

РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОЇ ТОВЩИНИ СТІНКИ ДІЛЯНКИ НАФТОПРОВОДУ ВНАСЛІДОК ЗОВНІШНІХ КОРОЗИЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Степова О.В.¹, Матвієнко А.М.²

Національний університет

¹«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава

²Департамент дослідження свердловин та розробки родовищ
вул. маршала Бірюзова, 53, 36000, м. Полтава
novator11977@ukr.net, alenastepovaja@gmail.com

За результатами аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань шкідливого впливу на довкілля внаслідок аварійних витоків, згоряння або вибухів нафтопродуктів виявлено, що одним із небезпечних чинників є зовнішні та внутрішні корозійні процеси з ризиками розгерметизації сталевих нафтопроводів і виникненням надзвичайних ситуацій. Наслідками зазначеного є значні екологічні збитки, пов'язані з втратою нафтопродуктів та суттєвими забрудненнями компонентів довкілля. Висунуто ідею роботи, яка полягала у запобіганні забрудненню довкілля нафтопродуктами, продуктами їх згоряння або вибуху внаслідок процесів зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів шляхом застосування науково обгрунтованої методики оцінювання залишкової товщини стінки зазначених об'єктів. В науковій роботі із застосуванням математичної моделі електрохімічної корозії сталі нафтопроводу в тріщині ізоляційного покриття розроблено розрахункову методику визначення глибини корозії сталевого нафтопроводу при роботі макрোগальванічної корозійної пари за впливу агресивного електролітичного розчину, що дозволяє прогнозувати розвиток корозійних процесів на сталевому нафтопроводі, планувати необхідні заходи щодо запобігання забрудненню довкілля. Застосування запропонованої методики оцінювання залишкової товщини стінки ділянки нафтопроводів унеможливить забруднення довкілля нафтопродуктами, продуктами їх згоряння або вибуху внаслідок процесів зовнішньої корозії сталевих нафтопроводів. Результати даної наукової роботи в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні екологічні загрози від корозії трубопроводів та обладнання при транспортуванні нафти, що дасть можливість розробити заходи по запобіганню виникнення шкідливих впливів при розгерметизації нафтопроводів. *Ключові слова:* екологічна безпека, сталевий нафтопровід, електрохімічна корозія, залишкова товщина стінки.

Calculation of the residual wall thickness of the pipeline section due to external corrosion processes. Stepova O., Matvienko A.

The analysis of the current state of scientific and technical achievements on the issues of harmful effects on the environment due to accidental leaks, combustion or explosions of petroleum products revealed that one of the dangerous factors are external and internal corrosion processes with risks of depressurization of steel oil pipelines and occurrences. The consequences of this are significant environmental damage associated with the loss of petroleum products and significant pollution of environmental components. The idea was put forward to prevent pollution of the environment by petroleum products, products of their combustion or explosion due to the processes of external corrosion of steel pipelines by applying a scientifically sound method for estimating the residual wall thickness of these objects. In the scientific work with the use of mathematical model of electrochemical corrosion of steel pipeline in the cracks of the insulation coating has developed a calculation method for determining the depth of corrosion of the steel pipeline in the work of galvanic corrosion steam under the influence of an aggressive electrolytic solution, which allows to predict the development of corrosion-preventive steps of the environment. The application of the proposed method for estimation of the residual wall thickness of the pipeline section will make it impossible to pollute the environment with petroleum products, products of their combustion or explosion due to the external corrosion processes of the steel pipelines. The results of this scientific work, in combination with other studies, will help to identify potential environmental threats from pipeline corrosion and equipment in the transportation of oil, which will allow to develop measures to prevent the occurrence of harmful effects in the depressurization of oil pipelines. *Key words:* environmental safety, steel oil pipeline, electrochemical corrosion, residual wall thickness.

Постановка проблеми. Серед основних екологічних проблем, пов'язаних із функціонуванням нафтогазової галузі, автори [1] виділяють транспортування нафти й газу та вирішення проблеми екологічної безпеки під час експлуатаційних робіт. Тривала експлуатація нафтопроводів призводить до зростання ризику зовнішніх та внутрішніх корозійних пошкоджень поверхні нафтопроводу та зменшення товщини його стінки.

Утопшення стінки нафтопроводу сприяє розгерметизації сталевих нафтопроводів та створення над-

звичайних ситуацій. Наслідками зазначеного є значні екологічні збитки, пов'язані з втратою нафтопродуктів та значними впливами на компоненти довкілля: забруднення атмосферного повітря, ґрунтового та водного середовища тощо.

Розроблення методики, що дозволить неруйнівним методом визначити залишкову товщину стінки ділянки нафтопроводу, враховуючи особливості корозійних процесів та локальних пошкоджень дасть можливість оцінити міцність та залишковий ресурс нафтопроводу на момент обстеження.

Актуальність дослідження. Однією з причин розгерметизації нафтопроводів є зовнішні корозійні процеси. Розуміння закономірностей таких процесів та їх урахування є науковим підґрунтям для визначення залишкової товщини стінки, розрахунку напруженого стану та залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів. Розвиток наукових основ забезпечення екологічної безпеки діючих сталевих нафтопроводів, які враховують особливості та закономірності процесів їх електрохімічної корозії як джерела забруднення довкілля є актуальною проблемою, вирішення якої створює передумови зменшення ризиків забруднення довкілля під час експлуатації зазначених об'єктів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України в галузі дослідження технічного стану будівель і споруд, що експлуатуються, які висвітлені у Постанові Кабінету Міністрів України № 409 від 5 травня 1997 р. «Про забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж» та Рішенні Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки та оборони України від 14 лютого 2002 р. «Про технічний стан і залишковий ресурс конструкцій та споруд основних галузей господарства України». Дослідження виконані в межах держбюджетної науково-дослідної роботи Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка: «Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів транспортування та зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах».

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Огляд й аналіз праць вітчизняних та закордонних учених щодо аналізу сучасного стану науково-технічних досягнень з питань шкідливого впливу на довкілля внаслідок аварійних витоків, згоряння або вибухів нафтопродуктів на сталевих нафтопроводах і прилеглих до них територіях.

Дослідженням залежностей корозії металу від факторів навколишнього середовища велику увагу було приділено в роботах Абдулліна І.Г., Гарєєв А.Г., Гутман Е.М., Іванцова О.М., Новосьолова В.Ф., Стеклова О.І., Черняєва К.В., Цікермана Л.Я., Ясіна Е.М., Побережний Л.Я. та ін. Зазначено, що головна роль при оцінці залишкового ресурсу сталевих нафтопроводів за умов наявності тріщин в ізоляційному покритті належить вивченню залишкової товщини стінки ділянки трубопроводу.

Відомі методи оцінки стану металу за результатами корозійних випробувань передбачають використання кількісних показників [2–4].

Однією з перших моделей, які описують руйнування металу під впливом навколишнього агресивного середовища, є закони Фарадея.

Овчинніков І.П. [5] пропонує модель корозійного ураження сталі приймати у вигляді рівномірного по периметру зносу металу глибиною $\delta(t)$

$$\delta(t) = \alpha(t - t_{inc})^\beta, \quad (1)$$

де α і β – коефіцієнти,
 t_{inc} – інкубаційний період.

В роботі Чіркова В.П., Кардангушева А.Н. [6] для характеристики корозійних процесів на металі ізольованих металевих конструкцій вводиться спеціальний питомий показник уражень корозією площі поперечного перерізу металевих трубопроводів у будь-який момент часу t

$$\lambda(t) = [A_{so} - A_s(t)] / A_{so}, \quad (2)$$

де A_{so} – площа поперечного перерізу металевих трубопроводів до початку його корозії;

$A_s(t)$ – площа перерізу ураженого корозією металевої труби в будь-який момент часу t .

Для визначення $\lambda(t)$ необхідні довготривалі експерименти з різною сталлю, при різному розкритті тріщин, з різним агресивним середовищем, різному числі циклів дії агресивного середовища.

В іншій роботі цього ж автора [7] процес корозії металу характеризується товщиною продуктів корозії $\delta(\tau)$

$$\delta = \epsilon(1 - L^{-k\tau_0}), \quad (3)$$

b, k – константи корозії;

τ_0 – час від початку розвитку корозії;

L – глибина проникнення агресивних іонів.

З практичної електрохімії відомо, що пошук корозійних характеристик на металі в електролітичному середовищі може бути зведено до визначення розподілу електричного потенціалу і струму на його поверхні [8–10]. Це дає можливість при дослідженні корозії сталі в тріщинах використати загальні підходи по розрахунках стаціонарного електрополя, котрі розроблені в теоретичній електротехніці і розділах математичної фізики.

Існують й інші математичні моделі руйнування металу трубопроводів під дією оточуючого середовища інших авторів і вчених, але усі вони є в дечому подібними і схожими. Це виявляється в тому, що у залежності моделей входять багато різних поправкових коефіцієнтів, які враховують вплив лише деяких факторів навколишнього середовища та є справедливими лише для трубопроводів, які не зазнають локального агресивного впливу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Наведені моделі не дають змогу з достатньою точністю описати процеси електрохімічної корозії нафтопроводів та визначити дійсну на момент обстеження залишкову товщину стінки ділянки нафтопроводу.

Метою даної роботи є розроблення залежностей для визначення залишкової товщини стінки ділянки нафтопроводу.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Результати даної наукової роботи в комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні небезпечні ділянки підземних нафтопроводів, дозволять попередити виникнення аварійних ситуацій та запобігти негативному впливу на довкілля шляхом вчасного вжиття необхідних заходів.

Викладення основного матеріалу.

Під час експлуатації нафтопроводів їх негативний вплив на довкілля відбувається у разі витоків нафти та нафтопродуктів, вибухів та пожеж через їх розгерметизацію за причиною зовнішньої корозії металу труб.

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

Однією з причин розгерметизації нафтопроводів є зовнішні корозійні процеси труб. Корозійні процеси призводять до деградації фізико-хімічних властивостей сталі та утворенню корозійних дефектів на поверхні, зменшенню товщини стінки ділянки труби.

Товщина стінки трубопроводу є визначальним параметром, що характеризує його залишковий ресурс та міцність. Міцність матеріалу нафтопроводу є характеристикою витривалості й здатності опиратися несприятливим впливам зовнішнього і внутрішнього середовища, тобто забезпечує відповідні безпечні умови експлуатації. Тому визначення

фактичної товщини стінки дозволить визначити міцність ділянки трубопроводу на момент обстеження. Перевірка міцності трубопроводу здійснюється за відомим методом граничних станів. Розглядається такий напружений стан трубопроводу, при якому його подальша експлуатація неможлива. Характеристикою несучої здатності трубопроводів є тимчасовий опір металу труб, або межа міцності.

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

$$\sigma > R \tag{4}$$

де σ – поздовжнє осьове напруження від розрахункових навантажень і впливів, МПа; R_s – розрахунковий опір матеріалу труби (межа плинності).

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

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

$$[\sigma_{прN}] \leq \varphi_2 R_1, \tag{5}$$

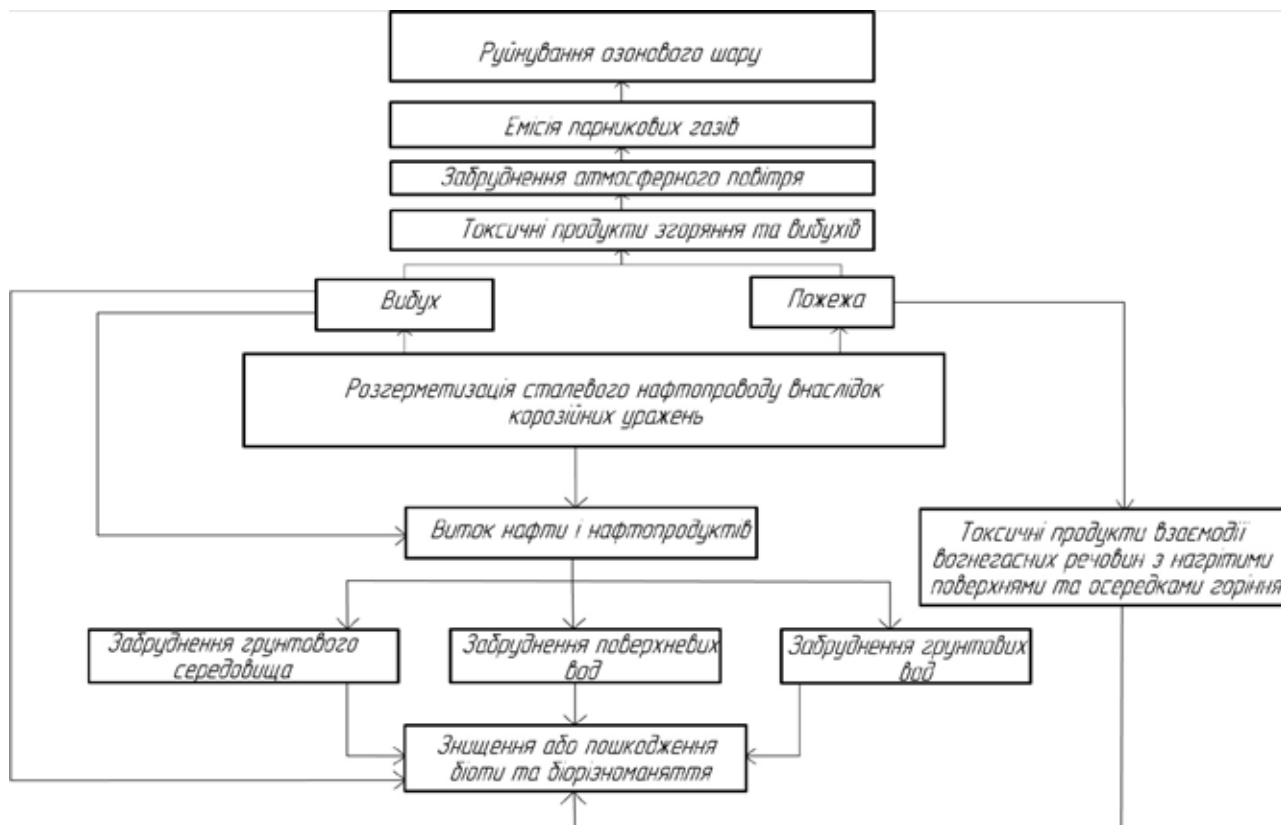


Рис. 1. Схематичне зображення негативного впливу на довкілля внаслідок корозійних процесів з розгерметизацією сталевих нафтопроводів

$$\sigma_{\kappa\kappa} \leq \frac{m}{0,9k_n} R_2^n \quad (6)$$

де $[\sigma_{npN}]$ – поздовжнє осьове напруження від розрахункових навантажень та впливів, МПа; φ_2 – коефіцієнт, що враховує двоосний напружений стан металу труби (при розтягуючи напруженнях приймається рівним 1); R_1, R_2 – розрахункові опори розтягу (стиску), МПа.

$$R_1 = \frac{R_1^n m}{k_1 k_n}, \quad R_2 = \frac{R_2^n m}{k_2 k_n}, \quad (7)$$

m – коефіцієнт умов роботи нафтопроводу; k_1, k_2 – коефіцієнти надійності за матеріалом трубопроводу; k_n – коефіцієнт надійності за призначенням нафтопроводу.

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

$$\sigma_{npN} = \frac{0,15 p D_{\text{вн}}}{\delta} - \alpha E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{зовн}}}{2\rho}, \quad (8)$$

де p – робочий тиск, МПа; $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр ділянки нафтопроводу, см;

$$\sigma_{\kappa\kappa} = \frac{p D_{\text{вн}}}{2\delta}. \quad (9)$$

δ – номінальна товщина стінки ділянки нафтопроводу, см; α – коефіцієнт лінійного розширення металу труб, град⁻¹; E – змінний модуль пружності матеріалу труби, МПа; Δt – розрахунковий температурний перепад, °С; ρ – мінімальний радіус пружного вигину осі трубопроводу, см.

Для визначення дійсного напруженого стану ділянки нафтопроводу доцільно враховувати товщину стінки на момент обстеження конструкції з врахуванням її зміни через корозійні процеси.

$$\Delta\delta = \delta - h \quad (10)$$

де $\Delta\delta$ залишкова товщина стінки нафтопроводу на ділянці, що уражена корозією, мм; h – глибина корозії, мм, визначається на основі запропонованої залежності [11].

$$h = \frac{12KI}{\pi \times D \times a^2} t \quad (11)$$

де K – електрохімічний коефіцієнт металу, г/А·год; I – струму, який проходить через площу поперечного перерізу поверхні виразки, А/см²; D – питома вага металу трубопроводу (заліза), г/см³; a – діаметр корозійної виразки, мм; t – тривалість часу, год;

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

Розрахунок дійсних напружень, що виникають в трубопроводі на момент обстеження виконують шляхом врахування зменшення товщини стінки нафтопроводу, що вводиться в розрахунок. Для забезпечення міцності рівень кільцевого напруження в нафтопроводі, що має корозійні ураження, має відповідати умові

$$\frac{p(D_{\text{вн}} + 2h)}{2(\delta - h)} \leq [\sigma_{\kappa\kappa}] \quad (12)$$

де h – глибина корозії ділянки трубопроводу, мм; p – робочий тиск на ділянці нафтопроводу, МПа; $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр труби, мм; $[\sigma_{\kappa\kappa}]$ – допустиме кільцеве напруження.

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

$$[h] = \delta - \frac{p D_3}{2([\sigma_{\kappa\kappa}] + p)} \quad (13)$$

де D_3 – зовнішній діаметр трубопроводу, мм.

Так як для труб $\delta \ll D$ формулу (13) можна застосовувати для випадків внутрішньої та зовнішньої корозії. Формула (13) може бути записана так:

$$[\varepsilon] = \left(1 - \frac{p \times D_3}{2\delta([\sigma_{\kappa\kappa}] + p)}\right) 100\% \quad (14)$$

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

стінки нафтопроводу.

Таким чином, застосування запропонованої методики оцінювання залишкової товщини стінки ділянок нафтопроводів внаслідок процесів їх зовнішньої корозії дозволить визначити дійсний напружений стан конструкції, розрахувати міцність ділянки на момент обстеження та створює передумови визначення залишкового ресурсу його безпечної експлуатації.

Література

1. Побережний Л.Я. Підвищення рівня екологічної безпеки трубопроводних мереж нафтогазового комплексу України / Л. Я. Побережний, А.В. Яворський, В.С. Цих, А.І. Станецький, А.В. Грицанчук. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. 2017. № 1. С. 24–31.
2. Monitoraggio dello stato di corrosione dell'armature dei viadotti autostradali. *Cigna Raneeri. Autostrade*. 1991. 33. № 1. P.79–89.
3. Разведочные коррозионные испытания углеродистых сталей в бетоне с помощью электромагнитных волн. *11th Int. Corros. Congr.: Innov. Technol. Transfer. Corros. Contr.* (Milano Florence 2–6 Apr.). Vol. 2. assoc. Ital. Met. 1990. P. 103–108.
4. Saravanan K. Electrochemical non-destructive testing of reinforcement corrosion in existing concrete structures. *Trans. SAEST*. 1989. 24. № 3. С. 157.

5. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Землянский А.А. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридных сред. Саратов: Гос. техн. ун-т, 2000. 232 с.
6. Чирков В.П., Кардангушев А.Н. Оценка ресурса железобетонных конструкций при коррозии арматуры. *Изв. Вузов. строительство*. 1992. № 3. С. 3–9.
7. Попеско А.И., Анцыгин О.И., Дайлов А.А. Новый метод расчета несущей способности железобетонных конструкций, работающих в условиях газовой среды. *Бетон и железобетон*. 2007. № 3. С. 20–22
8. Рубинштейн А.И., Коверский Н.Я., Чернов Б.Б. Распределение тока и потенциала на гетерогенном электроде. *Электрохимия*. 1977. Т.х111. Вып. 7. С. 15–19.
9. Алексеева Н.В., Стрижевский И.В. [и др.] Математическое моделирование распределения коррозии по периметру поперечного сечения подземного трубопровода. *Защита металлов*. 1989. № 1. С. 25–29.
10. Кузнецова Е.Г. Распределение потенциала и скорости растворения вдоль участка металлического трубопровода при пересечении границы раздела двух грунтов. *Защита металлов*. 1988. № 2. С. 36–41.
11. Stepova O., Paraschienko I. Modeling of the corrosion process in steel oil pipelines in order to improve environmental safety. *Eastern-european journal of enterprise technologies, industrial and technology systems*. Vol. 2, no 1 (86) 2017. P. 15–20.