

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ГАЗОПРОВІДІВ З УРАХУВАННЯМ КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ, МІЦНОСТІ ТА НОРМАТИВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

QUALITY CONTROL OF UNDERGROUND PIPELINES IN VIEW OF CORROSION FATIGUE, DURABILITY AND REGULATORY DOCUMENTS

Микола Микійчук, Л. Юзевич,

Національний університет "Львівська політехніка", Україна

Mykola Mykyuchuk, L. Yuzevych

Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Анотація

У статті подано алгоритм інформаційної технології для підвищення ефективності підземних газопроводів (ПГ) на основі концептуальної моделі з використанням підходів інженерії якості. Розроблено структуру комплексної моделі, в яку входять співвідношення корозійної втоми, стандарти, методики і рекомендації щодо підвищення якості процедури оцінювання міцності та надійності ПГ з урахуванням параметрів, які характеризують ресурс і втомну довговічність. Приклади *розрахунку низки параметрів і характеристик металевої труби ПГ за різними методиками дозволяють отримати діапазон оптимальних непевностей*. Удосконалено методики коригування параметрів математичної моделі фізико-хімічних процесів на поверхні труби з урахуванням корозійного поширення вершини тріщини і ризику.

Ключові слова: підземний газопровід, нормативно-технічна документація, ресурс, корозійна втома, інженерія якості, ризику, критерії міцності.

Abstract

The elements of the system of the corrosive monitoring of metallic underground gas pipelines are considered. This system is intended for determining the locations of damages of protective cover, and for measuring of electric potentials (corrosive, polarization, protective) on the surface of gas pipeline.

The program of automatic calculation of corrosive activity of soil is represented in this system as also in a system of cathode defense of pipelines. The energetic criterion of mechanics of fracture is introduced in basis of model of corrosive fatigue. For cracks disclosure the coefficient of stress intensity factor and potential of reaction of anodic dissolution of metal are related. Methodology of evaluation of resource is considered to the duration of safe exploitation of pipeline substance (for gas pipeline) with the damaged isolating coverage in a corrosive environment.

Empiric criterion formula for the calculation of limit of corrosive fatigue of metals is represented. In derived equation the integral by volume damaged steel is included. Represented expressions characterize complexity of energetic and forced approaches concerning the fatigue fracture in metal. Corresponding correlations are presented as elastic and plastic constituents for to the Rice's integral.

Information technology of monitoring of underground gas pipelines combines three types of mathematical models. The first one is a mathematical model of corrosion tests taking into account control of pipeline quality and fracture of metal in surface defects (cracks, cavities). The second type is a modeling of physical processes for pipelines on the basis of control quality system. The third type is a modeling of processes for underground gas pipelines from the point of view of operational structures (personnel, engineering of quality, providing of technological process safety).

Keywords: Underground Gas Pipeline, Regulatory Document, Resource, Corrosive Fatigue Life-Time, Engineering of Quality, Risk, Strength Criteria.

Вступ. Проблема отримання якісної інформації про стан металевих труб підземних газопроводів (ПГ) є важливою в контексті технічної діагностики і екологічної безпеки. Адже при руйнуванні підземних магістральних трубопроводів виникають пошкодження природного ландшафту та рельєфу, порушення цілісності ґрунтово-рослинного покриву [1]. При аваріях пошкодження супроводжуються синергетичним ураженням територій радіусом до 540 м від осередку вибуху, а можливий розкид фрагментів трубопроводу може сягати 480 м [1].

У зв'язку з цим у газопровідній галузі доцільно використовувати сучасні нормативно-технічні документи, методи моніторингу корозійного стану у поєднанні з інформаційними технологіями (ІТ), комп'ютерним моделюванням, підходами теорії кваліметричних вимірювань та інженерії якості [2, 3].

Сучасний стан проблеми. Запропоновано комплексну математичну модель для оцінювання ресурсу та підвищення якості антикорозійного захисту металевих підземних газопроводів з позицій корозійної втоми, електрохімії, фізики поверхневих процесів, механіки руйнування і теорії ризиків [4, 5]. Проведене моделювання враховує нагромадження пошкоджень у металах і дозволяє вивчати механізми поширення корозійних втомних тріщин у підземних металевих газопроводах, що знаходяться в агресивних середовищах, зокрема, у ґрунтовому електроліті [4, 5]. Наведені співвідношення є основою розроблення методик удосконалення нормативно-технічних документів для металевих газопроводів, які знаходяться в умовах корозійної втоми.

Розглянуто проблеми формування і уточнення даних стосовно тривалої міцності сталей [6]. Акцентується увага на експериментальних даних тривалої міцності металу трубопроводів, отриманих методом базових діаграм, узагальненого і детального представлення їх у нормативному документі та подальшого системного аналізу [6].

Розглядаються процеси життєвого циклу (ЖЦ), пов'язані із забезпеченням якості програмних систем (ПС) – зокрема, процеси верифікації, валідації, тестування, виміри, забезпечення гарантії якості, керування ризиком і якістю в області досліджень сфери інженерії якості [7].

Визначено напрямки розвитку інженерії якості ПС, які розробляються у новій парадигмі програмування – генеруючому програмуванні (ГП) [8]. Охарактеризовано актуальні проблеми забезпечення якості сімейств систем, що складають базис для побудови окремих ПС – членів сімейств – з повторно використовуваних компонентів. Сформульовано задачі інженерії якості сімейств та підходи до їх розв'язання, зокрема задачі верифікації, тестування, моделювання та оцінювання якості ПС у новій парадигмі [7, 8].

Сумісне використання критеріїв корозійної втоми, міцності, корозійного моніторингу газопроводів, а також підходів інженерії якості [4-8] дозволить розв'язати проблему вивчення механізмів поширення корозійних втомних тріщин у підземних металевих газопроводах, що знаходяться в агресивних середовищах і в умовах змінного механічного навантаження (внутрішнього тиску).

Метою даної праці є використання підходів інженерії якості для підвищення ефективності підземних газопроводів (ПГ) і удосконалення відповідних нормативних документів.

Встановлення вимог до параметрів підземних газопроводів.

В основі моніторингу підземних газопроводів (ПГ) – система корозійного моніторингу (СКМ) [9]. Ця система (СКМ) призначена для визначення місць пошкоджень захисного покриття, вимірювання потенціалів (корозійних, поляризаційних, захисних) газопроводу, корозійної активності ґрунту (швидкості корозії металу газопроводу на різних рівнях його залягання) і швидкості залишкової корозії металу газопроводу в дефектах захисного покриття [9]. Важливим критерієм пошкодження захисного покриття і захищеності газопроводу є поляризаційний потенціал E_p та його відхилення ΔE_p , що пов'язано з катодним захистом і обумовлено відповідними нормативними документами [9, 10]. Вимірювання E_p проводиться при відключеній системі катодного захисту на контрольованій ділянці труби методом виносу електроду порівняння [9, 10].

У програмне забезпечення системи моніторингу (СКМ) і системи катодного захисту ПТ закладено програму автоматичного розрахунку корозійної активності ґрунту (струму корозії i_k) за формулою [9]:

$$i_k = 2B\Delta I / (S_e \Delta E), \text{ мм/рік}, \quad (1)$$

де B – постійна методу (для трубних сталей має значення 332); S_e – площа поверхні одного електроду сенсора швидкості корозії (ШК), ΔI – вимірне значення струму, А; ΔE – різниця потенціалів, що задається між робочими електродними сенсора ШК (складає 10 мВ).

Після визначення корозійної активності ґрунту i_k можна розрахувати швидкість i_D (густини струму) залишкової корозії металу газопроводу у дефекті захисного покриття і оцінити ресурс ПТ за формулою [9]:

$$i_D = i_k \cdot 10^{V_b}; \quad V_b = (E_{cor} - E_p) / b_a, \quad (2)$$

де E_{cor} – потенціал корозії металу газопроводу, В; E_p – поляризаційний потенціал у точці вимірювання, В; b_a – нахил анодної поляризаційної кривої у рівнянні Тафеля, В.

Рівняння Тафеля зв'язує перенапруження електродної реакції η розчинення металу (сталі) з густиною корозійного (анодного) струму i_A [9]:

$$\eta = a + b \lg \frac{i_A}{i_N}, \quad a = \frac{2,3RT}{(1-\alpha)nF} \lg \frac{i_A}{i_N}, \quad b = \frac{2,3RT}{(1-\alpha)nF}, \quad i_A = i_0 \cdot \exp \left[\frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta \right]. \quad (3)$$

Тут $i_N = 1 \text{ А/м}^2$ – нормувальний множник, який забезпечує безрозмірне відношення під знаком логарифма;

n – кількість електронів, які беруть участь в електродній реакції розчинення металу; T – температура;

$R = 8.314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – універсальна газова стала; $F = 96485 \text{ Кл/моль}$ – стала Фарадея; α – коефіцієнт переносу;

i_0 – струм обміну (який відповідає умові рівності струмів $|i_A| = |i_C| = i_0$; i_C – катодний струм).

Іntenсивно процес корозії проходить у вершині тріщини і тому для детального аналізу анодного розчинення металу доцільно врахувати співвідношення, яке уведено у монографії Кеше [12] і узагальнено у праці [13]:

$$i_A = \frac{\alpha \cdot \chi \cdot \Delta \psi_{ak}}{\delta \cdot \ln(c/\delta_f)} \cdot \left(1 + \beta_w \cdot \left(\frac{WPL - WPLO}{WPLO} \right)^5 \right), \quad (4)$$

де α – кут у вершині поверхневого дефекту (тріщини); χ – електропровідність електроліту (зокрема, ґрунтового); $\Delta \psi_{ak}$ – омична зміна електричного потенціалу між анодною (A) і катодною (K) ділянками; c , δ_f – ефективна глибина і розкриття тріщини відповідно; β_w , S – емпіричні константи; WPL – поверхнева енергія пластичного деформування (ПЕПД) за умови напруженого стану в діапазоні зміни пластичних деформацій ε_p ; $WPLO$ – ПЕПД за умови досягнення напруженням σ у вершині тріщини межі текучості σ_T матеріалу. Співвідношення (4) записано для вершини тріщини – аноду A . Бокові поверхні дефекту (тріщини) є катодом K [12, 13].

В основу моделі корозійної втоми металу закладено енергетичний критерій механіки руйнування, згідно з яким у довільному елементарному об'ємі матеріалу відбувається акт руйнування, якщо сумарна незворотно розсіяна в ньому енергія пластичного деформування W за всі цикли навантаження досягне критичного значення W_Z , яке рівне енергії руйнування матеріалу [5]:

$$W = \alpha_m \times W_Z \Rightarrow W_Z = W_0 + W_S + \Delta N \times W_C = \alpha_m \times \gamma_T \times \Delta a = \alpha \times \sigma_{0f} \times \delta_{fC} \times \Delta a, \quad (5)$$

де W_Z – енергія руйнування матеріалу за його однократного статичного навантаження; α_m – коефіцієнт Морроу [3]; $W_0 = \gamma_{T0} \times \Delta a$; W_0 і γ_{T0} – енергія і питома енергія дисипації пластичних деформацій при попередньому навантаженні відповідно; $\sigma_{0f} \approx (\sigma_T + \sigma_B)/2$; σ_B – межа міцності матеріалу; δ_{fC} – критичне розкриття тріщини ($\delta_f \Rightarrow \delta_{fC}$); $\gamma_T = \sigma_{0f} \times \delta_{fC}$ – питома енергія руйнування, потрібна для утворення одиниці довжини тріщини.

Критичне розкриття δ_{fC} вершини тріщини входить у КРТ (критичного розкриття тріщини) критерій міцності, який визначає гранично рівноважний стан тіла (труби) з тріщиною довжини L_t на момент досягнення δ_{fC} [5]:

$$\delta_f(L_t, \sigma_T) = \delta_{fC}. \quad (6)$$

З розкриттям тріщини δ_{fC} у спрощеному варіанті зв'язані коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) K та перенапруження (overpotential) η реакції розчинення металу на основі відомих співвідношень [5]:

$$K = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \cdot \left(WPL - Z_{si} F \rho \delta \frac{\eta}{M} \right), \quad K = K_{1SCC} = \sqrt{E \cdot \sigma_T \cdot \delta_{fC}}. \quad (7)$$

Тут Z_{si} – формальний заряд сольватованих (гідратованих) іонів; $F = 96500$ Кл/моль – постійна Фарадея; δ – ширина фронту мікротріщини, що насувається, м; M – молекулярна маса металу, кг/моль ($M = 0,0558$ кг/моль – для сталі); ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга; K_{1SCC} – порогове значення КІН, тобто мінімальне значення, що відповідає початку поширення тріщини під впливом сумісної дії механічного навантаження і корозійного середовища. Перенапруження η характеризує відхилення електродного потенціалу від його рівноважного (по відношенню до приелектродного складу розчину) термодинамічного значення при поляризації електроду під струмом. Необхідно відзначити, що друге співвідношення (7) для K_{1SCC} впливає з КРТ критерію (6).

Ресурс P_{BK} безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу (газопроводу) з пошкодженням ізоляційним покриттям у корозійному середовищі запишемо у вигляді [14]:

$$P_{BK} = P_K w_K = K_W w_K P, \quad PB = wP, \quad P_K = K_W P. \quad (8)$$

Тут PB – ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу у повітрі; P , w – проектний і відносний ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу у повітрі відповідно; K_W – коефіцієнти впливу агресивності середовища на довговічність матеріалу трубопроводу; N , N_K – довговічність матеріалу трубопроводу у повітрі та корозійному середовищі; P_K – ресурс експлуатації матеріалу трубопроводу з пошкодженням ізоляційним покриттям.

Емпірична критеріальна формула для розрахунку границі корозійної втоми металів має вигляд [5]:

$$\sigma_{vs} = \sigma_{vp} \left[1,128 - 2,849 \lg(Q_{dr} / Q_{cor}) \right], \quad (9)$$

де σ_{vp} , σ_{vs} – границя втоми (тобто механічне напруження) на повітрі та у середовищі відповідно; σ_{ii} , σ – головні компоненти і перший інваріант тензора макроскопічних напружень; $\sigma = \sigma_{vp}$, σ_{vs} ; Q_{dr} , Q_{cor} – кількість електрики, що йде на додаткове розчинення деформованого металу при σ_{vp} та на його корозію при відсутності деформації. Для нержавіючих сталей, які використовуються у трубопроводах, непевності оцінювання σ_{vp} , σ_{ve} не перевищують 8 %.

Обмежимося розглядом малоциклової втоми стосовно ПГ. Еволюційне рівняння для опису процесу малоциклової втоми металів запишемо аналогічно як у праці [5]:

$$\frac{dD_{zp}}{dt} = \left(\frac{E e_p^2}{2\sigma_{vp}} \right)^{\lambda_p} e_s^{\lambda_p} \left(\frac{de_p}{dt} \right), \quad D_{zp} \Rightarrow D_{fp}; \quad \frac{dD_{zs}}{dt} = \left(\frac{E e_s^2}{2\sigma_{vs}} \right)^{\lambda_s} e_s^{\lambda_s} \left(\frac{de_s}{dt} \right), \quad D_{zs} \Rightarrow D_{fs}, \quad (10)$$

де D_z , D_f – інтегральна об'ємна пошкоджуваність матеріалу та її критичне значення; параметри у (10) з індексами "p" і "s" відповідають повітрю і корозійному середовищу, зокрема, $D_z = D_{zp}$, D_{zs} ; $D_f = D_{fp}$, D_{fs} ; $e = e_{kk}/3$ – перший

інваріант тензора деформацій, $e=e_p, e_s$; $\lambda p, \lambda s$ – емпіричні константи, які характеризують пошкодження.

Зв'язок енергетичного і силового підходів щодо втомного руйнування металу ПГ можна подати у вигляді співвідношень для пружної (J_{el}) та пластичної (J_{pl}) складових інтегралу Райса ΔJ [5, 15, 16]:

$$\Delta J = \Delta J_{el} + \Delta J_{pl}, \quad \Delta J_{pl} = (1 - \nu^2) \Delta K^2 / E, \quad J_{pl} = 2 \times WPL, \quad (11)$$

$$\Delta J = \Delta J_{el} + \Delta J_{pl} = 4K_a^2 / E + 1,72G(n_*) \sigma_T \varepsilon_a a, \quad G(n_*) = (1 - n_*) (3,85(1 - n_*) / \sqrt{n_*} - \pi \times n_*). \quad (12)$$

Тут ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН); $\Delta J, \Delta J_{el}, \Delta J_{pl}$ – зміни параметрів; K_a – амплітуда КІН для півеліптичної тріщини в напівнескінченному просторі; a – розмір тріщини; ε_a – амплітуда деформації, яку встановлювали як половину ширини петлі гістерезису; n_* – коефіцієнт деформаційного зміцнення (зокрема, $n_* \approx 0,132$ для металу (заліза, сталі)).

Співвідношення (1)-(12) є основою удосконаленої моделі корозіометрії (рис. 1) з урахуванням малоциклової втоми металів і відповідної інформаційної технології порівняно з [17].

Інформаційна технологія (рис. 1) системи моніторингу ПГ поєднує три типи математичних моделей:

- математична модель корозіометрії з урахуванням контролю якості підземних газопроводів в контексті виявлення поверхневих дефектів (тріщин, каверн) [4, 5, 11-17];
- моделювання процесів з погляду системи управління якістю (СУЯ) [16];
- моделювання процесів з погляду організаційних структур (персонал, інженерія якості, забезпечення експлуатаційної безпеки технологічного процесу ПГ) [5, 6, 17].

Уведемо в розгляд інтегральний показник ефективності функціонування системи моніторингу ПГ аналогічно як у [17, с. 136] з доповненням параметрами системи управління якістю (СУЯ) [18]:

$$E_f = f(F(R), F(D), F(Q), F(I, P_i)) \Rightarrow opt. \quad (13)$$

Тут $F(R)$ – ефективність використання ресурсів з погляду моделі корозіометрії; $F(D)$ – ефективність діяльності структурних підрозділів, які мають відношення до ПГ; $F(Q)$ – ефективність в результаті функціонування СУЯ; $F(I, P_i)$ – функція результативності, а також ефективності діяльності працівників (персоналу); I_i – індекс творчого потенціалу, кваліфікації та лояльності працівників; P_i – модель вибору поведінки працівників (персоналу), включаючи якісні і кількісні параметри P_{ii} . ($i = 1, 2, \dots, n_p$; n_p – загальна кількість параметрів відповідної моделі).

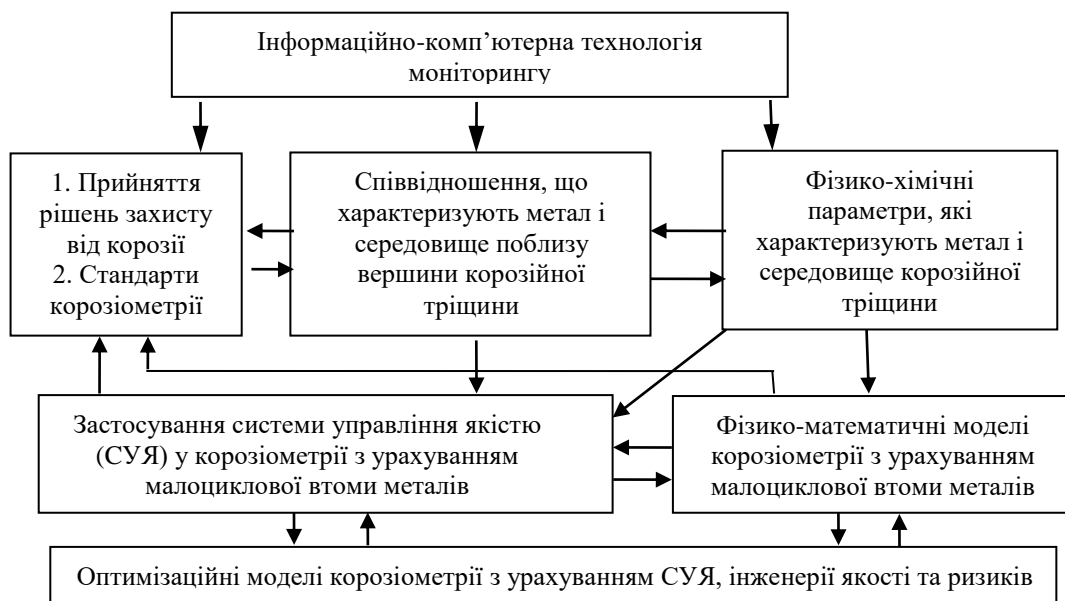


Рис. 1. Структурна схема інформаційно-комп'ютерної технології з урахуванням корозійних процесів
Fig. 1. A flow diagram of informatively-computer technology taking into account corrosive processes

Для оптимізації інформаційних потоків $P_k(X_i)$ у системі моніторингу ПГ і покращення системи протикорозійного захисту ПГ використаємо аналогічно як у [20] функціонал якості з урахуванням оберненого зв'язку, відповідний параметр якого $FB(X_i)$ (X_i – множина параметрів системи).

Доцільно уважати, що обернений зв'язок $FB(X_i)$ пов'язаний з ризиками та інженерією якості. Для оптимізації ризиків врахуємо такі фактори [18-20]: якості та надійності, інформаційної ємності і фактори ризику, пов'язані з програмним забезпеченням.

За сучасних темпів розвитку індустрії програмного забезпечення є важливим формування проблемної області (ПрО), підвищення якості програмних систем (ПС), побудова ПС у новій парадигмі генеруючого програмування

(ГП) з множини різнотипних повторно використовуваних програмних компонентів, а також постійне накопичення, узагальнення та використання знань стосовно ПрО та перспектив їх еволюції [6]. Інженерію ПрО ототожнюють з інженерією сімейств ПС [8].

Пошук напрямків розв'язання проблем інженерії якості стосується системи моніторингу ПГ (рис. 1). Зокрема, це такі проблеми [7, 8]:

1) моделювання якості сімейства ПС та оцінювання якості генерованих артефактів на кожній стадії інженерії ПрО та інженерії застосувань;

2) вибір компонентів, які щонайкраще відповідають вимогам до цільової ПС;

3) верифікація активів ПрО. Проблема полягає у відсутності методів перевірки відповідності вибраних (розроблених) активів потребам ПрО, зокрема доведення коректності моделей, компонентів, архітектурних композицій компонентів;

4) тестування компонентів нової генерації. Проблема полягає в необхідності пристосовування існуючих методів он-лайнного (оперативного) тестування вибраних компонентів для генерації ПС, зокрема, Web-компонентів;

5) розроблення інструментів тестування. Видається, що інструменти тестування компонентів ПС та їх композицій, як специфічний вид ПС у ПрО тестування, самі могли б утворювати сімейства, що полегшило б їх пристосування до програмної архітектури середовища IDE (Integrated Development Environment), в якому розробляються цільові ПС;

6) сертифікація компонентів – затвердження їх відповідності загальноприйнятим стандартам, а також адекватності щодо даної множини вимог. Проблема полягає у тому, що початковий код вибраних компонентів (COTS-продуктів або продуктів з Інтернет) недоступний для аналізу і верифікації відомими методами. Необхідно комбінувати різні стратегії сертифікаційного тестування, включаючи тестування не тільки розробниками, але і постачальниками і споживачами цих компонентів;

7) визначення оперативної програмної архітектури, що не буде протирічити вимогам щодо якості ПС. Проблема полягає у тому, що програмна архітектура ПС, яка вибудовується з архітектури сімейства шляхом композиції, має формуватися з урахуванням не лише функціональних вимог до ПС, але й вимог до якості ПС. Ця проблема безпосередньо зумовлює наступну проблему, а саме:

8) керування ризиком у ході всього життєвого циклу (ЖЦ) генерації системи (СКМ). Проблема полягає в необхідності аналізу компромісів при виборі тієї або іншої архітектурної композиції, стратегії генерації ПС, тестування та оцінювання якості ПС. Її розв'язання пов'язано з визначенням таксономії ризиків і регулярним оцінюванням ризиків на кожному кроці генерації ПС.

Висновки. Розроблено структурну схему (рис. 1) концептуальної моделі інформаційно-комп'ютерної технології захисту підземних газопроводів з урахуванням корозійних процесів поблизу вершини тріщини, ризику. В основі інформаційної технології удосконалені оптимізаційні моделі корозіометрії, управління якістю, поведінки працівників (персоналу), включаючи якісні та кількісні параметри. Для оптимізації інформаційних потоків у системі моніторингу підземних газопроводів і покращення системи протикорозійного захисту рекомендується враховувати обернені зв'язки і принципи інженерії якості.

Перспектива. Запропоновану структурну схему інформаційно-комп'ютерної технології доцільно орієнтувати на оптимізацію нафтогазових транспортних систем у періодах нестабільних та кризових ситуацій.

Література

1. Гушак Ж. М., Добош У. П. Дефекти магістральних газопроводів // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2013. Випуск № 40. С. 339–342.
2. Мотало В., Мотало А. Аналіз основних проблем теорії кваліметричних вимірювань // Стандартизація. Сертифікація. Якість. 2011. № 1. С. 60–64. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ssia_2011_1_18.
3. Стадник Б. І., Мотало В. П., Мотало А. В. Шкали вимірювань: теорія, систематизація та сфери використання // Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип. 25.9. С. 339–350.
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. Yuzevych L., Skrynkovsky R., Koman B. Development of information support of quality management of underground pipelines // EUREKA: Physical Sciences and Engineering. 2017. No. 4. P. 49–60.
6. О проблеме подготовки данных по длительной прочности при формировании нормативной документации для металлоемкого энергетического оборудования / В. В. Кривенюк, Е. И. Усков, Д. С. Авраменко, Ю. Ю. Садовский, Р. П. Приходько // Проблемы прочности. 2012. № 4. С. 20–32.
7. Основы инженерии качества программных систем / Ф. И. Андон, Г. И. Коваль, Т. М. Коротун, Е. М. Лаврищева, В. Ю. Суслов // 2-е изд., перераб. и доп. К.: Академперіодика, 2007. 672 с.

8. Лаврішева К. М., Коваль Г. І., Коротун Т. М. Підходи до інженерії якості сімейств програмних систем // Проблеми програмування. 2008. № 2–3 (спецвипуск УкрПРОГ'2008). С. 219–228.
9. Поляков С. Г., Клименко А. В., Коваленко С. Ю. Система корозійного моніторингу трубопроводів // Наука та інновації. 2010. Т. 6, № 5. С. 25-28.
10. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. К.: Держспоживстандарт України, 2003. 86 с.
11. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия. Учеб. для хим.-технолог. спец. вузов // 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1984. 519 с.
12. Kaeshe H. Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1979. 400 p.
13. Юзевич В. М., Валяшек В. Б., Каплун А. В. Математичне та комп'ютерне моделювання фізичних характеристик матеріалу у вершині тріщини з урахуванням ефекту зміцнення // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2015. № 18. С. 97-104.
14. Пиріг Т. Ю. Вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" ; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2013. 20 с.
15. Polak J., Zezulka P., Short crack growth and fatigue life in austenitic-ferritic duplex stainless steel // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 2005. Vol. 28, P. 923–935.
16. Rice J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks // J Appl. Mech. 1968. Vol. 35. P. 379–386.
17. Юзевич В. М., Огірко О. І. Інформаційна технологія оцінювання станів об'єктів із сталі в морському середовищі із сірководнем з використанням алгебри алгоритмів // Наукові записки (Українська академія друкарства). 2012. № 4 (41). С. 160–172.
18. Юзевич В. М., Байцар Р. І., Гунькало А. В. СУЯ: моделювання управління процесами // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". 2007. № 574. С. 123-126.
19. Копитко М. І. Комплексне забезпечення економічної безпеки підприємств (на матеріалах підприємств транспортного машинобудування): дис. на здобуття наук. ступеня докт. економіч. наук: спец. 21.04.02 "Економічна безпека суб'єктів господарської діяльності". Київ, 2015. 478 с.
20. Юзевич В. М., Ключак О. В. Економічний аналіз рівнів ефективності та якості інтернет-платіжних систем підприємства // Бізнес Інформ. 2015. № 1. С. 160-164.

References

- [1] Zh. Hushchak, U. Dobosh, "Defekty mahistralnykh hazoprovodiv", *Naukovi notatky*, Lutsk, Ukraine, no.40, s.339–342, 2013.
- [2] V. Motalo, A. Motalo, "Analiz osnovnykh problem teorii kvalimetrychnykh vymiriuvan", *Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist*, no.1, s.60-64. 2011. [Online]. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ssia_2011_1_18.
- [3] B. Stadnyk, V. Motalo, A. Motalo, "Shkaly vymiriuvan: teoriia, systematyzatsiia ta sfery vykorystannia", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, no.25, p.339-350, 2015.
- [4] O. Chaban, L. Yuzevych, "Modeling and monitoring of diagnostic systems", *Measuring Equipment and Metrology*, no.76, p.92-98, 2015.
- [5] L. Yuzevych, R. Skrynkovskyy, B. Koman, "Development of information support of quality management of underground pipelines", *EUREKA: Physical Sciences and Engineering*, no.4, p.49-60, 2017.
- [6] V. Kryveniuk, E. Uskov, D. Avramenko, Yu. Sadovskiy, R. Prykhodko, "O probleme podhotovky dannykh po dlytelnoi prochnosti pry formirovaniu normatyvnoi dokumentatsyy dlia metalloemkoho enerhetycheskoho oborudovaniia", *Problemy prochnosti*, Kyiv, Ukraine, no.4, p.20-32, 2012.
- [7] F. Andon, H. Koval, T. Korotun, E. Lavryshcheva, V. Suslov. *Fundamentals of quality engineering of software*, Kyiv, Ukraine: Akademperryodyka, 2007.
- [8] K. Lavrishcheva, H. Koval, T. Korotun, "Pidkhody do inzhenerii yakosti simeistv prohramnykh system", *Problemy prohramuvannia*, no.2–3 (spetsvypusk UkrPROH2008), p.219–228, 2008.
- [9] S. Poliakov, A. Klymenko, S. Kovalenko, "Systema koroziinoho monitorynhu truboprovodiv", *Nauka ta innovatsii*, vol.6, no.5, p.25-28, 2010.
- [10] Derzhspozhyvstandart Ukrainy. DSTU 4219-2003. Truboprovody stalevi mahistralni. Zahalni vymohy do zakhystu vid korozii. Kyiv, Ukraine, 2003.
- [11] L. Antropov. *Theoretical electrochemistry*, Moscow, RF: Higher School, 1984.
- [12] H. Kaeshe. *Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1979.

- [13] V. Yuzevych, V. Valiashek, A. Kaplun, “Matematychno ta kompiuterne modeliuвання fizychnykh kharakterystyk materialu u vershyni trishchyny z urakhuvanniam efektu zmitsnennia”, *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, no.18, p.97-104, 2015.
- [14] T. Pyrih. “Vplyv peredekspluatatsiinykh navantazhen v protsesi ukladannia na resurs bezpechnoi ekspluatatsii morskyykh truboprovodiv”, PhD thesis, Nat. techn. Un. Of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2013.
- [15] J. Polak, P. Zezulka, “Short crack growth and fatigue life in austenitic-ferritic duplex stainless steel”, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, vol.28, p.923–935, 2005.
- [16] J. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks”, *J Appl. Mech.*, vol. 35, p.379–386, 1968.
- [17] V. Yuzevych, O. Ohirko, “Informatsiina tekhnologhiia otsiniuvannia staniv obektiv iz stali v morskomu seredovyshchi iz sirkovodnem z vykorystanniam alhebrnykh alhorytmiv”, *Naukovi zapysky of Ukrainian Academy of Printing*, no.4(41), p.160–172, 2012.
- [18] V. Yuzevych, R. Baitsar, A. Hunkalo, “SUIa: modeliuвання upravlinnia protsesamy”, *Bul. Lviv Polytech. Nat. Un.*, no.574, p.123-126, 2007.
- [19] M. Kopytko, “Kompleksne zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky pidpriemstv (na materialakh pidpriemstv transportnoho mashynobuduvannia)”, Dr. Sc. thesis, Kyiv, Ukraine, 2015.
- [20] V. Yuzevych, O. Kliuvak, “Ekonomichnyi analiz rivniv efektyvnosti ta yakosti internet-platizhnykh system pidpriemstva”, *Biznes Inform.*, Lviv, Ukraine, no.1, p.160-164, 2015.