

УДК 504.75:681.2.543

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВІДІВ В УМОВАХ КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ

© Юзевич Лариса, 2016

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розроблено рекомендації щодо оцінювання довговічності та якості підземних металевих трубопроводів в умовах втоми. Встановлено особливості раннього виявлення кризових (передаварійних) ситуацій. Розроблено методику розрахунку ризику в смугі проходження траси трубопроводу з урахуванням його технологічної специфіки і впливу місцевих чинників різної природи на можливість розвитку аварії.

Ключові слова: трубопровід, нормативно-технічна документація, малоциклова втома, якість, ризику, корозія, механічне навантаження.

Разработаны рекомендации относительно повышения качества математических моделей мониторинга сложных объектов техники с низким уровнем динамики процессов, которые характеризуются особенностями раннего выявления кризисных (предаварийных) ситуаций.

Ключевые слова: мониторинг, математическая модель, качество, сложный объект, диагностическая система, уровень динамики, техника.

The presence of fatigue cracks on the surface of metallic underground pipelines sharpens the problem of calculation values of strength characteristics at the action of corrosive environments, that did not find the complete decision nowadays. In this connection it is needed to correct the row of defects and normative and technical documents related to insufficient actuality of corresponding.

In normative documents from exploitation of construction elements on this time the reasonable norms of legitimate values of corrosive damages, reduction of bearing strength of construction elements are absent. It creates complications in the ground of normative terms of exploitation and evaluation of the maximum state of metallic constructions, in planning of charges on exploitation of construction elements and repair and restoration work.

An object of researches is underground metallic pipelines that are in the conditions of corrosion-fatigue destruction. The subject of a study is normative document. It is expedient to specify and perfect on the basis of the information got on results monitoring of functioning of underground metallic pipelines.

Aim of this article – formulation of criteria and scientifically reasonable recommendations for providing of quality of underground metallic pipelines exploitation in the conditions of fatigue and influence of aggressive environment, and also forming of normative principles in sphere of pipeline transport.

Only underground main gas pipelines in the ground electrolyte in the conditions of low cycle fatigue should be considered. For the improvement of normative documents it is expedient to build a complex mathematical model, that will unite the physical and chemical model of corrosion-fatigue processes, model of piling up description of damages in metals and elements theory of risks.

For the modeling of speed increasing of fatigue crack on the middle rectilinear area of kinetic curve equation that binds length of fatigue corrosive crack and amount of cycles of loading to the coefficient of intensity of mechanical tensions is used. Corresponding equation is improved for a metal in corrosive environment and the pH-value of environment, and also electrode potential of metal, is here taken into account.

For the base model of damage accumulation for metals in the conditions of irregular deformation a model that is based on the curvilinear change of damages, and power going is used near description of process of low cycle fatigue, that is a base on criterion of fatigue strength of V. T. Troschenko. Critical specific work that answers the origin of fatigue crack is included in a criterion.

For description of the irregular cyclic loading of metal expression, power descriptions of metal and function of relative value of amplitude intensity of tensions, that characterizes the degree of mechanism influence of fatigue on the fatigue curve is also used. Evolutional equation is written in for the modeling of low cycle fatigue of metals.

Correlation for description of low cycle corrosion fatigue of material in metallic underground pipelines is complemented by equations for the evaluation of risks within the limits of investment project that executes corresponding organization (enterprise).

For optimization of informative streams of enterprise and improvement of the defence system of metallic underground pipelines from a corrosive fatigue the quality functional is used taking a feed-back in methodology of risk evaluation of investment project into account. The aim of that application is the improvement of the corresponding normative and technical providing.

In zones with non-stationary plasticity strain it is expedient to use the criteria of adhesion strength, biocorrosive aggressiveness of soils, mechanical criterion for the coefficient of intensity of tensions (the overstrain of corrosive process takes into account), the criterion of corrosive stability of pitting, criterion correlation for the evaluation of speed of stability corrosion of metal in the defect of isolating coverage together with entered by diagnostic weight of signs and diagnostic value of inspections, that will complement, will specify and will perfect the system of the corrosive monitoring of pipelines and able to be used for control of corrosive process. With their help optimization of terms of construction elements defence of oil and gas industry, that is described and regulated by a state standard, can be conducted.

As a result a new complex mathematical model is offered in relation to upgrading of corrosion protection of metallic underground pipelines from positions of corrosion fatigue, electrochemistry, physics of surface processes, mechanics of destruction and theory of risks. The conducted modeling takes piling up of damages in metals into account and allows to study the mechanisms of distribution of corrosive fatigue cracks in underground metallic pipelines that are in aggressive environments, in particular, in saltwater and ground electrolyte. The results of mathematical modeling are the basis of methodology development and improvement of normative and technical documents for metallic underground pipelines, that are under the action of the regular and irregular cyclic loading in the conditions of low cycle corrosive fatigue.

The joint use of corrosive fatigue criteria and corrosive monitoring criteria of pipelines offered in this article will allow in detail enough from positions of corrosive fatigue, electrochemistry, physics of surface processes, mechanics of destruction and theory of risks to study the mechanisms of distribution of corrosive fatigue cracks in underground metallic pipelines that are in aggressive environments.

Key words: *underground pipeline, metal, damage, cyclic loading, corrosion, low cycle fatigue, quality, risks, normative and technical documentation.*

Металеві підземні трубопроводи (ПТ), за допомогою яких транспортують газоподібні й рідкі вуглеводні, є джерелами небезпеки для довкілля та людини. Небезпека, пов'язана з їх (ПТ) функціонуванням, зумовлена ймовірністю вибухів і токсичністю речовин (природного газу, конденсату, нафтопродуктів). Зокрема, зі збільшенням діаметра газопроводу, на який діють високим тиском, наслідки аварій для людини та довкілля можуть бути катастрофічними. Тому необхідним і складним для трубопровідного транспорту є розроблення надійного та якісного нормативно-технічного забезпечення. Дуже важливим у цій справі процесом є об'єктивний аналіз початкової вихідної інформації. Один з основних обов'язків відповідальної організації – це формування достатньо повного обсягу інформації щодо експлуатованого об'єкта (ПТ) та його конструктивних елементів.

Інформацію вносять у технічний паспорт, який заповнюється упродовж усього життєвого циклу (ЖЦ) об'єкта (ПТ) і складається з двох блоків: стаціонарного

та динамічного. Стаціонарний блок містить загальну технічну інформацію, а також дані про обмеження щодо функціонування об'єкта. Динамічний блок містить інформацію про можливі зміни, зокрема відомості про локальні та капітальні ремонти, плани і звіти щодо експлуатації, а також зміни до документації з першого блока.

Наявність втомних тріщин на поверхні елементів конструкцій (ПТ) загострює проблему розрахункових значень міцнісних характеристик за дії корозійних середовищ, яка повністю не вирішена до сьогодні [1]. У зв'язку з цим потрібно виправити низку недоліків, пов'язаних з недостатньою актуальністю відповідних нормативно-технічних документів (НТД).

Оскільки виникнення вібрацій у трубопровідних системах призводить до нагромадження втомних пошкоджень у металі трубопроводів, що знижує міцнісні властивості матеріалу, то необхідно здійснювати моніторинг і технічне діагностування трубопроводів.

Проблема отримання якісної інформації про стан елемента конструкції важлива для технічної діагностики у трубопровідному транспорті. У зв'язку з цим необхідно розвивати методологію удосконалення нормативно-технічних документів з урахуванням методів теорії ризиків у поєднанні з інформаційними технологіями і комп'ютерним моделюванням.

Зв'язок проблеми з науковими та практичними завданнями:

Практичне завдання: Доцільно доповнити систему чинної нормативно-технічної документації уточненою інформацією про закономірності втомного руйнування елементів конструкцій. Зокрема, на початковій стадії процесу руйнування металу потрібно враховувати поступове виникнення і накопичення мікрodefektів.

Наукове завдання. Необхідно розробляти нові методики та засоби моніторингу підземних металевих трубопроводів і удосконалювати відповідну наявну науково-технічну документацію для їх контролю та діагностування в умовах втомно-корозійного руйнування. Розуміння суті відповідних фізичних процесів дасть змогу оптимізувати умови антикорозійного захисту трубопроводів і уникнути небезпечних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з проблеми. У праці [2] викладено методологію діагностування станів складних промислових об'єктів, яка може широко використовуватись під час створення програмно-апаратних засобів та спеціальних процесів на низових рівнях комп'ютерних систем широкого класу об'єктів управління, зокрема для нафтогазової та атомної промисловостей тощо.

У [3] подано методологію удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем. Запропоновано математичну модель і алгоритм прогнозування ресурсу трубопровідних систем. Математична модель дозволяє розробити нормативні рекомендації щодо оцінювання вібраційного стану трубопроводів [3]. Вплив експлуатаційних чинників на корозійно-втомне руйнування сталей магістральних нафтогазопроводів достатньо повно відображено у працях [1, 4]. Вказані методики доцільно використати для удосконалення нормативних документів [5–7].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрих стосується стаття. У нормативних документах з експлуатації елементів конст-

рукцій нині відсутні обґрунтовані норми допустимих значень корозійних пошкоджень, зменшення несучої здатності елементів конструкцій (ЕК), що ускладнює обґрунтування нормативних термінів експлуатації та оцінювання граничного стану металоконструкцій, планування витрат на експлуатацію ЕК та ремонтно-відновлювальні роботи [1]. Це стосується і підземних трубопроводів.

Об'єкт досліджень – підземні металеві трубопроводи, які перебувають в умовах корозійно-втомного руйнування.

Предмет досліджень – нормативні документи, які доцільно уточнювати та удосконалювати на основі інформації, отриманої за результатами аналізу моніторингу функціонування підземних металевих трубопроводів.

Мета дослідження – створення науково обґрунтованих рекомендацій для забезпечення якості підземних металевих трубопроводів в умовах втоми і впливу агресивного середовища, а також формування нормативних засад у галузі трубопровідного транспорту. Для цього необхідно забезпечити технічну надійність та умови безпечної експлуатації ПТ. Важливим є застосування методів технічного діагностування для контролю корозійних дефектів, а також розроблення ефективних методів оцінювання працездатності експлуатованого матеріалу та залишкового ресурсу ПТ. Для розв'язання такого типу задач істотно встановити ступінь деградації фізико-механічних властивостей трубопровідних сталей, оскільки для обґрунтування подальшої безпечної роботи ПТ доцільно враховувати не тільки початкові, але й актуальні характеристики експлуатованого металу.

Основна частина. Нормативні документи (НД) [5–7] щодо технічного діагностування підземних металевих трубопроводів у корозійному (грунтовому) середовищі повинні враховувати етапи [3], трактування яких доцільно удосконалити з урахуванням сучаснішого нормативно-методологічного забезпечення:

- уточнення розташування зон найбільшого корозійного й ерозійного зношення і значень мінімальної товщини стінок деталей у цих зонах і однотипних деталей в інших зонах;

- вибіркова перевірка відповідності міцності та пластичності металу в холодному стані вимогам технічних умов;

– розрахункове визначення напружень від внутрішнього тиску в зонах мінімальної товщини і допустимість їх з урахуванням фактичних характеристик металу (коефіцієнта запасу міцності на межі плинності не менше за 1,5);

– розрахункове або експериментальне визначення зон розміщення найбільшого циклічного напруження і відповідні їх значення залежно від кількості циклів згідно зі “СНП 2.04.12-86. Розрахунок на міцність сталевих трубопроводів”, а також [5];

– у випадках виявлення корозійно-втомних пошкоджень розрахунок на втому повинен виконуватися з урахуванням вимог у частині вибору допустимих параметрів щодо циклічних напружень і фактичної кількості циклів нагромадження пошкоджень [1, 4, 8];

– перевірка фактичної товщини стінок розтягнутої та нейтральних зон.

У разі зменшення міцнісних характеристик металу нижче від вимог НД, але збереження задовільних характеристик пластичності й ударної в'язкості, продовження експлуатації з проектними параметрами допускається за задовільних результатів перевіряльного розрахунку на міцність від внутрішнього тиску (запас міцності відносно фактичної межі плинності не менше за 1,5) і дотримання вимог НД. Проте чинні нормативні документи ґрунтуються на оцінюванні граничнодопустимих міцнісних характеристик, не враховуючи достатньої кількості даних діагностики змін у процесі експлуатації.

Критеріями, що характеризують технічний стан і залишковий ресурс трубопроводу, є такі параметри: тиск, температура, робоче середовище, механічне навантаження, вібронавантаження, втомна міцність, зношування у процесі експлуатації [3].

Під час складання переліків трубопровідних систем визначальною характеристикою є функціональна приналежність трубопроводу [3]. Для цього потрібна систематизація трубопроводів і встановлення критеріїв їх міцності та надійності з урахуванням приналежності ПТ до певного типу [3]. Прикладом можуть бути магістральні газопроводи, магістральні нафтопроводи, трубопроводи сталеві підземні системи холодного і гарячого водопостачання тощо.

Обмежимося розглядом підземних магістральних газопроводів, які містяться у ґрунтовому електроліті в умовах малоциклової втоми. Для удосконалення НД [5–7] доцільно побудувати комплексну математичну модель, яка об'єднає фізико-хімічну модель втомно-корозійних процесів типу [1, 4], методику нагромадження пошкоджень [8] і теорію ризиків [9].

Для швидкого росту втомної тріщини на середній прямолінійній ділянці кінетичної кривої використовуємо рівняння Періса [4]:

$$da/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

де a – довжина тріщини; N – кількість циклів навантаження; C , n – сталі; K – коефіцієнт інтенсивності напружень.

Співвідношення (1) удосконалено [10]:

$$da/dN = \Phi(C_i, P_j(\sigma), A_n(\tau), B_m(S)) . \quad (2)$$

де C_i – константи, що характеризують систему “матеріал – середовище”; $P_j(\sigma)$ – параметри, що характеризують напружено-деформований стан матеріалу і є функціями прикладених до тіла зовнішніх зусиль; $A_n(\tau)$ – параметри, які визначають у часі τ фізико-хімічні процеси, що проходять між деформованим металом і корозійним середовищем; $B_m(S)$ – параметри, що характеризують стан поверхонь матеріалу S , які утворюються під час руйнування. Наближено зону передруйнування характеризують трьома параметрами K_I , pH , E_m і рівняння для визначення швидкості росту корозійної тріщини набуде вигляду [10]:

$$da/dN = \Phi(C_i, K_I, pH, E_m), \quad (3)$$

де pH – водневий показник середовища, K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщин нормального розриву; E_m – електродний потенціал металу.

Емпірична критеріальна формула для розрахунку границі корозійної втоми металів має вигляд [4]:

$$s_{ve} = s_{vp} [1,128 - 2,849 \lg(Q_{dr}/Q_{cor})], \quad (4)$$

де s_{vp} , s_{ve} – границя втоми (механічне напруження) на повітрі та у середовищі відповідно; Q_{dr} , Q_{cor} – кількість електрики, що витрачається на додаткове розчинення деформованого металу за s_{vp} та на його корозію за відсутності деформації. Для нержавіючих сталей, які використовуються у трубопроводах, непевності оцінювання s_{vp} , s_{ve} не перевищують 8 %.

За базову модель накопичення пошкоджень для металів в умовах нерегулярного деформування (втоми) взято модель Менсона–Хелфолда, що основана на кривій пошкоджуваності [8]:

$$D_s = (N_s / N_{fs})^q, \quad q = (N_{f(s-1)} / N_{fis})^b, \\ b = m + a \cdot \text{sign}(N_{f2} / N_{f1} - 1). \quad (5)$$

де D_s – пошкоджуваність матеріалу на s -му ступені (ділянці) деформування ($s = 1, 2, 3, \dots, ns$); N_s – кількість циклів деформування на s -му ступені; N_{fs} – кількість циклів до руйнування зразка за режиму деформування, що відповідає s -му ступеню; q , b , m , a – емпіричні константи; для низки матеріалів (металів) $b \approx 0,4$.

Енергетичний підхід до опису процесу малоциклової втоми ґрунтується на критерії В. Т. Трошенка і відповідне співвідношення для симетричного регулярного циклічного навантаження має вигляд [11, 12]:

$$\sum_{i=1}^{N_f} (\Delta W_{di} - \Delta W_{ni}) = W_{fe} \Rightarrow const, \quad (6)$$

де W_{fe} – критична питома робота, яка відповідає зародженню втоми тріщини; W_{di} – повна питома робота з урахуванням девіатора напружень і девіатора пружних деформацій; W_{ni} – “безпечна” частина повної накопиченої питомої роботи; N_f – кількість циклів до зародження втоми тріщини ($i = 1, 2, 3, \dots, N_f$).

Для нерегулярного циклічного навантаження на етапі часу $\Delta t_s = t_{s+1} - t_s$ (s -й ділянці) співвідношення, аналогічне (6), записується у вигляді [13]:

$$\Delta W_s = \Delta W_{se} (1 - f_s(g)), \quad g = s_u / s_{yu}. \quad (7)$$

де ΔW_s – “небезпечна” частина повної питомої енергії пружного деформування W_{se} , витрачена на створення мікроефектів; s_u – інтенсивність тензора напружень; s_{yu} – інтенсивність тензора напружень, яка відповідає умовному тензору втоми матеріалу; $f_s(g)$ – функція відносного значення амплітуди інтенсивності напружень, яка на s -й ділянці деформування характеризує ступінь впливу механізмів втоми на криву втоми.

Еволюційне рівняння для опису малоциклової втоми металів має вигляд [13]:

$$D_z = \sum \Delta D_s = \sum_{s=1}^{ns} \Delta D_s;$$

$$\Delta D_s = f_s(b) (z_s)^{a_s} (1 - D_s)^{-r_s} \Delta z_s (a_s + 1) / (r_s + 1);$$

$$D_z \Rightarrow D_f; \quad (8)$$

$$b = s / s_u, \quad s = s_{kk} / 3, \quad f_s(b) = \exp(-k_s b),$$

$$z_s = (W_s - W_a) / (W_{fp} - W_a),$$

$$\Delta z_s = \Delta W_s / (W_{fp} - W_a), \quad \Delta W_s = r_{ij} \Delta e_{sij}. \quad (9)$$

де D_z , D_f – інтегральна пошкоджуваність матеріалу та її критичне значення; W_a – значення питомої енергії W_s в кінці першої стадії процесу нагромадження втомних пошкоджень за малоциклової втоми (МЦВ); W_{fp} – локальне значення питомої енергії нагромадження втомних пошкоджень, що відповідає створенню макроскопічної тріщини у разі розвитку МЦВ; r_{ij} , e_{ij} – компоненти тензорів залишкових мікронапружень і девіатора пружних деформацій відповідно; s_{ii} , s – головні компоненти і перший інваріант тензора макроскопічних напружень; a_s , r_s , k_s – параметри (фізичні характеристики) матеріалу (визначаються експериментально).

За критерій закінчення стадії розвитку розсіяних мікропошкоджень і створення мікротріщини можна прийняти критерій досягнення пошкодження критичного значення D_f (8).

Співвідношення (4)–(9) доцільно використовувати для опису МЦВ матеріалу і у зонах з розвиненими нестационарними пластичними деформаціями, і в пружних зонах матеріалу (металу) за циклічного навантаження.

Співвідношення (1)–(9) для опису малоциклової корозійної втоми (МЦКВ) матеріалу в металевих ПТ доповнимо співвідношеннями для оцінювання ризиків у межах інвестиційного проекту.

Для оптимізації інформаційних та платіжних потоків P_l підприємства і покращення системи захисту технології використаємо, аналогічно як у [15, 16], функціонал якості $J(\cdot)$ з урахуванням оберненого зв'язку і методику оцінювання ризику R_{NU} інноваційного проекту [9, 17], метою застосування яких є удосконалення технології антикорозійного захисту металевих ПТ:

$$J(P_l, FB, R_{NU}) = \int_{t_0}^{t_k} f(\bar{y}, \bar{u}, \bar{s}, \Omega) dt \Rightarrow opt, \quad (10)$$

$$R_{NU} = \sum_{g=1}^M m(x_g) \cdot R_g =$$

$$= \sum_{g=1}^M m(x_g) \cdot \max \min(r_{g,k}, w_{g,k-1}) \Rightarrow \min, \quad (11)$$

де \bar{y} – вектор заданих впливів ($y_j(t)$ – компоненти вектора, $j = 1, 2, \dots, n$); \bar{u} – вектор керувань; \bar{s} – вектор невизначених збурень; $[t_0, t_k]$ – інтервал часу, в якому розглядається процес формування оптимальних значень інформаційних та фінансових потоків P_l , $l = 1, 2, \dots, m$; m – загальна кількість інформаційних та фінансових потоків, пов'язаних з цим інвестиційним проектом; $f(\bar{y}, \bar{u}, \bar{s}, \Omega)$ – функція, що відображає показник якості; FB – функція, яка характеризує обернений зв'язок (*Feed-back*) між потоками P_l і оточенням підприємства з урахуванням думок експертів; Ω – коефіцієнт чутливості проекту; x_g – пріоритети факторів ризику; $m(x_g)$ – функція перерахунку пріоритетів ваги, в результаті чого $m(x_g)$ набуває для статистично невизначених якісних показників сенсу ймовірності реалізації факторів ризику (відношення кількості реалізації фактора ризику до загальної кількості розглянутих подій); $r_{g,k}$ – оцінка k -м експертом g -го фактора; R_g – узагальнена експертна оцінка g -го фактора ризику; $w_{g,k} = q(d_{\min}, d_{\max})$ –

елемент числової спадної послідовності; d_{\min} , d_{\max} – мінімальна і максимальна оцінки експертів; $q(d_{\min}, d_{\max})$ – функція згортки оцінок експертів (зокрема, середньоарифметична згортка). Тут символ opt відповідає умові оптимальності функціонала $J(\cdot)$.

Доповнимо систему (1)–(11) інформацією про параметри, які характеризують конкретний підземний трубопровід в умовах експлуатації. Для цього необхідно врахувати у співвідношеннях (10), (11) вплив на надійність Y_N ПТ внутрішнього робочого тиску p_s , напружень S_y від температурних перепадів ΔT , нерівномірності укладання трубопроводу в траншею, зокрема [18]:

$$r_K = \frac{8(H + \Delta h)}{L^2 + 4(H + \Delta h)^2};$$

$$Y_N = Y(s_y, p_s, \Delta T, r_K); \quad b_Y = \frac{Y_N}{Y_S}, \quad (12)$$

де r_K – кривизна труби на ділянці трубопроводу; H – проектна зміна позначки розташування трубопроводу; Δh – величина похибки укладання трубопроводу по глибині; L – довжина хвилі трубопроводу з однаковою кривизною r_K ; Y_N – функція надійності ділянки трубопроводу (математичне сподівання резерву міцності); Y_S – стандартне (нормативне) значення резерву міцності; b_Y – характеристика безпеки.

Основні кількісні критерії для оцінювання надійності інвестиційного проекту (удосконалення технології антикорозійного захисту металевих ПТ) сформулюємо аналогічно, як у праці [9], взявши до уваги: $DROI$ – дискontований коефіцієнт рентабельності інвестицій у проект; DPP – термін окупності проекту з урахуванням дискontування; чутливість проекту SR – запас міцності проекту за його ключовими параметрами:

$$N_{DROI} = NVP / DCF_{INV} = PI - 1; \quad N_{DPP} = 1 - DPP / T_p;$$

$$SR = (SR_C \cdot SR_R \cdot SR_D \cdot SR_S \cdot SR_{INV})^{1/5}. \quad (13)$$

де DCF_{INV} – дискontований грошовий потік від інвестиційної діяльності; NPV – чиста приведена вартість проекту; PI – індекс дохідності проекту; T_p – горизонт розрахунку показників ефективності; N_{DROI} , N_{DPP} – показники надійності проекту за критеріями $DROI$ і DPP ; C – сума прямих витрат на виробництво одиниці продукції/послуги (у грошовому вираженні); INV – обсяг інвестицій (в грошовому вираженні); SR_C , SR_R , SR_D , SR_S , SR_{INV} – оцінки чутливості проекту за ключовими параметрами C , R_{NU} (11), D_z (8), S_{ve} (4), INV .

Оцінка чутливості SR набуває значень від 0 до 1 і характеризує вірогідність отримання позитивної NPV

проекту в результаті можливих відхилень ключових параметрів проекту від цільових значень. Що вище значення SR проекту, то менш чутливий проект до зміни ключових параметрів і більша вірогідність отримання позитивної NPV . Значення чутливості SR оцінюється на основі аналізу запасу міцності проекту, розрахованого за результатами аналізу чутливості проекту. Під запасом міцності проекту розуміють критичну (граничну) зміну кожного з ключових параметрів проекту (C , R_{NU} , D_z , S_{ve} , INV), виражену у відсотках від базової величини, за якої значення NPV проекту наближається до 0 [9].

Загальний показник надійності інвестиційного проекту N_Z за кількісними критеріями визначається аналогічно, як у праці [9]:

$$N_Z = N_{DROI} \times N_{DPP} \times SR. \quad (14)$$

У зонах з нестационарними пластичними деформаціями доцільно використати критерії адгезійної міцності, біокорозійної агресивності ґрунтів, механічний критерій для коефіцієнта інтенсивності напружень (враховує перенапруження корозійного процесу), критерій корозійної стійкості пітингу, критеріальне співвідношення для оцінювання швидкості залишкової корозії металу в дефекті ізоляційного покриття разом з уведеними діагностичною вагою ознак і діагностичною цінністю обстежень, які доповняють, уточняють та удосконалюють систему корозійного моніторингу трубопроводів [14] і можуть бути використані для контролю корозійного процесу та розроблення рекомендацій щодо антикорозійного захисту. З їх допомогою може проводитись оптимізація умов захисту елементів конструкцій нафтогазової промисловості, які описані та регламентовані державним стандартом [6].

Сумісне використання критеріїв (1)–(13) і критеріїв корозійного моніторингу трубопроводів [14] дає змогу доволі детально з позицій корозійної втоми, електрохімії, фізики поверхневих процесів, механіки руйнування і теорії ризиків вивчати механізми поширення корозійних втомних тріщин у підземних металевих трубопроводах, розміщених в агресивних середовищах, зокрема, у морській воді та ґрунтовому електроді. На основі отриманих результатів можна удосконалити нормативно-технічні документи [5, 6, 7] для металевих трубопроводів в умовах корозійної малоциклової втоми.

Висновки. Запропоновано нову комплексну математичну модель щодо підвищення якості антикорозійного захисту металевих підземних трубопроводів

з позицій корозійної втоми, електрохімії, фізики поверхневих процесів, механіки руйнування і теорії ризиків. Проведене моделювання враховує нагромадження пошкоджень у металах і дає змогу вивчати механізми поширення корозійних втомних тріщин у підземних металевих трубопроводах, розміщених в агресивних середовищах, зокрема, у морській воді та ґрунтовому електроліті. Отримані результати математичного моделювання є основою розроблення методик удосконалення нормативно-технічних документів для металевих трубопроводів, розміщених в умовах малоциклової корозійної втоми.

Сумісне використання запропонованих у цій праці критеріїв корозійної втоми і критеріїв корозійного моніторингу трубопроводів [14] дасть змогу доволі детально з позицій корозійної втоми, електрохімії, фізики поверхневих процесів, механіки руйнування і теорії ризиків вивчати механізми поширення корозійних втомних тріщин у підземних металевих трубопроводах, розміщених в агресивних середовищах.

Відповідні результати дадуть можливість прогнозувати зміну корозійного стану металу трубопроводу з часом та розраховувати ресурс працездатності локальних ділянок і всього трубопроводу загалом.

1. Петрина Ю. Д. Вплив експлуатаційних чинників на корозійно-втомне руйнування сталей магістральних нафтогазопроводів / Ю. Д. Петрина, Д. Ю. Петрина, О. Л. Козак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 3(44). – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnng_2012_3_14. 2. Ширмовська Н. Г. Моделювання процесів діагностування станів складних об'єктів управління комп'ютерних систем / Н. Г. Ширмовська, Я. М. Николайчук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2010. – № 688. – С. 219–224. 3. Кипоренко А. С. Совершенствование нормативного обеспечения эксплуатационной безопасности трубопроводных систем атомных электростанций / Кипоренко А. С. – Харьков: Украинская инженерно-педагогическая академия, 2011. – 139 с. 4. Похмурський В. І. Корозійна втома металів та сплавів / В. І. Похмурський, М. С. Хома. – Львів: Сполом, 2008. – 300 с. 5. ДСТУ Н Б В.2.3-21:2008. Магістральні трубопроводи. Настанови. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – Чинний з 01.01.2009 р. 6. ДСТУ 4219-2003 Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. 7. ДСТУ Б В.2.5-30:2006. Трубопроводи сталеві підземні систем холодного і гарячого водопостачання. Загальні

вимоги до захисту від корозії. – К., 2006. – 112 с. 8. Шукаєв С. М. Оцінка довговічності металевих сплавів в умовах багатовісного малоциклового блокового деформування / С. М. Шукаєв, К. В. Панасовський // Пробл. прочності. – 2011. – № 2. – С. 47–60. 9. Горбунов Д. В. Риски инновационных проектов и методы их оценки / Д. В. Горбунов // Вектор науки ТГУ. – Тольяти, 2014. – № 3 (29). – С. 123–126. 10. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень // І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: Редакція журналу "Фізико-хімічна механіка матеріалів", 1999. – 340 с. 11. Волков И. А. Модель поврежденной среды для оценки долговечности конструкций при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости / И. А. Волков, М. Н. Ереев, Ю. Г. Коротких, И. С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 54–60. 12. Троценко В. Т., Фомичев Л. А. Энергетический критерий усталостного разрушения // Проблемы прочност. – 1993. – № 1. – С. 3–10. 13. Большухин М. А. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости / М. А. Большухин, Д. Л. Зверев, В. Б. Кайдалов, Ю. Г. Коротких // Проблемы прочност. и пластичности: межвуз. сб. / ННГУ. – 2010. – № 72. – С. 28–35. 14. Чабан О. Моделювання та якість моніторингу діагностичних систем / Олеся Чабан, Лариса Юзевич // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник / відповід. ред. Б. І. Стадник. – Львів : Видавництво Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2015. – Вип. 76. – С. 92–98. 15. Krap N. P. Methodological aspects of management of projects of tourist flows / N. P. Krap, V. M. Yuzevych // Modern scientific research and their practical application. Research Bulletin SWorld. Published by S. V. Kupriyenko. – 2013. – Vol. J2130, November. – P. 155–160. 16. Чабан О. П. Математичне моделювання діагностичних ознак для забезпечення системи функціонування медичних послуг / О. П. Чабан, В. М. Юзевич // Системи обробки інформації. – Харків, 2015. – Вип. 2(127) – С. 108–113. 17. Юзевич В. М. Економічний аналіз рівнів ефективності та якості інтернет-платіжних систем підприємства / В. М. Юзевич, О. В. Ключак // Бізнес Інформ. – 2015. – № 1. – С. 160–164. 18. Пічугін С.Ф. Надійність лінійної частини підземних магістральних трубопроводів / С. Ф. Пічугін, О. Є. Зима, П. Ю. Винников // Зб. наук. праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип. 1(43). – С. 17–28.