

# Удосконалення нормативних вимог щодо забезпечення якості підземних газопроводів в умовах корозійної втоми

## Improvement of Regulatory Requirements for Ensuring the Quality of Underground Gas Pipelines in Conditions of Corrosion Fatigue

Лариса Юзевич<sup>1</sup>, Руслан Скриньковський<sup>2</sup>, Микола Микийчук<sup>1</sup>  
Larysa Yuzevych, Ruslan Skrynkovskyy, Mykola Mykyuchuk

<sup>1</sup> *Lviv Polytechnic National University*  
12 Stepana Bandery Street, Lviv, 79013, Ukraine


<sup>2</sup> *Lviv University of Business and Law*  
99 Kulparkivska Street, Lviv, 79021, Ukraine

DOI: 10.22178/pos.26-1

JEL Classification: L95,  
L99

Received 10.08.2017  
Accepted 05.09.2017  
Published online  
13.09.2017

Corresponding Author:  
Ruslan Skrynkovskyy  
uan\_lviv@ukr.net

© 2017 The Authors.  
This article is licensed  
under a [Creative Commons Attribution](#)  
4.0 License 

**Анотація.** У статті розроблено рекомендації для удосконалення нормативних документів, які стосуються якості підземних металевих трубопроводів (газопроводів) в умовах втоми і впливу агресивного середовища з урахуванням катодного (електрохімічного) захисту. Встановлено, що в основі інформаційного забезпечення нормативних документів лежить методика, яка включає такі основні критерії: значення мінімальної густини струму катодного захисту; мінімальний захисний потенціал; максимальний захисний потенціал, мінімальне зміщення захисного потенціалу; критерій міцності матеріалу труби; критерій міцності міжфазового шару між металом і покриттям; критерій міцності металу у дефекті ізоляційного покриття. З'ясовано, що система «металева труба – ізоляційне діелектричне покриття» характеризується такими основними процедурами, як: ідентифікування небезпек; різні варіанти асиметрії циклу навантаження; оцінювання граничних та оптимальних значень потенціалів і струмів для системи катодного захисту трубопроводу. Перспективою подальших досліджень у даному напрямі є визначення комплексного показника якості та надійності лінійної частини підземних магістральних газопроводів на основі результатів дослідження (поданого інформаційного забезпечення).

**Ключові слова:** сталевий газопровід; нормативно-технічна документація; поляризаційний потенціал; корозійна втома; якість; інформаційне забезпечення.

**Abstract.** The article develops recommendations for improvement of normative documents concerning the quality of underground metal pipelines (gas pipelines) under conditions of fatigue and the impact of an aggressive environment, taking into account cathodic (electrochemical) protection. It is established that the basis of information provision of normative documents is the method which includes the following main criteria: the value of the minimum current density of cathode protection; minimum security potential; maximum protective potential, minimal displacement of protective potential; strength criteria of pipe material; criteria of strength of phase layer between the metal and the coating; the strength of the metal in the defect of the insulation coating. It has been found out that the system "metal pipe - insulating dielectric coating" is characterized by such basic procedures as: identification of hazards; various variants of load asymmetry; evaluation of the boundary and optimal values of potentials and currents for the system of cathodic protection of the pipeline. The prospect of further research in this area is determination of the complex indicator of quality and reliability of the linear part of underground main gas pipelines on the basis of research results (submitted information support).

**Keywords:** steel gas pipeline; normative and technical documentation; polarization potential; corrosion fatigue; quality; information support.

## ВСТУП

Газотранспортна система України характеризується: 1) високим рівнем моральної та фізичної зношеності технологічного обладнання та устаткування, зокрема, газопроводів; 2) низькою ефективністю роботи (низький коефіцієнт корисної дії) газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій, що зумовлює досить значні виробничо-технологічні витрати газу для потреб його транспортування тощо [1].

Ефективне функціонування газопроводів у системі «загрози – інформація – ресурс – рекомендації» неможливе без удосконалення нормативно-технічного забезпечення, зокрема [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Основні загрози щодо підземних металевих газопроводів стосуються міцності, надійності, корозії, стрес-корозії, втоми, корозійної втоми, дефектів, зокрема, пітингів, каверн, тріщин [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що розробка і обґрунтування методу розрахунку ресурсу трубопроводів з урахуванням взаємного впливу корозії і змінних механічних напружень – актуальна науково-технічна проблема, рішення якої має теоретичне і практичне значення, оскільки сприяє зниженню ризиків аварій і скороченню витрат на забезпечення надійної експлуатації трубопроводів [9, 10].

Розглянуто фізичні механізми руйнування трубопроводів, досліджено механізми і закономірності корозії в трубних сталях, приведено методики і методи прогнозування параметрів втомної міцності трубопроводів, включаючи [9, 10]:

- 1) критерії опору втоми;
- 2) термоактиваційний метод прогнозування втомного руйнування;
- 3) оцінка міри пошкоджуваності металевій стінки трубопроводу;
- 4) прогнозування залишкового ресурсу на основі кінетичної теорії втоми;
- 5) оцінка стану поверхні і корозії на опір втомному руйнуванню.

У стандартах [2, 3, 4, 5, 6, 7] і монографії [10] використовуються співвідношення лінійної механіки руйнування. Недоліки лінійної механіки руйнування [10]:

- 1) наукові і технічні досягнення, зв'язані з нанотехнологіями, в ній не використовуються;
- 2) оцінка залишкового ресурсу в механіці руйнування робиться на основі:
  - a) коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_S$ ;
  - b) їх зміни  $\Delta K$ ;
  - c) швидкості росту тріщини  $da/dN$ ;
  - d) формул, наприклад, закону Періса-Ердогана, Forman Equation – Wheeler Model Crack Retardation, ASTM E647 USA NASGRO standard.

На основі підходів механіки деформівного твердого тіла, фізики поверхневих явищ та електрохімії сформульовано співвідношення математичної моделі для оцінювання поверхневої енергії пластичного деформування та перенапруження реакції розчинення металу у вершині тріщини для навантаженої внутрішнім тиском труби, яка знаходиться у водному розчині електроліту [11]. Дана модель враховує коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_S$ , коефіцієнт концентрації напружень, поверхневу енергію пластичного деформування і стосується діапазону механічних навантажень металу від межі текучості матеріалу до межі, яка встановлена нормативними документами для елемента конструкції.

Тому *метою статті* є розроблення рекомендацій для удосконалення нормативних документів, які стосуються якості підземних металевих трубопроводів (газопроводів) в умовах втоми і впливу агресивного середовища.

Для досягнення окресленої мети необхідно побудувати концептуальну модель процесів і розробити рекомендації щодо методів контролю поляризаційного потенціалу і міцності металу трубопроводу з урахуванням корозії, нагромадження дефектів та їх поширення у металі трубопроводу.

Об'єкт дослідження – металеві підземні трубопроводи (газопроводи), які заходяться в умовах катодної поляризації і корозійно-втомного руйнування.

Предмет дослідження – нормативні документи типу [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], які доцільно уточнювати та удосконалювати на основі інформації, отриманої за результатами моніторингу функціонування металевих підземних трубопроводів (газопроводів).

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### Результати дослідження щодо інформаційного забезпечення контролю поляризаційного потенціалу підземних трубопроводів

Для захисту підземних газопроводів та і інших підземних металевих споруд від корозії широко використовують електрохімічний захист за допомогою поляризуючого струму,

при якому поверхня металу не руйнується в агресивному середовищі протягом тривалого часу [10, 12] (рис. 1).

При цьому електричний потенціал трубопроводу відносно середовища, називають поляризаційним потенціалом  $U=U_p$ , який є основним критерієм, що визначає ступінь захисту від корозії [10, 12, 13].

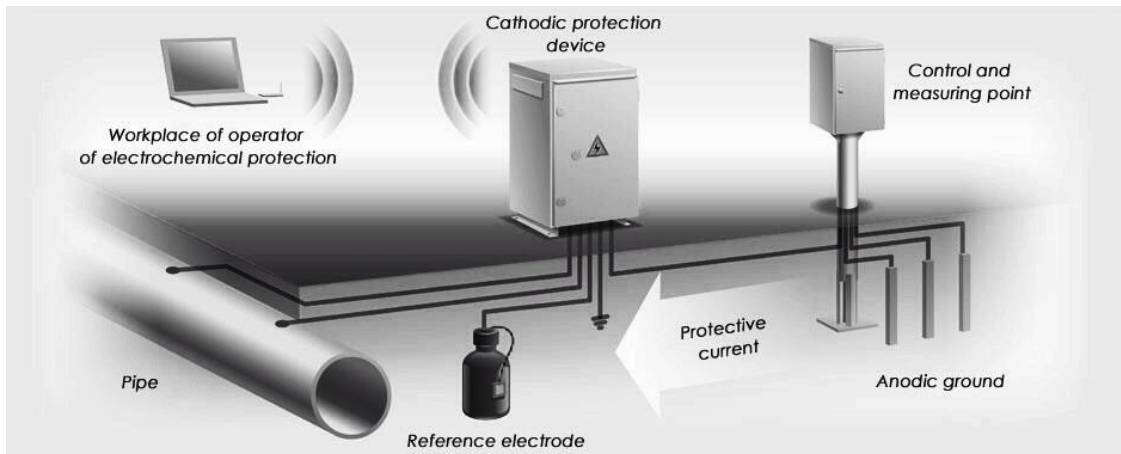


Рисунок 1 – Система електрохімічного (катодного) захисту сталевих трубопроводів (газопроводів) анодним заземлювачем [13]

Примітки: *control and measuring point* – контрольно-вимірювальний пункт; *anodic ground* – анодний заземлювач; *protective current* – захисний струм; *reference electrode* – електрод порівняння; *pipe* – труба; *cathodic protection device* – пристрій катодного захисту; *workplace of operator of electrochemical protection* – робоче місце оператора електрохімічного захисту

За сучасними нормативами для сталеві труби у ґрунті поляризаційний потенціал  $U_p$  повинен знаходитись у межах від  $-0,85$  В до  $-1,15$  В відносно мідносульфатного електроду порівняння [3, 4, 12]. Важливою проблемою

електрохімічного захисту є контроль  $U_p$  на усій поверхні металу [3, 4, 12]. Вимірювання  $U_p$  пов'язано з проблемою вилучення падіння напруги у ґрунті між поверхнею металу та електродом порівняння (рис. 2).

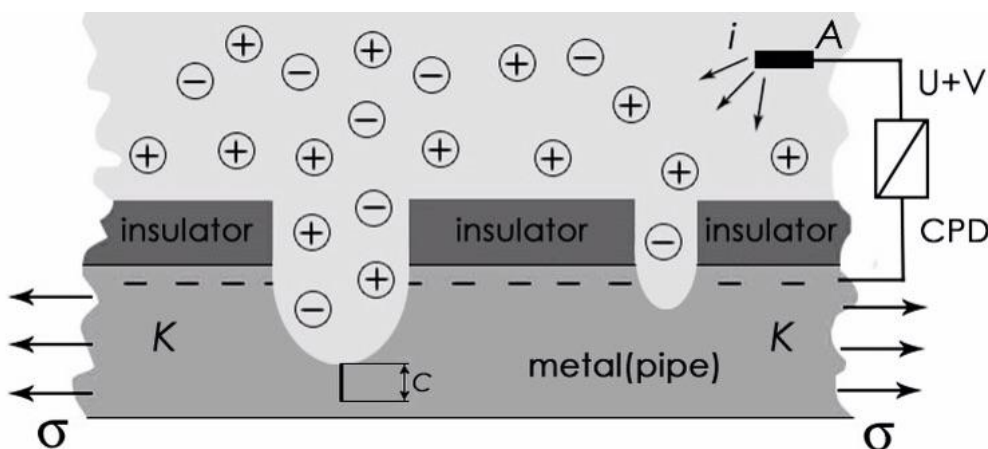


Рисунок 2 – Поверхневий шар металу з діелектричним покриттям в розчині електроліту

Примітки: К – катод, А – анод; *metal (pipe)* – метал труби; *insulator* – діелектрик (покриття); *CPD (cathodic protection device)* – пристрій катодного захисту;  $U+V$  – різниця потенціалів;  $\sigma$  – механічне напруження;  $i$  – електричний (корозійний) струм;  $c$  – глибина тріщини

Враховуючи різницю між падінням напруги при постійному струмі і падінням напруги на змінному струмі, отримуємо вираз для визначення поляризаційної складової [12]:

$$\begin{aligned} U_P &= U_{MG} - k_P V_{MG}, \\ k_P &= U_{GG} / V_{GG} \end{aligned} \quad (1)$$

де  $k_P$  – коефіцієнт гармоніки змінного струму, що натікає у трубопровід на даній ділянці, визначається відношенням постійної  $U_{GG}$  і змінної  $V_{GG}$  напруг у ґрунті поперек траси;

$U_{MG}$  і  $V_{MG}$  – напруги між металом і електродом порівняння, виміряні при постійному і змінному струмі відповідно.

У статті [12] представлено експериментальні дані вимірюваних напруг  $U_{MG}$ ,  $V_{MG}$ ,  $U_{GG}$ ,  $V_{GG}$ ,  $U_P$  на трасі магістрального трубопроводу в зоні дії установки катодного захисту. При цьому середні значення напруг  $U_{ijS}$  і  $k_P$  наступні:

$$\begin{aligned} U_{MGS} &= -1,104; \\ V_{MGS} &= 0,297; \\ U_{GGS} &= -0,039; \\ V_{GGS} &= 0,139; \\ U_{PS} &= -1,016; \\ k_{PS} &= -0,28 \end{aligned} \quad (2)$$

Проведено кореляційний аналіз експериментальних даних [12] і встановлено коефіцієнти кореляції  $K_i$ :

$$\begin{aligned} K_1(U_P, U_{MG}) &= 0,91; \\ K_2(U_P, V_{GG}) &= 0,29; \\ K_3(V_{GG}, V_{MG}) &= -0,93 \end{aligned} \quad (3)$$

Із (2) видно оцінки числових значень і знаки параметрів  $U_{MG}$ ,  $V_{MG}$ ,  $U_{GG}$ ,  $V_{GG}$ ,  $U_P$ . Як видно з отриманих результатів вимірювань (2) і оцінок кореляційних зв'язків (3), запропонований метод вимірювань напруг, в основі якого співвідношення (1), можна використовувати для контролю поляризаційного потенціалу

$U_P$  підземних трубопроводів (зокрема, газопроводів) у електропровідному середовищі.

Рекомендована величина густини анодного струму визначається як (4):

$$I_A = (3 \div 5) \times I_K, \quad (4)$$

де  $I_K$  – густина струму корозії, А/м<sup>2</sup>.

Опосередкованим показником якості катодного захисту є значення потенціалу, або його зміщення. Ступінь захисту підземного металевого трубопроводу в залежності від значення катодного зміщення потенціалу (максимального захисного потенціалу) і визначається як (5):

$$\Delta U_{Z, \min} = -0,059 \lg(I_K / I_{A, \max}), \quad (5)$$

де  $I_{A, \max}$  – максимальна густина струму захисту, що є припустимою.

Максимальний захисний потенціал визначають виходячи з умов недопустимості виділення водню на поверхні трубопроводу й водночас, зменшення витрат електричної енергії. Максимальне значення захисного потенціалу для трубопроводів з різними ізолюючими покриттям, дорівнює (6):

$$U_{Z, \max} = -(2,5 \div 3,5), V. \quad (6)$$

### Результати дослідження щодо інформаційного забезпечення міцності підземних трубопроводів в умовах корозійної втоми

Обмежимося розглядом труби зі сталі в ґрунтовому електроліті. Труба захищена ізоляційним покриттям і перебуває в умовах корозійної втоми. Під впливом навантажень покриття руйнується і виникає дефект (рис. 2). Розглянемо дефекти типу каверни (пітинга), у вершині якої знаходиться тріщина глибини  $s$  (рис. 2 і рис. 3).

Важливою особливістю дефекту типу каверна (пітинг) – тріщина є те, що каверна утворена в результаті корозії, а тріщина – під дією циклічного механічного навантаження. Деформації за впливу двох процесів (зокрема, корозії і втоми) сумуються адитивно.

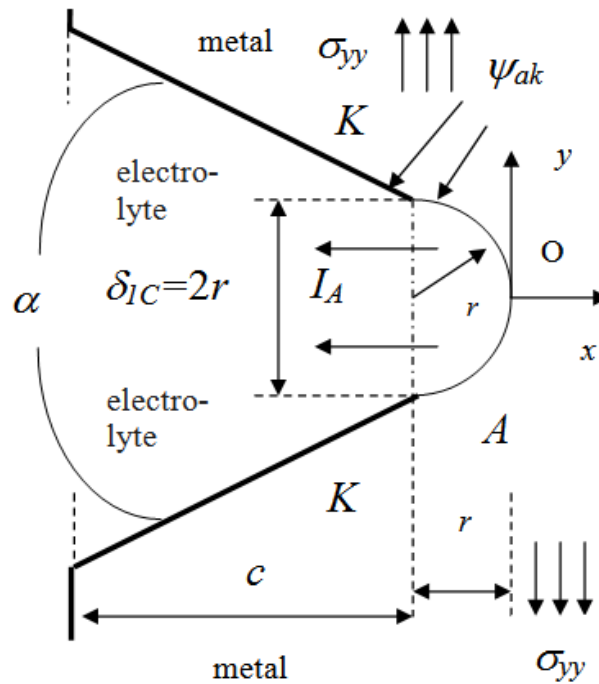


Рисунок 3 – Пітинг ( $h$ ) з тріщиною ( $c$ ) у трубі з відзначенням катодної (K) та анодної (A) ділянок [11]

Примітки:  $(h+c+r)$  – загальна глибина дефекту;  $\alpha$ ,  $\delta_{IC}$  – кут і розкриття у вершині тріщини;  $\Delta\psi_{ak}$  – різниця потенціалів між анодною і катодною частинами;  $I_A$  – густина анодного корозійного струму.

На межі метал – діелектричне покриття виконуються критеріальні співвідношеннями, які відображають специфіку поверхневих шарів у формуванні поверхневої  $\gamma$  та міжфазової  $\gamma_m$  енергій [13]. Зокрема:

$$\begin{aligned} \Delta\gamma &= \gamma_\zeta - \gamma_n < \Delta\gamma_g, \\ \Delta\gamma_m &= \gamma_{m\zeta} - \gamma_{mn} < \Delta\gamma_{mg}. \end{aligned} \quad (7)$$

Ці співвідношення (7) можна вважати локальними критеріями міцності для навантажених зразків, якщо значення поверхневої  $\gamma$  та міжфазової  $\gamma_m$  енергій, тобто  $\gamma_n$ ,  $\gamma_{mn}$  відповідають ненавантаженому стану, а  $\gamma_\zeta$ ,  $\gamma_{m\zeta}$  – межі міцності. Тут  $\Delta\gamma_g$ ,  $\Delta\gamma_{mg}$  – граничні значення відхилень параметрів, які встановлюють експериментально. Методика розрахунку енергетичних характеристик поверхневих і міжфазних шарів, які входять у (7), представлена у працях [13, 15, 16]. Співвідношення (7) доцільно враховувати також для навантажених металів у вершині дефектів типу каверн, тріщин, пітингів, заповнених розчином електроліту (зокрема, ґрунтового).

Зміна технічного стану металу трубопроводів у результаті погіршення механічних властивостей викликає прискорення процесів його зношування та вплив наступних факторів [17]:

- 1) поява та розвиток корозійних дефектів через корозійний вплив на метал трубопроводу;
- 2) зародження і зростання втомних тріщин на концентраторах напруг і дефектах від втомного та малоциклового навантаження;
- 3) окрихчення і розтріскування металу трубопроводів в результаті вібраційного навантаження.

У [17] подана інформація про розроблення математичної моделі розрахунку крихкості металу трубопроводів шляхом врахування часу та геометрії розвитку тріщини при тривалій експлуатації в залежності від навантажень, що дозволило провести оцінку технічного стану та прогнозування термінів експлуатації трубопроводів і підвищення безпеки роботи трубопровідних систем, зокрема:

- математичну модель визначення накопичення втомного пошкодження при жорстко-

му і м'якому симетричному режимах навантаження;

- отримано залежності концентрації напружень у металі трубопроводу від часу експлуатації та геометрії тріщини шляхом розв'язання нелінійного диференційного рівняння розвитку тріщини в металі, що дозволяє прогнозувати залишковий ресурс трубопроводу;

- запропоновано математичні моделі визначення допустимої кількості циклів навантаження при симетричному м'якому та жорсткому циклах навантаження, при асиметричному м'якому та жорсткому циклах навантаження з урахуванням геометрії розвитку дефекту;

- отримали подальший розвиток метод та модель прогнозування технічного стану трубопровідних систем за рахунок розробки автоматизованої системи розрахунку напружено-деформованого стану, що дало змогу визначати технічні параметри трубопроводів у позапроектні терміни експлуатації.

Для розрахунку границі корозійної втоми металу використовуємо емпіричне співвідношення [9, 18]:

$$\sigma_{ve} = \sigma_{vp} [1,128 - 2,849 \lg(Q_{dr} / Q_{cor})], \quad (8)$$

де  $\sigma_{vp}$ ,  $\sigma_{ve}$  – границя втоми (механічне напруження) на повітрі та у середовищі відповідно;

$Q_{dr}$ ,  $Q_{cor}$  – кількість електрики, що йде на додаткове розчинення деформованого металу при  $\sigma_{vp}$  та на його корозію при відсутності деформації.

Великий обсяг результатів експериментальних досліджень корозійної втоми металів подано у [18, 19]. З допомогою цих даних можна уточнювати параметри співвідношення (8) для різних марок сталей.

Встановлено закономірності поширення тріщини за низько-, середньо- та високоамплітудних циклічних навантажень розтягом сталі 17Г1С труби магістрального газопроводу після 40 років експлуатації та матеріалу неексплуатованої (вихідної) труби [20, 21].

Враховано різні варіанти асиметрії циклу навантаження. Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування за різних асиметрій циклу навантаження в діапазоні швидкостей росту втомної тріщини до 6 порядків [20, 21]. Досліджено припорогові ділянки кінетичних діаграм для матеріалу різних ділянок стінки вихідної та експлуатованої труб. На основі побудованих графічних залежностей визначено характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С та встановлено суттєве зменшення порогових значень коефіцієнта інтенсивності напружень експлуатованого матеріалу порівняно з вихідним внаслідок деградації його структури і зниження опірності втомному руйнуванню [20, 21]. Вказані результати експерименту використано для оцінювання впливу втоми на оцінювання залишкового ресурсу труби і удосконалення відповідного нормативного елемента з урахуванням порогового коефіцієнта інтенсивності напружень.

## ВИСНОВКИ

Результати дослідження доводять, що в основі інформаційного забезпечення системи «металева труба – ізоляційне діелектричне покриття» є методика, яка включає такі основні процедури, як: ідентифікування небезпек; 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. Особливістю дефекту типу каверна (пітинг) – тріщина є те, що каверна утворена в результаті корозії, а тріщина – під дією циклічного механічного навантаження.

Перспективою подальших досліджень у даному напрямі є визначення комплексного показника якості та надійності з безпечної експлуатації підземних нафтогазопроводів і трубопроводів, які використовуються при експлуатації атомних електростанцій, на основі результатів дослідження (поданого інформаційного забезпечення).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Skrynkovskyy, R., Leskiv, S., & Yuzevych, V. (2017). Rozrobka informatsiinoho zabezpechennia avtomatyzovanoi systemy monitorynhu stanu promyslovoi bezpeky hazotransportnoi systemy [Development of Information Support of the Automated System for Monitoring the State of the Gas Transportation System's Industrial Safety]. *Path of Science*, 3(8), 3028–3035. doi: [10.22178/pos.25-8](https://doi.org/10.22178/pos.25-8) (in Ukrainian)  
[Скриньковський, Р., Лесків, С., & Юзевич, В. (2017). Розробка інформаційного забезпечення автоматизованої системи моніторингу стану промислової безпеки газотранспортної системи. *Path of Science*, 3(8), 3028–3035. doi: 10.22178/pos.25-8].
2. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2008). *Mahistralni truboprovody. Nastanova. Vyznachennia zalyshkovoï mitsnosti mahistralnykh truboprovodiv z defektamy* [Main pipelines. Attitude. Determination of the residual strength of main pipelines with defects] (DSTU-Н Б В.2.3-21:2008). Kyiv: Author (in Ukrainian)  
[Міністерство регіонального будівництва України. (2008). *Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами* (ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008). Київ: Мінрегіонбуд].
3. The State Committee for Technical Regulation and Consumer Policy. (2003). *Truboprovody stalevi mahistralni. Zahalni vymohy do zakhystu vid korozii* [Steel pipe mains. General requirements for corrosion protection] (DSTU 4219-2003). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy (in Ukrainian)  
[Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики. (2003). *Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії* (ДСТУ 4219-2003). Київ: Держспоживстандарт України].
4. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2003). *Truboprovody stalevi pidzemni system kholodnoho i hariachoho vodopostachannia. Zahalni vymohy do zakhystu vid korozii* [Underground steel pipelines of the cold and hot water-supply systems. General requirements for corrosion protection] (DSTU В В.2.5-30:2006). Kyiv: Author (in Ukrainian)  
[Міністерство регіонального будівництва України. (2003). *Трубопроводи сталеві підземні систем холодного і гарячого водопостачання. Загальні вимоги до захисту від корозії* (ДСТУ В В.2.5-30:2006). Київ: Мінрегіонбуд].
5. International Organization for Standardization. (1998). *Corrosion of metals and alloys – Corrosion fatigue testing – Part 1: Cycles to failure testing* (ISO 11782-1:1998). Geneva: ISO.
6. International Organization for Standardization. (1998). *Corrosion of metals and alloys – Corrosion fatigue testing. – Part 2: Crack propagation testing using precracked specimens* (ISO 11782-2:1998). Geneva: ISO.
7. International Organization for Standardization. (2012). *Corrosion of metals and alloys – Stress corrosion testing – Part 1: General guidance on testing procedures* (ISO 7539-1:2012). Geneva: ISO.
8. International Organization for Standardization. (1995). *Corrosion of metals and alloys – Evaluation of pitting corrosion* (ISO 11463:1995). Geneva: ISO.
9. Yuzevych, L., Skrynkovskyy, R., & Koman, B. (2017). Development of information support of quality management of underground pipelines. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 49–60. doi: [10.21303/2461-4262.2017.00392](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00392)
10. Ibragimov, A. (2011). *Metody prognozirovaniya dolgovechnosti truboprovodov s uchetom korrozii i peremennykh napryazhenij* [Methods for predicting the durability of pipelines taking into account corrosion and variable stresses]. A. Shabarov, S. Podorozhnikov (Eds.). Tjumen': TjumGNGU (in Russian)  
[Ибрагимов, А. (2011). *Методы прогнозирования долговечности трубопроводов с учетом коррозии и переменных напряжений*. А. Шабаров, С. Подорожников (Ред.). Тюмень: ТюмГНГУ].
11. Valiashek, V., Kaplun, A., & Yuzevych, V. (2015). *Matematychnе ta kompiuterne modeliuвання fizychnykh kharakterystyk materialu u vershyni trishchyny z urakhuvanniam efektu*

- zmitsnennia [Mathematical and computer modeling of physical characteristics of material in top of crack taking into account effect of strengthening]. *Kompiuterno-intehrovani Tekhnologii: Osvita, Nauka, Vyrobnystvo*, 18, 97–104 (in Ukrainian)  
[Валяшек, В., Каплун, А., & Юзевич В. (2015). Математичне та комп'ютерне моделювання фізичних характеристик матеріалу у вершині тріщини з урахуванням ефекту зміцнення. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 18, 97–104].
12. Dzhala R., Verbenets, B., & Melnyk, M. (2012). *Kontrol poliaryzatsiinoho potentsialu pidzemnykh metalevykh sporud* [Control of the polarization potential of underground metal structures]. Retrieved from <http://ipm.lviv.ua/library/0/62/UkrNDT-2012part02.pdf> (in Ukrainian)  
[Джала Р., Вербенець, Б., & Мельник, М. (2012). *Контроль поляризаційного потенціалу підземних металевих споруд*. URL: <http://ipm.lviv.ua/library/0/62/UkrNDT-2012part02.pdf>].
  13. TrubaSpets. (n. d.). *Varianty katodnoj zashchity truboprovodov – preimushhestva i nedostatki sposobov* [Variants of cathodic protection of pipelines - advantages and disadvantages of methods]. Retrieved August 5, 2017, from <http://trubaspec.com/montazh-i-remont/varianty-katodnoy-zashchity-truboprovodov-preimushchestva-i-nedostatki-sposobov.html> (in Russian)  
[ТрубаСпец. (n. d.). *Варианты катодной защиты трубопроводов – преимущества и недостатки способов*. Актуально на 5.08.2017. URL: <http://trubaspec.com/montazh-i-remont/varianty-katodnoy-zashchity-truboprovodov-preimushchestva-i-nedostatki-sposobov.html>].
  14. Sopruniuk, P., & Yuzevych, V. (2005). *Diahnostyka materialiv i seredovyshch. Enerhetychni kharakterystyky poverkhnevyykh shariv* [Diagnostics of materials and environments. Energy characteristics of the surface layers]. Lviv: SPOLOM (in Ukrainian)  
[Сопрунюк, П., Юзевич, В. (2005). *Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів*. Львів: СПОЛОМ].
  15. Koman, B., & Yuzevich, V. (2015). *Energy Parameters of Interfacial Layers in Composite Systems: Graphene – (Si, Cu, Fe, Co, Au, Ag, Al, Ru, Hf, Pb) and Semiconductor (Si, Ge) – (Fe, Co, Cu, Al, Au, Cr, W, Pb)*. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 7(4), 04059-1–04059-7.
  16. Yuzevych, V., Koman, B., & Dzhala, R. (2016). *Mechano-electric characteristics of the near-surface layer of some materials*. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 8(4), 04005-1–04005-7.
  17. Pakhalovych, M. (2017). *Udoskonalennia normatyvnykh dokumentiv z bezpechnoi ekspluatatsii elementiv truboprovodnykh system atomnykh elektrostantsii u ponadproektnyi termin* [Improvement of normative documents on safe operation of elements of pipeline systems of nuclear power plants in excess of the project term] (Doctoral thesis). Kharkiv: Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia (in Ukrainian)  
[Пахалович, М. (2017). *Удосконалення нормативних документів з безпечної експлуатації елементів трубопровідних систем атомних електростанцій у понадпроектний термін* (Автореферат дисертації). Харків: Українська інженерно-педагогічна академія].
  18. Pokhmurskyi, V., & Khoma, M. (2008). *Koroziina vtoma metaliv i splaviv* [Corrosive fatigue of metals and alloys]. Lviv: Spolom (in Ukrainian)  
[Похмурський, В., & Хома, М. (2008). *Корозійна втома металів і сплавів*. Львів: Сполом].
  19. Milella, P. P. (2013). *Fatigue and Corrosion in Metals*. Milan: Springer. doi: 10.1007/978-88-470-2336-9
  20. Kharchenko, Ye., Klysh, S., Paliukh, V., Kunta, O., & Lenkovskyi, T. (2016). *Vplyv tryvaloї ekspluatatsii hazoprovodu na tsyklichnu trishchynostiikist stali 17H1S* [The influence of gas pipeline long-term operation on fatigue crack growth resistance of 17Г1С steel]. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 52(6), 75–80 (in Ukrainian)  
[Харченко, Є., Клиш, С., Палюх, В., Кунта, О., & Ленковський, Т. (2016). *Вплив тривалої експлуатації газопроводу на циклічну тріщиностійкість сталі 17Г1С*. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 52(6), 75–80].
  21. Revie, W. R. (Ed.). (2015). *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc. doi: 10.1002/9781119019213