

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ ВІДНОСНО ЗВАРНОГО ШВА ПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ В СТІНЦІ ТРУБИ НА ЗАЛИШКОВУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ

¹Ю.В.Банахевич, ²О.Є. Андрейків, ²М.Б.Кім

¹Управління магістральних газопроводів “Львівтрансгаз”, 79047, Львів, вул. Рубчака,3

²Львівський національний університет імені Івана Франка,
79000, м. Львів, вул. Університетська 1, email: andreykiv@ipm.lviv.ua

Предложен эффективный подход к определению остаточного ресурса сварного соединения магистрального трубопровода с внутренней поверхностной трещиной. Подход базируется на ранее разработанной авторами методике определения остаточных напряжений вблизи сварных швов, математической модели для определения периода докритического роста усталостных трещин и методе эквивалентных площадей для приближенной реализации данной модели. Построена зависимость остаточного ресурса нефтепровода от расстояния трещины к оси сварного шва.

An effective approach to evaluation of the residual life of a welded joint of main pipeline with an internal surface crack has been proposed. The approach is based on the previous method, developed by the authors, for evaluation of the residual stresses at welds, a mathematical model for determination of the fatigue cracks sub critical growth period, a method of equivalent areas for approximate realization of the given model. On this basis the dependence of the residual life of a petroleum pipeline on the crack distance to the weld axis has been calculated.

Вступ

Відомо, що при довготривалій дії експлуатаційних навантажень і навколишнього середовища в основному металі і зварних швах труб проходить поступове нагромадження незворотних пошкоджень. Окрім того, довготривала експлуатація прискорює розвиток наявних дефектів різного походження (металургійних будівельно-монтажних і т. д.). Все це приводить до виникнення експлуатаційних відмов нафтопроводів, а інколи – до аварій, які обумовлюють не тільки значні матеріальні збитки, але і порушення екологічної безпеки навколишнього середовища. Тому забезпечення надійності і безпеки магістральних трубопроводних систем є визначальною вимогою під час їх експлуатації в необхідному інтервалі і являє собою одну з найбільш важливих науково-технічних проблем.

В цьому плані важливим завданням є діагностика пошкоджень стінки труби нафтогазопроводів, умов їх навантаження і прогнозування на цій основі їх залишкової довговічності, що дасть можливість вчасно передбачити аварію і запобігти їй.

На даний час уже проведені дослідження багатьма авторами [1–6] залишкової довговічності магістральних нафтогазопроводів з врахуванням умов їх навантаження, дії різних фізичних і хімічних факторів, наявності в стінці труби дефектів типу тріщин і т.д. Однак всі ці дослідження проводилися для випадку основного матеріалу труб без врахування зварних швів. Як відомо [7, 8] область зварного шва значно послаблює міцність і довговічність труби і неврахування цього може призвести до непередбачуваного руйнування і відповідно до

аварійної ситуації. Тому для прогнозування залишкової довговічності труб магістральних трубопроводних систем необхідно враховувати у розрахунку наявність зварних швів, їх міцнісні характеристики і геометрію розміщення відносно них дефектів типу тріщин.

В даній роботі запропонований наближений підхід для визначення залишкової довговічності труби нафтопроводу з тріщиною, що розміщена недалеко зварного шва. В основу даного підходу покладена раніше запропонована авторами [9, 10] розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту втомних тріщин в рамках енергетичного критерію втомного руйнування і узагальнений тут метод еквівалентних площ.

Особливості експлуатації і розрахунку магістральних нафтопроводів

Головним конструктивним елементом трубопроводів є сталеві труби. Їх якість, властивості металу та зварних з'єднань є визначальними за можливих відмов, зупинок і аварій на нафтопроводах. В процесі довготривалої експлуатації трубопроводу матеріал труби піддається комплексній дії корозійно-механічних факторів. Умови роботи металу труб у нафтопроводах високого тиску дуже специфічні і відрізняються від експлуатаційних умов роботи металу в інших елементах сталевих конструкцій, що зумовлено наступними факторами.

Внаслідок великої довжини метал труби одного і того ж трубопроводу перебуває в різних природнокліматичних умовах. При цьому треба враховувати різні типи і механічні характеристики ґрунтів, в яких прокладений трубопровід, можливість виникнення в металі труб

пластичних деформацій при перетині природних перешкод (гори, вода, болото та ін.).

Аналізуючи природнокліматичні умови експлуатації нафтопроводу, можна стверджувати, що метал труби працює в широкому діапазоні температур від $+40^{\circ}\text{C}$ до -15°C [1,2]

Метал труби протягом амортизаційного терміну (більше 30 років) практично працює в умовах двоосного напружено деформованого стану з різними співвідношеннями кільцевих і повздожніх напружень. Разом з тим метал труб піддається мало цикловим напруженням, які в деяких випадках можуть досягати границі текучості.

В металі трубопроводу майже завжди наявні концентратори у вигляді задирих, подряпин, орієнтованих вздовж твірної труби. Ці концентратори можуть бути технологічного, транспортного або монтажного характеру.

Разом з тим в процесі експлуатації металів трубопроводу проходять корозійні, втомні, і термофлуктаційні явища, що активують процес руйнування в першу чергу біля металургійних і технологічних дефектів. Найбільше піддані дії цих процесів зони концентрації напружень, зварні шви, зони термовпливу де виникають максимумами електричного потенціалу.

В нормативних документах при розрахунку труб і зварних з'єднань не враховуються в явному вигляді характеристики опору мало цикловому руйнуванню. Аналіз умов експлуатації і характер руйнування трубопровідної системи показує на значну кількість відмов внаслідок вичерпання опору мало цикловому навантаженню. Ініціатором мало циклового руйнування є малопомітний концентратор напружень.

Таким чином, міцність трубопровідної системи, що встановлюється в процесі проектування, формується під час будівельно-монтажних робіт, яка підтримується під час експлуатації зумовлюється не тільки високими міцнісними характеристиками матеріалу труби, але й рівнем концентрації напружень, опору мало цикловому руйнуванню. Враховуючи це в вітчизняній і зарубіжній практиці набули методи оцінки матеріалу з позиції механіки руйнування. Розрахунок на міцність і довговічність елементів конструкцій в рамках механіки руйнування передбачає такі етапи [3]:

1) визначення форми, розміру і місця знаходження найбільш небезпечного тріщиноподібного дефекту;

2) вибір критерію локального руйнування залежно від типу матеріалу, характеру навантаження;

3) встановлення закономірностей втомного (докритичного) росту тріщини в заданому матеріалі;

4) визначення напружено-деформованого стану елементу конструкції, послабленого дефектом заданої конфігурації;

5) експериментальне встановлення характеристик тріщиностійкості заданого матеріалу при статичному і циклічному поширенню тріщини;

6) визначення критичного розміру тріщини.

В питаннях пов'язаних з визначенням розмірів і місця знаходження дефекту застосовують різні методи неруйнівного контролю з максимальною роздільною здатністю [3].

Умови силового навантаження нафтопроводу

Робочий тиск для трубопроводу і арматури на прийманні проміжних помпових станцій приймається звичайно рівним 4 МПа, оскільки близький до цього тиску може виникнути при відключенні цієї станції і роботи через станцію.

Відключення і включення помпових станцій (ПС) і окремих агрегатів, а також перекрыття засувів зв'язано з проведенням профілактичних оглядів, спрацюванням системи автоматичного захисту і громовідводу, і відключенням електроенергії і т. д.

При закритті засуву відбувається різке наростання тиску, яке визначається швидкістю перекрыття потоку. Виникаюча при цьому хвиля тиску поширюється із швидкістю звуку в бік попередньої насосної станції після підходу до останньої формується хвиля пониженого тиску оберненого напрямку. Графік наростання тиску при закритті засуву на трубопроводі, який перепомповує котельне паливо з продуктивністю $7250 \text{ м}^3/\text{год.}$, зображено на рис. 1. Час закриття засуву діаметром 900 мм в даному експерименті становить 10,5 с. При цьому, зміна тиску починається після закриття засуву на 70%. Утворена хвиля, при закритті підвищеного тиску може досягти 4,4 МПа [4]. На основі натурних обстежень [4] зміни тиску у нафтопроводі побудована графічна залежність зміни тиску p з часом t (рис. 1). Тут також наведений розкид можливих відхилень від мінімального (крива 2) до максимального (крива 1) значень.

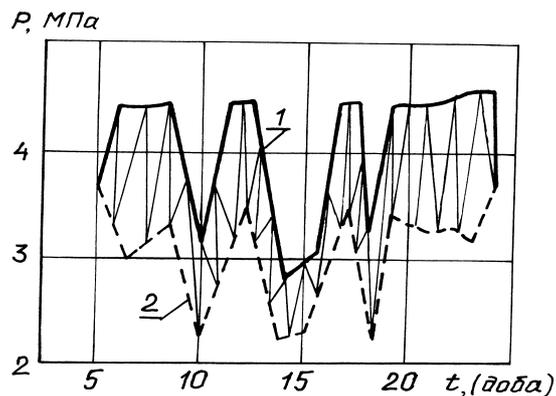


Рисунок 1 — Зміна тиску в часі при закритті засувів на трубопроводі

Таким чином, на основі аналізу результатів досліджень представлених в роботах [1-4] можна накреслити наступну силову схему навантаження стінки нафтопроводу в часі (рис. 1). Кільцеві напруження σ_k будуть змінюватися в середньому циклічно внаслідок турбулентності нафти, дисбалансу pomp, переключенням або зупинкою окремих pomp або станцій.

Разом з тим матеріал труби підданий дії комплексу термосилових, статичних і циклічних напружень, внаслідок яких в матеріалі можуть проходити структурні зміни і зароджуватись поверхневі та внутрішні мікро дефекти, особливо це трапляється біля зварних швів. При подальшій експлуатації нафтопроводу (зміні в часі кільцевих напружень у його стінці) такі дефекти можуть рости і привести до розриву стінки труби і, відповідно, до аварії. Тому в даній роботі і поставлена мета розробити методику розрахунку залишкової довговічності труби нафтопроводу з врахуванням зварних швів і дефектів типу тріщин.

Енергетичний критерій втомного руйнування

Щоб знайти залишковий ресурс трубопроводу (час до розгерметизації), побудуємо розрахункові моделі розвитку дефектів і визначимо час до їх зростання наскрізь стінки (рис. 2). При цьому згідно з рис. 2 введемо такі позначення: r_1 – радіус труби; h_1 – товщина стінки труби.

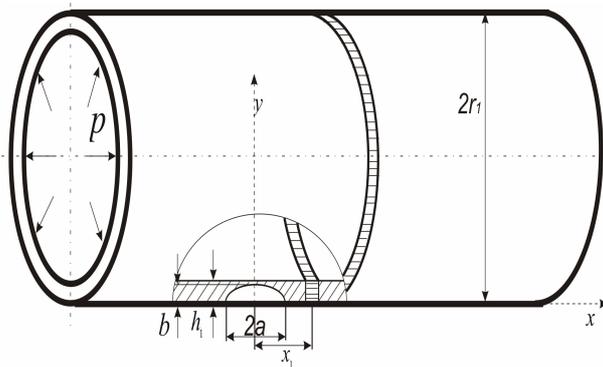


Рисунок 2 — Сема навантаження зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною

Вважаючи ріст тріщини неперервним, аналогічно [10], запишемо енергетичний баланс тіла для кожного моменту часу t у вигляді $A = W + \Gamma$, де A – робота зовнішніх сил; $W = W_e + W_p^{(1)}(S) + W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t)$ – енергія деформування тіла; W_e – пружна складова W ; $W_p^{(1)}(S)$ – робота пластичних деформацій, що залежить тільки від площі тріщини S ; $W_p^{(2)}(t)$ – робота пластичних деформацій від зовнішніх зусиль за постійної площі тріщини під час інкубаційного періоду підготовки її стрибка, що залежить тільки від часу t ; $W_p^{(3)}$ – робота пластичних деформацій під час стиску зони передруйнування внаслідок потенціальної енергії тіла, яка також виділяється за постійної площі тріщини під час інкубаційного періоду підготовки стрибка тріщини і залежить тільки від t ; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить лише від площі тріщини. Тому що виконується умова балансу енергії, то виконуватиметься умова

балансу швидкостей зміни енергії, яку запишемо так:

$$\frac{\partial \left[\Gamma - (A - W_e - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} + W_p^{(3)}) \right]}{\partial S} \cdot \frac{dS}{dt} - \frac{\partial (A - W_e - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} + W_p^{(3)})}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Будемо вважати, що тиск в трубі нафтопроводу змінюється циклічно з періодом $T = 2\pi\omega^{-1}$; ω – частота циклічного навантаження. При цьому, опишемо його наступною синусоїдою

$$p(t) = a_1 + b_1 \sin \omega t. \quad (2)$$

Помноживши рівняння (1) на T і продиференціювавши з урахуванням залежностей функцій від S і t , для визначення швидкості поширення тріщини $V = dS/dt$ отримаємо [6, 9]:

$$\frac{dS}{dN} = \frac{W_C^{(1)}}{\gamma - \gamma_s}. \quad (3)$$

Тут N – кількість циклів навантаження; γ – густина енергії руйнування матеріалу [6, 9]; γ_s – густина потенціальної енергії в зоні передруйнування за максимуму напружень циклу; $W_C^{(1)}$ – циклічна складова дисипації енергії в зоні передруйнування за один цикл навантаження. Оскільки товщина стінки нафтопроводу h набагато менша від радіуса труби r_1 , то для спрощення, вважатимемо, що тріщина розвивається в нескінченній пластині під змінним навантаженням p .

Величини γ , γ_s , і $W_C^{(1)}$ розраховуємо так [6, 9]:

$$\gamma_s = \frac{\varepsilon_{fc}}{\delta_{fc} \Delta S} \int_L dx \int_0^{l_s} \sigma_{of} \delta_{\max}(\xi, x) d\xi; \quad (4)$$

$$\gamma = 0,75 \sigma_{of} \varepsilon_{fc};$$

$$W_C^{(1)} = \frac{\varepsilon_{fc}}{\delta_{fc}} \int_0^{l_c} \int \sigma_{of} [\delta_{\max}(\xi, x, 0) - \delta_{\min}(\xi, x, 0)] dx d\xi.$$

Тут σ_{of} – усереднене напруження в зоні передруйнування під навантаженнями p ; ΔS – площа зони передруйнування біля контуру тріщини; δ_{\max} , δ_{\min} – максимальне і мінімальне розкриття модельного розрізу вздовж зони передруйнування [6]; δ_{fc} – його критичне значення, за критичного значення деформації ε_{fc} під циклічним навантаженням; $d\xi$ – зміна довжини дуги вздовж контуру тріщини L ; l_f , l_s – ширина циклічної і статичної зон передруйнування; l_c – критичне значення l_s .

Щоб спростити розв'язання задачі, вважатимемо $\delta_{\max} - \delta_{\min}$ однаковим і під час зростання, і спадання навантаження, що піде в запас

довговічності. Тому за результатом праць [6, 9] знайдемо:

$$\begin{aligned} \delta_{\max} - \delta_{\min} &= 0,5\delta_{\max}(1-R)^2 = \\ &= 0,5K_{\text{Imax}}^2 E^{-1} \delta_{\text{of}}^{-1} (1-R)^2, \end{aligned}$$

$$l_f - 0,25l_s(1-R)^2 = 0,1\sigma_{\text{of}}^{-2} K_{\text{Imax}}^2 (1-R)^2. \quad (5)$$

Тут $R = p_{\min} p_{\max}^{-1}$ – коефіцієнт асиметрії циклу. На цій основі, а також результатів [6, 9] співвідношення (4) набуде вигляду

$$\begin{aligned} W_C^{(1)} &= 0,0368\alpha\beta\varepsilon_{fc} K_{fc}^{-2} \sigma_{\text{of}}^{-1} \times \\ &\times \int_L [K_{\text{Imax}}(\xi, 0) - K_{\text{Imin}}(\xi, 0)]^4 d\xi; \\ \gamma_s &= 0,2944\varepsilon_{fc} K_{fc}^{-2} (\Delta S) \sigma_{\text{of}}^{-1} \times \\ &\times \int_L (K_{\text{Imax}}(\xi, 0))^4 d\xi; \\ \Delta S &= 0,3927\sigma_{\text{of}}^{-2} \int_L (K_{\text{Imax}}(\xi, 0))^2 d\xi. \end{aligned} \quad (6)$$

Тут $K_{\text{Imax}}(\xi, 0), K_{\text{Imin}}(\xi, 0)$ – мінімальне і максимальне значення K_I для циклу.

Застосуємо метод еквівалентних площ [5, 6], згідно якого зміна площі втомної тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для кругової тріщини радіуса a рівної площі. Звідси запишемо наближені значення $K_{\text{Imax}}(\xi, 0), K_{\text{Imin}}(\xi, 0)$, як для пластини з поверхневою пів круговою тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими напруженнями $\sigma = r_1 h_1^{-1} p(t)$:

$$\begin{aligned} K_{\text{Imax}}(\xi, 0) &= 2r_1 h_1^{-1} \pi^{-1/2} a^{1/2} (a_1 + b_1), \\ K_{\text{Imin}}(\xi, 0) &= 2\pi^{-1/2} r_1 h_1^{-1} a^{1/2} (a_1 - b_1), \end{aligned} \quad (7)$$

Співвідношення (7) підставляємо в (6), а потім разом з (5) – в (3). В результаті отримаємо:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1,3\alpha\beta a^2 r_1^4 h_1^{-4} b_1^2}{\sigma_{\text{of}}^2 [K_{fc}^2 - 1,2732ar_1^2 h^{-2} (a_1 + b_1)^2]}. \quad (8)$$

Таким чином, для визначення докритичного росту тріщини, коли порушиться герметичність труби, одержано диференціальне рівняння (8). Воно визначає тільки кінетику росту втомної тріщини, а для завершеної математичної моделі додамо ще початкові і кінцеві умови [5, 6]:

$$N = 0, \quad a = \sqrt{\pi^{-1} S_0}; \quad (9)$$

$$N = N_g, \quad a = h_1. \quad (10)$$

Співвідношення (8) – (10) визначають період N_g докритичного росту втомної тріщини тільки від циклічної зміни внутрішнього тиску p . Для врахування залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ (x_1 – віддаль центра тріщини від середини зварного шва (рис. 2)), які діють в околі зварного шва, поступаємо наступним чином.

Врахування зварних напружень і визначення залишкового ресурсу

В працях [11, 12] розроблений ефективний підхід для визначення залишкових напружень біля зварних швів в трубопроводах. Використовуючи даний підхід, знайдемо [11] розподіл залишкових напружень біля багатошарового зварного шва в трубопроводі $\varnothing 1420 \times 22,5$ мм; матеріал труби – сталь X70. На рис. 3 побудовані для цього випадку графічні залежності колишніх залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ від відстані x_1 до осі зварного шва. Тут крива 1 відповідає зовнішній поверхні стінки труби, а крива 2 – внутрішній. Ці графічні залежності достатньо добре можна описати такими рівняннями:

$$\begin{aligned} \sigma_3^{(1)} &= \frac{48,13 - 2408,68 x_1}{1 - 109,53 x_1 + 3639 x_1^2}, \\ \sigma_3^{(2)} &= \frac{34,01 - 1691 x_1}{1 - 108,02 x_1 + 3541 x_1^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

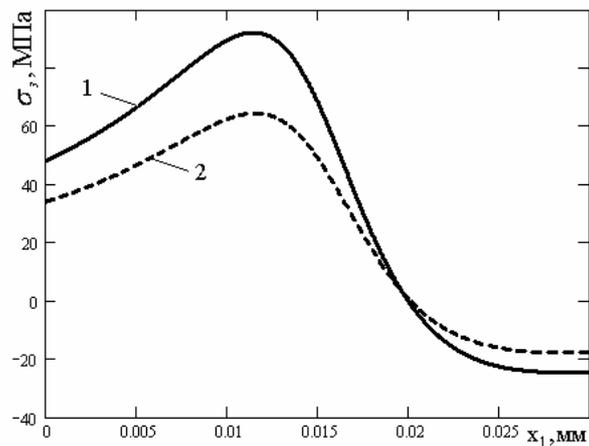


Рисунок 3 — Залежність залишкових напружень від віддалі x_1 до осі зварного шва: 1 – на зовнішній поверхні труби; 2 – на внутрішній поверхні

Середні значення залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ в стінці труби будуть визначатися за формулою

$$\sigma_3(x_1) = 0,5(\sigma_3^{(1)} + \sigma_3^{(2)}). \quad (12)$$

Тоді сумарні напруження в стінці труби $\sigma(x_1)$ будуть рівні сумі напружень $\sigma_3(x_1)$ і напружень від внутрішнього тиску p , тобто

$$\sigma(x_1) = \sigma_3(x_1) + p r_1 h_1^{-1}. \quad (13)$$

Розрахунок залишкового ресурсу N_1 будемо здійснювати при наступних параметрах роботи труби нафтопроводу, розмірів вихідної тріщини і констант матеріалу $r_1 = 0,512$ м, $h_1 = 0,012$ м, $p = 4,5$ МПа, $K_{fc} = 86$ МПа $\sqrt{м}$, $a_0 = 0,0014$ м, $a_1 = b_1 = 2,2$ МПа, $\sigma_0 = 420$ МПа

З врахуванням (13) співвідношення (7) запишуться так:

$$K_{\text{Imax}}(\xi, 0) = 2 \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/2} (\sigma_3(x_1) + pr_1 h_1^{-1}), \quad (14)$$

$$K_{\text{Imin}}(\xi, 0) = 2\pi^{-1/2} \sigma_3(x_1) a^{1/2}.$$

Тоді на основі співвідношень (4) – (14) для визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання рівняння (3) набуде такого вигляду:

$$\frac{da}{dN} = \frac{0,0675 p^4 r_1^4 h_1^{-4} a^2 \sigma_0^{-2}}{(K_{fC}^2 - 4\pi^{-1} a (\sigma_3(x_1) + pr_1 h_1^{-1})^2)} \quad (15)$$

при початкових і кінцевих умовах (9), (10). Інтегруючи рівняння (15) при цих умовах, отримуємо:

$$N_g = \sigma_0^2 A_1 (a_0^{-1} - h_1^{-1}) - \sigma_0^2 A_2 \ln \frac{h_1}{a_0},$$

$$A_1 = 14,8131 p^{-4} r_1^{-4} h_1^4 K_{fC}^2, \quad (16)$$

$$A_2 = 18,8702 h_1^4 p^{-4} r_1^{-4} (\sigma_3(x_1) + pr_1 h_1^{-1})^2.$$

Підставляючи в (16) вище згадані значення відповідних параметрів і проводячи обчислення, на рис. 4 побудована графічна залежність залишкового ресурсу N_g від відстані тріщини x_1 до осі зварного шва.

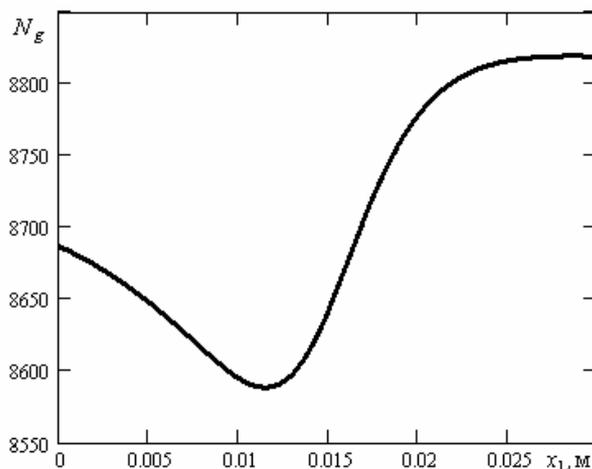


Рисунок 4 — Графічна залежність залишкового ресурсу N_g зварного з'єднання від відстані тріщини до осі зварного шва

ВИСНОВКИ

Запропонований енергетичний підхід для визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання магістрального трубопроводу з тріщиною. Реалізація даного підходу здійснюється для зварного з'єднання нафтопроводу в реальних умовах експлуатації за допомогою методу еквівалентних площ.

В рамках даного підходу побудована залежність залишкового ресурсу зварного з'єднання нафтопроводу від відстані тріщини до осі зварного шва. Якісно ця залежність є оберненою по величині до розподілу залишкових напружень. Як впливає з проведених обчислень, невраху-

вання зварних напружень при визначенні залишкового ресурсу зварного з'єднання магістрального трубопроводу може призвести до значної переоцінки його залишкового ресурсу і непередбачуваної аварії.

Література

1 Анучкин М.П., Горницкий В.Н., Мирошниченко Б.Л. Трубы для магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1986. – С. 231.

2 Иванцов О.М., Харитонов В.И. Надежность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1978.

3 Анненков Н.П., Анучкин М.П. Оценка прочности магистральных трубопроводов методами линейной механики разрушения // Труды ВНИИСТ. – 1974. – Вып.30.

4 Агапкин В.М. Кривошеин Б. Л. Методы защиты трубопроводов от разрывов при неустановившихся режимах. – М.: ВНИИОЭНГ, 1976. – 40 с.

5 Андрейків О.Є., Іваницький Я.Л., Терлецька З.О., Кіт М.Б. Оцінка довговічності труби нафтогону з поверхневою тріщиною під двоісним блочним навантаженням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 3. – С. 103–108.

6 Андрейків О.Є., Кушнір Р.М., Цирульник О.Т. Визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з урахуванням наявних дефектів у її стінці і реальних умов експлуатації // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: ІЕЗ НАНУ, 2006. – С. 328–331.

7 Походня И.К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Прогресивний матеріал і технології. – К.: Академперіодика, 2003. – Т.1. – С. 7–32.

8 Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформации. – К.: Наук. думка, 1975. – 320 с.

9 Андрейків О.Є., Кіт М.Б. Визначення періоду докритичного росту тріщин в елементах конструкцій при їх двох частотному навантаженні // Машинознавство. – 2006. – № 2. – С. 3–7.6.1.4

10 Андрейків О.Є., Кіт М.Б., Сас Н.Б. Енергетичні критерії в механіці заповільненого руйнування матеріалів // Збірник тез доповідей 7-го Міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові, 18–20 травня 2005 р. – Львів, 2005. – С. 4–5.

11 Осадчук В.А., Драгілев А.В., Банахевич Ю.В., Пороховський В.В. Діагностування залишкових напружень у нафтогазопроводах в околі кільцевих зварних швів розрахунково-експериментальним методом // Машинознавство. – 2003. – №11. – С. 23–27.

12 Драгілев А.В., Осадчук В.А. Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в магістральних трубопроводах біля монтажних швів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 1(14). – С. 25–29.