_T) = \delta_{fc} = C_0 \frac{K_1^2}{\sigma_T E}, \quad K_1 = K_{1SCC} = \sqrt{E \cdot \sigma_T \cdot \delta_1} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left( WPL - Z_{si} F \rho \delta \frac{\eta}{M} \right)}. \quad (4)$$

Тут  $Z_{si}$  – формальний заряд сольватованих (гідратованих) іонів;  $F = 96500$  Кл/моль – постійна Фарадея;  $\delta = 2r$  – ширина фронту мікротріщини, що насувається, м;  $M$  – молекулярна маса металу, кг/моль ( $M = 0,0558$  кг/моль – для сталі);  $K_1$  – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН);  $K_{1SCC}$  – порогове значення коеф КІН  $K_1$ , тобто мінімальне значення, що відповідає початку поширення тріщини під впливом сумісної дії механічного навантаження і корозійного середовища;  $WPL$  – поверхнева енергія пластичного деформування, Дж/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – електрохімічне перенапруження, тобто відхилення електродного потенціалу від його рівноважного (по відношенню до приелектродного складу розчину) термодинамічного значення під час поляризації електроду під струмом, В;  $C_0$  – постійна, визначається з експерименту;  $\rho$  – густина матеріалу;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

У третьому розділі “Контроль захищеності сталевих підземних газопроводів” проведено аналіз методів контролю захищеності підземних газопроводів від корозії.

Запропоновано підхід до розв'язування задач прогнозу стану труб з корозійними тріщинами з урахуванням поляризаційного потенціалу  $U_p$  і ризиків. Під час заданої функції втрат ризик  $R(x, z)$  визначаємо як умовне математичне сподівання функції втрат відповідно до конкретних значень  $x, z$ :

$$R(x, z, FB(X_i), U_p) = \int s(x, z, FB(X_i), U_p) f(x, z) dx, \quad (5)$$

де  $f(x, z)$  – функція розподілу ймовірності втрат;  $x$  – сукупність величин, які характеризують початкові умови (вихідні дані);  $z$  – сукупність величин, які характеризують прийняте рішення (за даним значенням величин  $x$  проводиться оцінка  $\bar{z}$  – середнього значення визначальних параметрів для діапазону  $z$ );  $s(y, z, FB(X_i), U_p)$  – функція, яка відповідає умові руйнуванню труби.

Важливим показником стрес-корозійного руйнування металу труби є швидкість поширення тріщини  $V_a$ :

$$V_a = da/dN = F(C_i, K_1, pH_{IC}, E_{IC}, B_m(S)), \quad (6)$$

де  $a$  – характерний лінійний розмір тріщини у напрямку поширення;  $N$  – кількість циклів навантаження;  $F(x)$  – функціональна залежність від параметрів;  $C_i$  – константи;  $pH_{IC}$  – водневий показник середовища;  $E_{IC}$  – електродний потенціал металу;  $B_m(S)$  – параметри, що характеризують стан поверхонь матеріалу  $S$ , які утворюються під час руйнування.

Довговічність (ресурс) елемента конструкції (труби газопроводу) з корозійною тріщиною, тобто період  $N_C$ , обчислюємо за формулою:

$$N_C = C_a \int_{a_i}^{ac} \frac{da}{(\Delta K(a, \Delta a, \Delta \sigma, K_1, pH_{IC}, E_{IC}, B_m(S)))^n}; \quad N_{VC} = N_C / N_{C*}. \quad (7)$$

Тут  $a_i$  – початковий розмір макротріщини у матеріалі;  $ac$  – критичний розмір втомної макротріщини;  $\Delta a$  – квант руйнування;  $\Delta \sigma$  – розмах механічних напружень;  $n, C_a$  – константи, що характеризують систему “матеріал (сталь) – середовище”;  $N_{C*}$  – кількість циклів навантаження базового зразка;  $N_{VC}$  – відносна кількість циклів навантаження. Параметр  $a_i = d_*$ , де  $d_*$  розмір зони передруйнування.

Термін безаварійної експлуатації (ТБЕ) об'єкта  $T_S$  (тобто ресурс

трубопроводу) з урахуванням корозійного струму можна оцінити за формулою:

$$T_S = \left( h_{zm}(I_A) - h_{max} \right) / I_A, \quad (8)$$

де  $h_{zm}(I_A)$ ,  $h_{max}$  – геометричні розміри змінного дефекту і дефекту максимально допустимої глибини;  $I_A$  – анодний (корозійний) струм, розмірність якого, зокрема, 1 мм/рік (1 мм/рік  $\sim 0,8616$  А/м<sup>2</sup>).

З використанням балансових співвідношень, граничних умов дифузійного типу, а також (7), (8) розроблено алгоритм, комп'ютерну програму і (як приклад) отримано залежності швидкості поширення  $V_n$  та відносної глибини  $g = c/c_0$  корозійної тріщини від часу  $t$  (час  $t$  в місяцях) (рис. 4). У цьому варіанті прирівняно  $N_C$  і  $T_S$ . Встановлено, що з часом швидкість  $V_n$  поширення корозійної тріщини нелінійно зменшується, а відносна глибина дефекту  $g=c/c_0$  зростає за нелінійним законом. На основі розрахунків визначено відносні похибки оцінювання  $V_n$  та  $g$  і виявлено, що вони не перевищують 9 %.

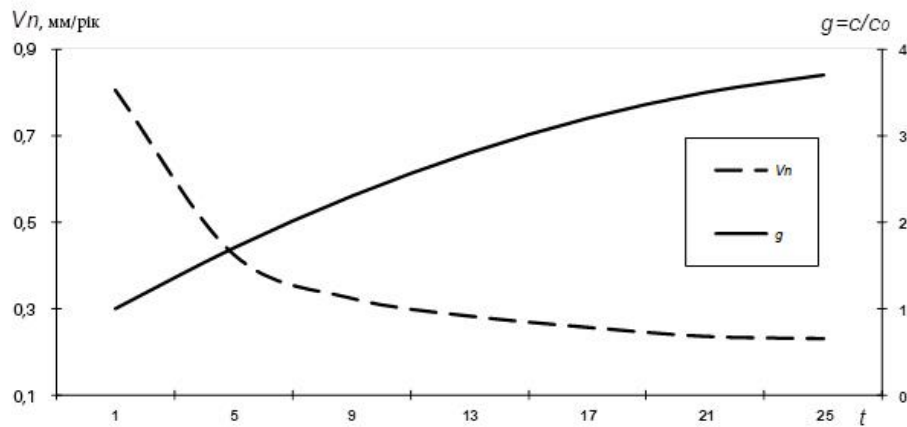


Рисунок 4 – Залежності швидкості  $V_n$  корозійної тріщини та її відносної глибини  $g=c/c_0$  від часу  $t$  (час  $t$  в місяцях)

Проведено порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень для сталеві труби марки 17ГС. Було визначено критичні значення величин глибин  $c_{cr}$  і часу  $\tau_{cr}$  для еталонної початкової глибини тріщини  $c_0 = 0,48$  мм і заданої початкової швидкості  $V_n = 1$  мм/рік. Різниця між розрахунковими та експериментальними величинами  $c_{cr}$  не перевищує 7 %.

Доповнимо відомий добуток  $k_p = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$  новими множниками (індикаторами) і сформулюємо для системи ПГ–УКЗ кваліметричний критерій якості у мультиплікативній та адитивній формах:

$$Z_1 = \prod_{i=1}^m k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8 \Rightarrow \max, \quad (9)$$

$$Z_2 = a_1 \cdot k_1 + a_2 \cdot k_2 + a_3 \cdot k_3 + a_4 \cdot k_4 + a_5 \cdot k_5 + a_6 \cdot k_6 + a_7 \cdot k_7 + a_8 \cdot k_8 \Rightarrow \max. \quad (10)$$

де  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – коефіцієнти комерційного виграшу, рівня конкурентоспроможності (конкурентоздатності) та надійності приладів для дистанційного зондування ( $k_3 \equiv Y_N$ );  $k_4(D_f)$ ,  $k_5(p_c)$ ,  $k_6(\sigma_{ve})$ ,  $k_7(N_C)$ ,  $k_8(T_S)$  коефіцієнти, які характеризують дефектність  $D_f$ , міцність  $p_c$ , границю корозійної втоми  $\sigma_{ve}(N_C)$ , довговічність  $N_C$ , термін безаварійної роботи  $T_S$  (ресурс) конструкції;  $a_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) – коефіцієнти вагомості.

У четвертому розділі “Рекомендації щодо удосконалення нормативно-технічного забезпечення якості функціонування підземних газопроводів” на основі аналізу проведених досліджень та результатів моделювання з урахуванням співвідношень (1)–(10) розроблено рекомендації щодо встановлення меж зміни параметрів, які характеризують довговічність та якість підземних металевих трубопроводів в умовах малоциклової втоми (МЦВ) та корозійного середовища. Встановлено особливості виявлення кризових (передаварійних) ситуацій.

Для труби, ослабленої на зовнішній поверхні дефектом типу каверни глибини  $h$  з тріщиною у вершині глибини  $c$ , запишемо співвідношення для внутрішнього критичного тиску  $p_c = p_{cr}$ :

$$p_{cr} = \frac{8 \cdot d \cdot \sigma_T}{3\sqrt{3}(\sqrt{2}+1)K_t \cdot R} \cdot \frac{(1,5+K_z) \cdot (r_c+c)^4}{(r_c+c)^4 + 0,5 \cdot r_c^2 (r_c+c)^2 + r_c^4}, \quad (11)$$

де  $K_z = \left( \frac{d-c}{2} \cdot \frac{2(d-c)+3r_c}{d-c+r_c} - \frac{3d}{2K_t} \right) / \left( \frac{d}{K_t} + \frac{r_c}{3} \cdot \left( \frac{r_c^3}{(d-c+r_c)^3} - 1 \right) \right)$ ;  $D$ ,  $d$  – діаметр і товщина стінки труби;  $r_c$  – радіус поверхні у вершині тріщини; критичний тиск  $p_{cr}$  відповідає умові досягнення у вершині тріщини граничного (пластичного) стану згідно з критерієм текучості, зокрема, Губера-Мізеса-Генкі;  $K_t$  – коефіцієнт концентрації напружень.

Руйнування труби можливе, коли глибина дефекту  $h+c$  досягне критичного розміру  $h_{cr}$ , а довжина тріщини  $L_T$  буде перевищувати критичне значення  $L_{cr}$ .

Для оцінювання  $h_{cr}$  і  $L_T$  використовуємо співвідношення:

$$h_{cr} = h + c_{cr} = d - L_T \sqrt{0,1785 \frac{p_{cr}}{\sigma_6}}, \quad h_{cr} = d \sqrt{\frac{L_T}{D} \left( 1 - \frac{p_{cr} (D-2d)}{2K_K K_S \sigma_6 d} \right)},$$

$$L_T \Rightarrow L_{cr} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{8d}{p_{cr} D} \right)^2 K_C^2, \quad K_S = 1 + \frac{h+c}{d} \sqrt{\frac{L_T}{D}}. \quad (12)$$

Тут  $K_K$  – коефіцієнт чутливості до тріщини;  $c_{cr}$  – критичне значення глибини тріщини;  $K_S$  – коефіцієнт, який враховує зміну товщини труби на дефектній ділянці трубопроводу;  $K_C$  – параметр тріщиностійкості, який визначають експериментально за відомими методиками механічних випробувань.

Числовим методом отримано зв'язок максимального числа циклів корозійного процесу  $N_{C*}$  ( $N_{C*} = N_C/N_{C0}$ ) сталі 12X1МФ з глибиною  $c$  тріщини на поверхні підземної труби у дефекті покриття для різних значень кислотності  $pH$  зовнішнього середовища (розчину електроліту) (рис. 5). На рис. 5 подано нормовані параметри числа циклів:  $N_{c1} = (N_C)_1/N_{C0}$ ,  $N_{c2} = (N_C)_2/N_{C0}$ ,  $N_{c3} = (N_C)_3/N_{C0}$ , де  $N_{C0}=1000$  – нормувальний параметр;  $(N_C)_1$ ,  $(N_C)_2$ ,  $(N_C)_3$  – реальні значення числа циклів для  $(pH)_1 = 3$ ;  $(pH)_2 = 6,5$ ;  $(pH)_3 = 9$ .

На рис. 5, зокрема,  $(N_C)_2 = 135 \times 10^3 \div 173 \times 10^3$  для  $(pH)_2 = 6,5$ . Зі зменшенням кислотності  $(pH)_i$  кількості циклів  $(N_C)_i$  зростають.

Доповнимо систему (1)–(12) інформацією про параметри, які характеризують конкретний підземний трубопровід в умовах експлуатації. Для цього необхідно врахувати вплив на надійність  $Y_N$  труби внутрішнього робочого тиску  $p_c$ , напружень  $\sigma_y$  від температурних перепадів  $\Delta T$ , нерівномірності укладки трубопроводу у траншею, зокрема:

$$Y_N = Y(N_C, \sigma_y, p_{sv}, \Delta T, \rho_K); \quad \rho_K = \frac{8(H + \Delta H)}{L_x^2 + 4(H + \Delta H)^2}; \quad \beta_Y = \frac{Y_N}{Y_S}. \quad (13)$$

Тут  $\rho_K$  – кривизна труби на ділянці трубопроводу;  $H$  – проектна зміна позначки розташування трубопроводу;  $\Delta H$  – величина похибки укладання трубопроводу по глибині;  $L_x$  – довжина хвилі трубопроводу з однаковою кривизною  $\rho_K$ ;  $Y_N$  – функція надійності ділянки трубопроводу (математичне сподівання резерву міцності);  $Y_S$  – стандартне (нормативне) значення резерву міцності;  $\beta_Y$  – характеристика безпеки.

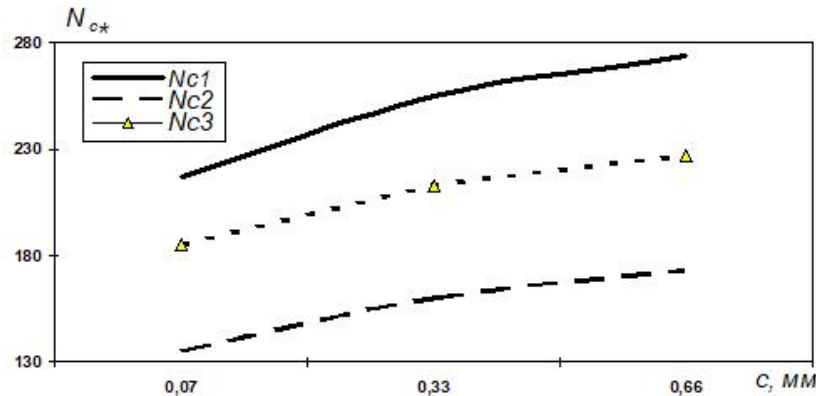


Рисунок 5 – Зв'язок максимального числа циклів корозійного процесу  $N_C = f(c)$  сталі 12X1МФ з глибиною  $c$  тріщини для різних значень кислотності ( $pH$ ); зовнішнього середовища за умови періодичного механічного навантаження

Емпірична критеріальна формула для розрахунку границі корозійної втоми металів має вигляд:

$$\sigma_{ve} = \sigma_{vp} [1,13 - 2,851 \lg(Q_{dr} / Q_{cor})], \quad (14)$$

де  $\sigma_{vp}$ ,  $\sigma_{ve}$  – границя втоми (механічне напруження) металу на повітрі та у середовищі;  $Q_{dr}$ ,  $Q_{cor}$  – кількість електрики, що йде на додаткове розчинення металу під час  $\sigma_{ve}$  та на його корозію за відсутності деформації. Для сталей, які використовуються у трубопроводах, непевності оцінювання  $\sigma_{vp}$ ,  $\sigma_{ve}$  порядку 8 %.

Втомні напруження зв'язані з пошкоджуваністю матеріалу. Еволюційне рівняння для опису процесу малоциклової втоми (МЦВ) металів має вигляд:

$$\frac{dD_z}{dt} = \left( \frac{Ee^2}{2Z_S} \right)^\lambda e^{\lambda \left( \frac{de}{dt} \right)}, \quad |D_z - D_f| \Rightarrow \min, \quad (15)$$

де  $D_z$ ,  $D_f$  – інтегральна об'ємна пошкодженість матеріалу та її критичне значення;  $e = e_{kk}/3$  перший інваріант тензора деформацій. Співвідношення (15) включає міцність пошкодженого матеріалу  $Z_S$  і експонента пошкоджень  $\lambda$ .

Як критерій завершення стадії розвитку розсіяних мікропошкоджень і створення мікротріщини використовуємо критерій досягнення пошкодженням критичного значення  $D_f$  ( $D_z \Rightarrow D_f$ ) (15).

Співвідношення (1)–(15) використовуємо для опису МЦВ матеріалу як у зонах

с розвинутими нестационарними пластичними деформаціями, так і в пружних зонах матеріалу (металу) під час циклічного навантаження.

Для контролю корозійного процесу з урахуванням поляризаційного потенціалу (ПП)  $U_p$  використовуємо критеріальне співвідношення щодо визначення швидкості залишкової корозії (пропорційної густині струму  $I_A$ ) металу у дефекті ізоляційного покриття, зокрема, у вершині тріщини, яка є анодною областю:

$$I_A = I_{AY}(1 + \beta_S \times \sigma / \sigma_T) \cdot 10^{V_{pt}}; \quad V_{pt} = (\bar{E}_c - U_p) / b_{at}. \quad (16)$$

Тут  $\bar{E}_c$  – усереднений корозійний потенціал;  $I_{AY}$  – густина корозійного (анодного) струму (швидкість корозії металу) за умови  $\bar{E}_c = U_p$ ;  $b_{at}$  – тафелівський нахил анодної поляризаційної кривої;  $\beta_S=3$  – безрозмірний емпіричний параметр, зокрема, для сталі 17Г1С у 3 % розчині NaCl.

Поляризаційний потенціал  $U_p$  вважають основним критерієм захисту від корозії металевих конструкцій в електропровідному середовищі. Емпірично встановлено, що захисний ПП  $U_p$  для сталевих підземних трубопроводів (ПТ) повинен знаходитись у межах від  $-0,85$  до  $-1,15$  В відносно мідносльфатного електрода порівняння (ЕП). З ПП зв'язані такі параметри як ефективна енергія  $WPL$  пластичного деформування (енергетична характеристика поверхні металу) та перенапруження  $\eta$  електрохімічної реакції.

Зміни у вершині корозійної тріщини ефективної енергії пластичного деформування  $WPL = f_1(N_C)$  приповерхневого шару металу та перенапруження реакції анодного розчинення  $\eta = f_2(N_C)$  проілюстровано для сталі 17Г1С графічно на рис. 6.

З наведених на рис. 6 залежностей видно, що для сталі 17Г1С (за умови  $pH=6,5$ ) у діапазоні  $N_C = 135 \times 10^3 \div 173 \times 10^3 - WPL(N_C)$  і  $\eta(N_C)$  нелінійні та монотонні;  $WPL(N_C)$  – зростаюча,  $\eta(N_C)$  – спадна. Якщо подати різницю максимальних та мінімальних величин у відношенні до їх середніх значень, то отримаємо:

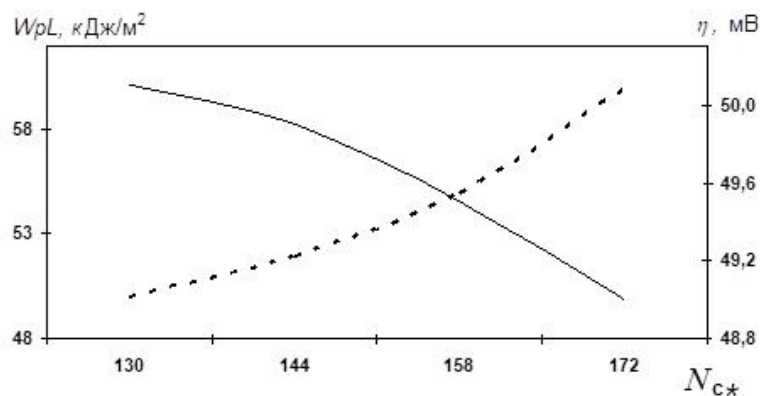


Рисунок 6 – Зв'язок поверхневої енергії пластичного деформування  $WPL$  (Дж/м<sup>2</sup>) і перенапруження  $\eta$  (мВ) з числом циклів  $N_{c*}$  для сталі 17Г1С, що знаходиться у 3 % розчині NaCl за умови  $pH=6,5$  ( $N_{c*} = N_C/N_{C0}$ )

$$w_1 = 2 \frac{WPL_{\max} - WPL_{\min}}{WPL_{\max} + WPL_{\min}} = 0,19; \quad w_2 = 2 \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_{\max} + \eta_{\min}} = 0,023. \quad (17)$$

У цьому випадку за умови зростання  $N_C$  на 24,7 % ефективна поверхнева енергія  $WPL$  зросла на 19 %, а перенапруження  $\eta$  зменшилось на 2,3 %.

Структурну схему інформаційно-комп'ютерної технології моніторингу підземних газопроводів подано на рис. 7.

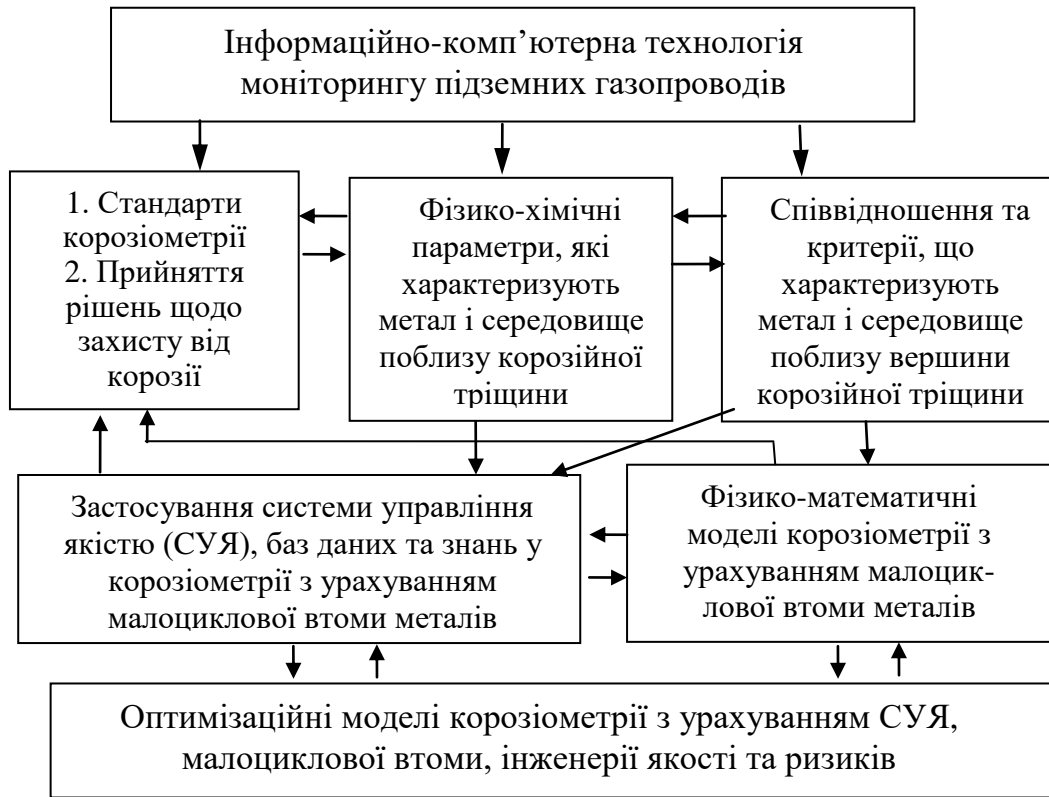


Рисунок 7 – Структурна схема інформаційно-комп'ютерної технології для підземних газопроводів з урахуванням корозійних процесів

Для визначення густини анодного струму  $I_A$  у вершині тріщини з урахуванням енергетичної характеристики поверхневого шару  $WPL$  використовуємо узагальнене співвідношення типу Кеше:

$$I_A = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta \psi_{ak}}{\delta \cdot \ln((h + c + r_c) / \delta)} \cdot \left( 1 + \beta_w \cdot \left( \frac{WPL - WPL0}{WPL0} \right)^S \right), \quad (18)$$

де  $\alpha$  – кут розкриття вершини тріщини;  $\chi$  – електропровідність електроліту;  $\Delta \psi_{ak}$  – омична зміна електричного потенціалу між анодною і катодною частинами;  $h$  – глибина каверни. Співвідношення (18) записано для вершини тріщини, яка є анодом;  $\beta_w$ ,  $S$ ,  $WPL0$  – константи, які визначаємо експериментально для матеріалу.

Співвідношення (18) описує залежність струму анодного розчинення від електрохімічних характеристик вершини тріщини  $\chi$ ,  $\psi_{ak}$ , геометричних  $\alpha$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $r_c$  та ефективної енергії пластичного деформування  $WPL$ , яку експериментально визначаємо на основі методу вимірювання твердості. Спільне використання співвідношень (16), (18) дає можливість зв'язати  $WPL$  з ПП  $U_P$ , а також  $\psi_{ak}$  з ПП  $U_P$ .

Використовуємо експериментальні залежності густини струму  $I_{KV} = I_A / I_{A0}$  сталі 17Г1С у корозійному середовищі тріщини для періодично змінних (втомних)

напружень з амплітудою  $\sigma/\sigma_T=0,7$  (рис. 8). Метал знаходиться у 3 % розчині NaCl. По осі абсцис відкладено відносну кількість циклів  $N_V = N_C/N_0$ .

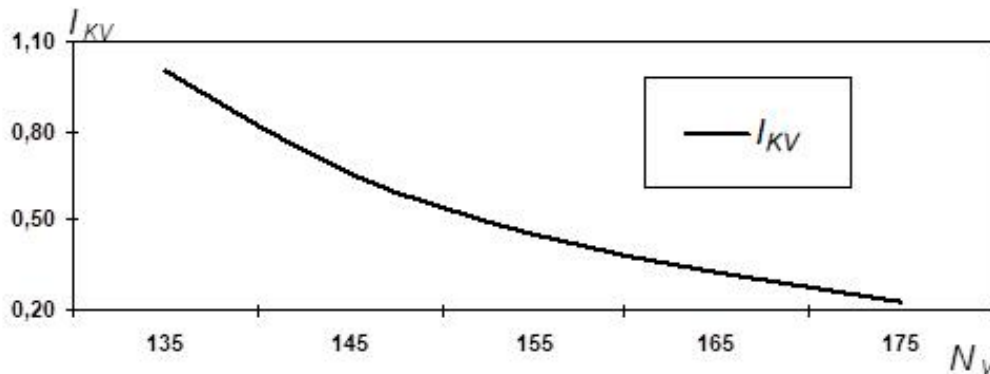


Рисунок 8 – Зв'язок корозійного струму  $I_{KV} = I_A/I_{A0}$  (швидкості корозії) з відносним числом циклів  $N_V = N_C/N_{C0}$  для сталі 17Г1С, що знаходиться у 3 % розчині NaCl

У цьому випадку за умови зростання  $N_V$  на 25 % корозійний струм  $I_{KV}$  зменшується нелінійно приблизно на 80 %,

За умови розгляду аварійних ситуацій враховано розділення території проходження трубопроводів на зони, для яких характерні різні типи ризику.

У зонах металу труби з нестаціонарними пластичними деформаціями доцільно використати критерії адгезійної міцності, біокорозійної агресивності ґрунтів, механічний критерій для коефіцієнта інтенсивності напружень (враховує перенапруження корозійного процесу), критерій корозійної стійкості дефекту, критерій якості (9), (10), критеріальне співвідношення для оцінювання швидкості залишкової корозії металу в дефекті ізоляційного покриття разом з уведеними діагностичною вагою ознак і діагностичною цінністю обстежень, які доповнюють, уточнюють та удосконалюють систему корозійного моніторингу трубопроводів і зможуть бути використані для контролю та оптимізації корозійного процесу, а також розроблення рекомендацій антикорозійного захисту. З їх допомогою проводиться оптимізація умов захисту елементів конструкцій нафтогазової промисловості, які описані та регламентовані державними стандартами.

Запропоновано процедуру визначення оптимального числа вимірювань параметрів в небезпечних корозійних зонах труби з використанням функціоналу якості та критерію якості (9), (10).

Сумісне використання співвідношень (1)–(18) і критеріїв корозійного моніторингу трубопроводів дозволяє досить детально з позицій корозійної втоми, електрохімії, фізики поверхневих процесів, механіки руйнування і теорії ризиків вивчати механізми поширення корозійних втомних тріщин у підземних металевих трубопроводах, що знаходяться в агресивних середовищах.

Проведено оцінювання непевності щодо терміну безаварійної експлуатації трубопроводу  $\delta T_S$  (тобто ресурс трубопроводу) за формулами (6)–(8), (18) і даними щодо параметрів труби, корозійних каверни, тріщини. Отримано:



$$T_{S1} = 12,9 \text{ років}; T_{S2} = 18,7 \text{ років}; \delta T_S = 2(T_{S2} - T_{S1}) / (T_{S2} + T_{S1}) \approx 0,37. \quad (19)$$

З урахуванням інформації щодо непевностей густини корозійного струму  $I_A$ ,  $I_{KV}$  (16), (18) та низки параметрів типу  $p_{cr}$ ,  $c_{cr}$ ,  $h_{cr}$ , тощо у співвідношеннях (1)-(18) зменшено непевність  $\delta T_S$  від 37 % (19) до 9 %.

На основі отриманих результатів запропоновано проект стандарту «Електрохімічний захист від корозії лінійної частини підземних металевих газопроводів з урахуванням втомної довговічності».

У додатках подано акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих в дисертації результатів дозволяє розв'язати важливе наукове завдання щодо удосконалення нормативного забезпечення для розвитку методів оцінювання показників, які характеризують якість системи «підземний газопровід – установка катодного захисту» в умовах малоциклової втоми та впливу агресивного ґрунтового електроліту.

Розв'язання цього завдання важливе для оптимізації процедур подовження ресурсу металевих підземних газопроводів (ПГ).

У дисертаційній роботі отримано такі основні результати:

1. Удосконалено математичну модель для опису балансових процесів у ґрунтовому електроліті. Встановлено необхідну кількість нормативних документів (стандартів та регламентів) для забезпечення ефективного функціонування системи “підземний газопровід – установка катодного захисту”, відповідно до вимог кваліметрії та потреб практики.

2. Запропоновано множину параметрів металу і діелектричного покриття та на їх основі розроблено методику розрахунку фізичних величин, які характеризують корозійні процеси, корозійну втому і результати стрес-корозійного розтріскування для системи “ПГ – катодний захист”. Відповідну методику перевірено на відповідність нормативним вимогам ДСТУ 4219-2003 до апаратури для обстежень підземних газопроводів і на цій основі запропоновано проект стандарту “Електрохімічний захист від корозії лінійної частини підземних металевих газопроводів з урахуванням втомної довговічності”.

3. Введено функціонал і критерій якості та з їх допомогою на основі аналізу результатів метрологічних досліджень встановлено відповідність інформаційних показників, пов'язаних зі струмом корозії, вимогам міжнародних стандартів, зокрема, NACE SP0285-2011 (External Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection) і SP0169-2013 (Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems).

4. Запропоновано методику удосконалення функціонування програмно-апаратного комплексу для моніторингу системи підземного газопроводу і устаткування для катодного захисту (УКЗ) із застосуванням баз даних і знань. Бази даних і знань для моніторингу системи ПГ і УКЗ включають в себе: дані неперервного моніторингу інформації про актуальний стан системи корозійних дефектів, дані нормативно-технічної документації; дані діагностування підземних газопроводів засобами безконтактних вимірювань струму; дані щодо критичних

ситуацій, пов'язаних з ризиком, з відзначенням причин та умов їх виникнення і заходів щодо ліквідації відхилень від режимів функціонування; дані вимірювального контролю струмів і потенціалів; дані неруйнівного контролю з урахуванням стрес-корозійного розтріскування (СКР), корозійно-механічні характеристики металу; критерії міцності та пластичності для матеріалу труб.

5. Для системи “металева труба – ізоляційне діелектричне покриття” розроблено методику оцінювання параметрів, яка включає такі основні процедури, як: оцінювання граничних та оптимальних значень потенціалів і струмів для системи катодного захисту трубопроводу; встановлення критеріїв міцності металу на межі метал – діелектричне покриття і в дефекті ізоляційного покриття, яке моделюємо каверною (пітингом) з тріщиною у вершині. Це дозволило дати рекомендації щодо ідентифікації рівня небезпеки труб, які контактують з ґрунтовим електролітом (зокрема, рекомендації щодо ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки).

6. Розроблено структурну схему і відповідно алгоритм інформаційної технології системи моніторингу ПГ, які поєднують три типи математичних моделей:

- математична модель корозіометрії з урахуванням контролю якості підземних газопроводів у контексті виявлення поверхневих дефектів (тріщин, каверн, пор);
- моделювання процесів з погляду системи управління якістю (СУЯ);
- моделювання процесів з погляду організаційних структур (персонал, інженерія якості, забезпечення експлуатаційної безпеки технологічного процесу для ПГ).

7. Отримані результати використовуються для розробки теоретичних засад, а також для удосконалення методології оцінювання корозійної стійкості трубопроводів системи “підземний газопровід – установка катодного захисту”, що функціонують в умовах агресивних середовищ та циклічних механічних навантажень.

8. Виявлено нові закономірності зміни інформативних параметрів у системі моніторингу підземних газопроводів, які уточнюють інтенсивність корозійного струму металу у дефектах покриття і дають можливість оцінити перспективи покращення системи протикорозійного захисту з урахуванням обернених зв'язків та принципів інженерії якості.

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

1. Чабан О., Юзевич Л. Розвиток структурних складових нормативно-технічної документації в технічній та медичній діагностиці // Метрологія та прилади. 2014. № 4. С. 51-57.
2. Чабан О., Юзевич Л. Нормативні вимоги щодо захисту магістральних трубопроводів від корозії // Вимірювальна техніка та метрологія. 2012. № 73. С. 122-127.
3. Чабан О., Юзевич Л. Нормативні вимоги щодо контролю параметрів корозійного стану підземних трубопроводів // Вимірювальна техніка та метрологія. 2013. Вип. 74. С. 81-88. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog\\_2013\\_74\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2013_74_20).

4. Чабан О., Юзевич Л. Моделювання та якість моніторингу діагностичних систем // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник / відповідальний редактор Б. І. Стадник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2015. Випуск 76. С. 92–98.
5. Юзевич Л. Математичне моделювання якості підземних трубопроводів в умовах корозійної втоми // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник / відповідальний редактор Б. І. Стадник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2016. Випуск 77. С. 136–143.
6. Микийчук М., Юзевич Л. Контроль якості підземних газопроводів з урахуванням корозійної втоми, міцності та нормативної документації // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник / відповідальний редактор Б. І. Стадник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2017. Випуск 78. С. 101–107.
7. Yuzevych L., Skrynkovsky R., Mykyuchuk M. Improvement of Regulatory Requirements for Ensuring the Quality of Underground Gas Pipelines in Conditions of Corrosion Fatigue // Path of Science. 2017. Vol. 3, No 9. P. 1001-1008. [Електронний ресурс]. doi: 10.22178/pos.26-1 – <http://dx.doi.org/10.22178/pos.25-8>. Slovak Republik.
8. Yuzevych L., Skrynkovsky R., Koman V. Development of information support of quality management of underground pipelines // EUREKA: Physical Sciences and Engineering. 2017. No. 4. P. 49-60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00392>.
9. Юзевич Л. Критерії корозійного стану газопроводів із сталі / Л. Юзевич // Збірник тез доповідей 3-ї науково-практичної конференції студентів і молодих вчених "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання". 29-30.11.2011. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 187-188.
10. Джала Р. М. Термодинамічний підхід до контролю параметрів на границі сталеводне середовище / Р. М. Джала, М. І. Мельник, Л. В. Юзевич // Матеріали 17-ї міжнародної науково-технічної конференції "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2012". 20-25.02.2012. Славське Львівської області. – Львів, 2012. – С. 132-134.
11. Чабан О. П., Юзевич Л. В. Нормативні вимоги до якості зварних з'єднань сталених труб // Матеріали 1-ї міжнародної науково-практичної конференції "Актуальні проблеми прикладної фізики". Секція № 8. Метрологія, автоматизація та інформаційні системи в прикладній фізиці. 24-28.09.2012. Севастополь, 2012. С. 260-261.
12. Чабан О., Юзевич Л. Моніторинг температури та механічних напружень в сталених трубопроводах // ІХ Міжнародна науково-технічна конференція "Методи і засоби вимірювань фізичних величин". Температура-2012: Тези доповідей. 25-28.09.2012. Львів, 2012. С. 129-130.
13. Юзевич Л. Контроль якості катодного захисту підземних трубопроводів з урахуванням поляризаційного потенціалу // II Міжнародна науково-практична конференція "Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи", 28-30 травня 2015 року: тези доповідей / Відп. за вип. М. М. Микийчук. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. С. 264-265.

14. Юзевич Л. Критерії корозійного стану газопроводів із сталі / Л. Юзевич // Збірник тез доповідей 3-ї науково-практичної конференції студентів і молодих вчених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”. 29-30.11.2011. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 187-188.
15. Юзевич Л. Принципи підвищення якості підземних трубопроводів в умовах корозійної втоми // Шоста Міжнародна науково-практична конференція "Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи", 11-12 жовтня 2016 року: тези доповідей. Одеса: Видавництво Одеської державної академії технічного регулювання та якості, 2016. С. 195-196.
16. Микійчук М., Юзевич Л. Оцінювання якості підземних трубопроводів з урахуванням втомної довговічності // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції пам'яті професора Петра Столярчука, 11–12 травня 2017 року / відп. за вип. М. М. Микійчук. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 107–108.

## АНОТАЦІЯ

**Юзевич Л. В. Удосконалення нормативного забезпечення якості підземних газопроводів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02. – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена дослідженню інформації, яка використана для формулювання рекомендацій і прийняття рішень щодо оцінювання довговічності та якості підземних металевих газопроводів в умовах корозійної втоми. Встановлено особливості раннього виявлення кризових (передаварійних) ситуацій. Уведено комплексний кваліметричний критерій для визначення рівня якості лінійної частини трубопроводу з урахуванням катодного захисту та інших аспектів технологічної специфіки.

В основу моделі корозійної втоми металу покладено енергетичний критерій механіки руйнування, згідно з яким у довільному елементарному об'ємі матеріалу відбувається акт руйнування, якщо сумарна енергія пластичного деформування за всі цикли навантаження досягне критичного значення, яке рівне енергії руйнування.

У зонах з нестаціонарними пластичними деформаціями використовуються критерії адгезійної міцності, біокорозійної агресивності ґрунтів, механічний критерій для коефіцієнта інтенсивності напружень, критерій корозійної стійкості дефекту, критеріальне співвідношення для оцінювання швидкості залишкової корозії металу в дефекті ізоляційного покриття, які доповнюють, уточнюють та удосконалюють систему корозійного моніторингу трубопроводів і є корисними для контролю корозійного процесу, а також для розроблення рекомендацій антикорозійного захисту металу.

Розроблено проект стандарту “Електрохімічний захист від корозії лінійної частини підземних металевих газопроводів з урахуванням втомної довговічності”.

**Ключові слова:** сталевий газопровід, нормативно-технічна документація, якість, механічне навантаження, ресурс, малоциклова втома, корозія, ризики.

### **АННОТАЦІЯ**

**Юзевич Л. В. Усовершенствование нормативного обеспечения качества подземных газопроводов. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 – стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена исследованию информации, которая использована для формулировки рекомендаций принятия решений относительно оценивания долговечности и качества подземных металлических газопроводов в условиях коррозионной усталости. Установлены особенности раннего выявления кризисных (предаварийных) ситуаций. Уведено комплексный кваліметрический критерий для определения уровня качества линейной части трубопровода с учетом катодной защиты и других аспектов технологической специфики.

В основу модели коррозионной усталости металла положен энергетический критерий механики разрушения, согласно которому в произвольном элементарном объеме материала происходит акт разрушения, если суммарная энергия пластического деформирования за все циклы нагрузки достигнет критического значения, какое равно энергии разрушения.

Для контроля коррозионного процесса с учетом поляризационного потенциала используется критериальное соотношение относительно определения скорости остаточной коррозии металла в дефекте изоляционного покрытия, в частности, в вершине трещины, которая является анодной областью.

Критериальное соотношение относительно определения скорости остаточной коррозии металла в дефекте изоляционного покрытия для контроля коррозионного процесса с учетом поляризационного потенциала используется. Это соотношение сформулировано для вершины трещины, которая является анодной областью.

В зонах с нестационарными пластическими деформациями используются критерии адгезионной прочности, биологически коррозионной агрессивности грунтов, механический критерий для коэффициента интенсивности напряжений, критерий коррозионной стойкости дефекта, критериальное соотношение для оценки скорости остаточной коррозии металла в дефекте изоляционного покрытия. Эти критерии дополняют, уточняют и совершенствуют систему коррозионного мониторинга трубопроводов. Они полезны для контроля коррозионного процесса, а также для разработки рекомендаций относительно антикоррозионной защиты металла газопровода.

Разработан проект стандарта "Электрохимическая защита от коррозии линейной части подземных металлических газопроводов с учетом усталостной долговечности".

**Ключевые слова:** стальной газопровод, нормативно-техническая документация, качество, механическая нагрузка, ресурс, малоцикловая усталость, коррозия, риски.

## ABSTRACT

**Yuzevych L. V. Improvement of normative providing of underground gas pipelines quality.** – On the rights of manuscripts.

The thesis for a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by specialty 05.01.02 – Standardization, Certification and Metrological Assurance. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to research of information that is used for formulation of recommendations of making decision in relation to the evaluation of quality and longevity of underground metallic gas pipelines in the conditions of corrosive fatigue. The features of early exposure of crisis (pre-emergency) situations are set. A complex qualimetric criterion for determination of level of quality of pipeline taking into account cathode defence and other aspects of technological specific is presented.

The energetic criterion of fracture mechanics according to that there is an act of fracture in the arbitrary elementary volume of material is fixed in basis of model of corrosive fatigues of metal, if plastic deformation total energy for all cycles of loading will attain a critical value, what equal to fracture energy.

Criterion correlation in relation to determination of speed of remaining corrosion of metal in the defect of isolating coverage for control of corrosive process taking into account polarization potential used. This correlation is set forth for the top of crack that is an anodic area.

In zones with non-stationary plastic deformations the criteria of adhesion strength, biologically corrosivity of soils, mechanical criterion for the coefficient of intensity of tensions, criterion of inoxidizability of defect, are used, criterion correlation for the estimation of speed of remaining corrosion of metal in the defect of isolating coverage. These criteria complement the system of the corrosive monitoring of pipelines, specify and perfect. They are use ful to control and optimization of corrosive process, and also for development of recommendations of relatively anticorrosive defence of metal.

The project of standard "Electrochemical corrosion protection linear part of underground metallic gas pipelines taking into account fatigue life" was developed.

**Key-words:** steel pipeline, normatively-technical documentation, quality, mechanical loading, resource, low cycle fatigue, corrosion, risks estimation.