

УДК: 539.375:539.4

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТРУБИ НАФТОПРОВОДУ ЗІ ЗОВНІШНЬОЮ ПОВЕРХНЕВОЮ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОЮ ТРІЩИНОЮ ЗА ЛАМІНАРНОГО ПОТОКУ НАФТИ І БАГАТОРАЗОВИХ ГІДРОУДАРІВ

О. С. АНДРЕЙКІВ¹, Г. М. НИКИФОРЧИН², І. П. ШТОЙКО², А. Р. ЛИСИК¹

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Запропоновано розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з зовнішньою поверхневою корозійно-механічною тріщиною за ламінарного потоку нафти і багаторазових гідроударів, в основі якої – раніше розроблений енергетичний підхід для дослідження сповільненого поширення тріщин, модель прикладання імпульсних навантажень і базові механізми поширення корозійно-механічної тріщини. З допомогою моделі вивчено залежність залишкового ресурсу труби нафтопроводу зі сталі Х60 від кількості в ній гідроударів.

Ключові слова: труба нафтопроводу, ламінарний потік нафти, гідроудари, енергетичний підхід, коефіцієнт інтенсивності напружень, зона передруйнування, період докритичного росту корозійно-механічних тріщин.

За ламінарного, ошадливого для міцності труби, потоку нафти і дії зовнішніх корозивно-агресивних середовищ труби нафтопроводів руйнуються шляхом зародження і поширення корозійно-механічних тріщин. Для визначення періоду їх докритичного росту (залишкового ресурсу – руйнування труби до течі) побудовано низку розрахункових моделей (див., наприклад, [1–8]). Однак, як відомо [9], потік нафти в трубі не є ламінарним, а здебільшого турбулентний і супроводжується гідроударами внаслідок збільшення швидкості перепомповування нафти, різкого закриття і відкриття засувки, що призводить до розривів нафтопроводів, великих економічних збитків і часто – до екологічних катастроф. Зокрема, збитки від гідроударів і корозії для Мінпаливенерго колишнього СРСР становили декілька сотень мільярдів доларів на рік. Втрачали майже 50 тис. т чорних металів. За оцінками експертів причинами розриву нафтопроводів є гідроудари (60%), перепади тиску і вібрації (25%), корозійні процеси (15%), природні явища і форсмажорні обставини (15%). Для таких випадків теоретичні аспекти (розрахункові моделі) розроблені ще недостатньо, а експериментальні дослідження через значні технічні труднощі виконані в малому об'ємі, тому не вдається встановити залежності для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій, зокрема труб з тріщинами, за таких фізико-хімічних впливів.

Нижче запропоновано розрахункову модель для встановлення періоду докритичного росту корозійно-механічної тріщини в трубі нафтопроводів за згаданих навантажень.

Формулювання розрахункової моделі. Щоб зрозуміти логіку побудови розрахункової моделі, розглянемо пластину з прямолінійною тріщиною довжини $2l_0$ (рис. 1), яка знаходиться під дією симетричного відносно лінії її розміщення навантаження F і корозивно-агресивного середовища, що викликають поширення

Контактна особа: І. П. ШТОЙКО, e-mail: ivan.shtoyko@gmail.com

тріщини. Вважаємо, що пластина розтягується постійними рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p , а за деякі проміжки часу знаходиться ще й під дією зосереджених у часі квазідинамічних навантажень амплітуди P . Тут приймаємо, що за час росту тріщини є n таких додаткових навантажень. Необхідно визначити залишкову довговічність пластины з урахуванням цих змін навантажень, тобто часу $t = t_*$, коли в результаті дії механічних навантажень і корозивно-агресивного середовища корозійно-механічна тріщина підросте до критичного розміру l_* і пластина зруйнується.

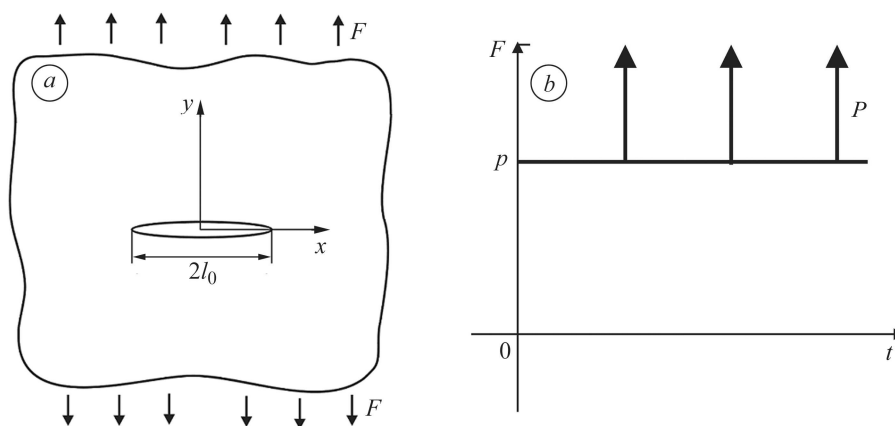


Рис. 1. Схема навантаження пластины з тріщиною (а) і зміни в часі параметра зовнішнього навантаження F (b).

Fig. 1. Scheme of plate loading with crack (a) and the external loading parameter F change in time (b).

Для розв'язання задачі використаємо запропонований раніше [10, 11] енергетичний підхід, заснований на першому законі термодинаміки для елементарного просування тріщини (стрибка) на віддаль Δl_c :

$$A = W + \Gamma + Q + K. \quad (1)$$

Тут A – робота зовнішніх сил; W – енергія деформування тіла після просування тріщини на віддаль Δl_c :

$$W = W_s + W_p^{(1)}(l) + W_p^{(2)}(l), \quad (2)$$

де W_s – пружна складова W ; $W_p^{(1)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій, що зумовлена рівномірно розподіленими зусиллями p і залежить тільки від довжини тріщини l ; $W_p^{(2)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування, що викликана зосередженими в часі квазістатичними зусиллями P і залежить тільки від довжини тріщини l ; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить від довжини тріщини l , характеристик середовища і часу t ; Q – виділена теплова енергія тіла під час руйнування, яку вважають відносно малою, тому її нехтуватимемо в обчисленнях; K – кінетична енергія, яка також несуттєва.

Так як виконується умова балансу енергії (1), то виконуватиметься умова балансу швидкостей зміни складових енергій:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t}. \quad (3)$$

Підставляючи вираз (2) у (3), цю умову можемо записати в такому вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - \left(A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} \right) \right] \frac{dl}{dt} - \frac{\partial}{\partial t} \Gamma = 0. \quad (4)$$

Із рівняння (4) швидкість поширення тріщини

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \Gamma / \frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - \left(A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} \right) \right]. \quad (5)$$

Використовуючи праці [10, 11], вираз у квадратних дужках рівняння (5) подамо так:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - \left(A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} \right) \right] = \gamma_c - \gamma_t - \partial W_p^{(2)} / \partial l, \quad (6)$$

де $\gamma_t = \delta_t \sigma_0$ – питома робота пластичних деформацій у зоні передруйнування біля вершини тріщини; $\gamma_c = \delta_{cc} \sigma_0$ – її критичне значення. Невідомі величини Γ , $W_p^{(2)}(l)$ визначатимемо, як і в працях [10–12]:

$$\Gamma = \Delta l_c \sigma_0 \delta_{cc}, \quad W_p^{(2)}(l) = 0,25(1-R)^4 \int_0^l \alpha_0 \sigma_0 \sum_{i=1}^n \delta(x-l_i) \left[\delta_{th}^2(x) - \delta_{sc}^2 \right] dx. \quad (7)$$

Тут α_0 – втомна характеристика матеріалу, яку знаходимо експериментально; δ_t – розкриття у вершині тріщини за навантаження p , а δ_{th} – за навантаження P ; δ_{cc} – його критичне значення за корозійного руйнування; δ_{sc} – нижнє порогове значення δ , коли тріщина не поширюється під тривалим навантаженням у корозивному середовищі; $R = \sqrt{\delta_t / \delta_{th}}$ – коефіцієнт асиметрії циклу; $\delta(x)$ – дельта-функція [13]; σ_0 – усереднене значення напружень у зоні передруйнування; l_i – довжина корозійно-механічної тріщини в момент i -го навантаження зусиллями P .

На основі відомих результатів [5, 14] довжину елементарного стрибка Δl_c тріщини подамо як суму довжини її поширення l_a внаслідок анодного розчинення і механічного стрибка l_m , спричиненого сумісною дією навантаження і наводнювання під час електрохімічної корозії, тобто

$$\Delta l_c = l_a + l_m. \quad (8)$$

Використовуючи результати праць [5, 14], величини l_m , l_a , δ_{cc} , що входять у формули (7) і (8), визначимо так:

$$l_m = \beta \delta_t, \quad l_a = F m^{-1} n^{-1} \int_0^{t_*} i(t) dt, \quad \delta_{cc} = \delta_c - A C_H(t_*). \quad (9)$$

Тут F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – його валентність; β , A – константи, які визначають із експерименту [12].

Підставляючи формули (6)–(9) у (5) з урахуванням відомих результатів [15–18], отримаємо рівняння для визначення періоду докритичного росту тріщини $t = t_*$ у пластині за дії постійних зусиль p і зосереджених у часі квазідинамічних навантажень P :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{[\partial(\delta_{cc} \Delta l_c) / \partial t]_{t=t_*}}{\delta_{cc} - \delta_t - 0,25 \alpha_0 (1-R)^4 \sum_{i=1}^n \delta(t-l_i) \left[\delta_{th}^2(t) - \delta_t^2 \right]}. \quad (10)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (10) додамо відповідно такі початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad \gamma_t(l_*) = \gamma_c. \quad (11)$$

Якщо навантаження P відсутні і $W_p^{(2)}(t) = 0$, то рівняння (10) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{[\partial(\delta_{cc}\Delta l_c)/\partial t]_{t=t_*}}{\delta_{cc} - \delta_t}. \quad (12)$$

Встановлено [19, 20], що для малих і середніх значень δ_t швидкість V_{sc} поширення корозійно-механічної тріщини є приблизно постійна і не міняється зі зміною δ_t , тобто

$$\frac{dl}{dt} = \frac{[\partial(\delta_{cc}\Delta l_c)/\partial t]_{t=t_*}}{\delta_{cc} - \delta_t} \approx V_{sc}. \quad (13)$$

Тоді

$$[\partial(\delta_{cc}\Delta l_c)/\partial t]_{t=t_*} = V_{sc}(\delta_{cc} - \delta_t). \quad (14)$$

На основі (14) рівняння (10) можна ще записати так:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{V_{sc}(\delta_{cc} - \delta_t)}{\delta_{cc} - \delta_t - 0,25\alpha_0(1-R)^4 \sum_{i=1}^n \delta(l-l_i) [\delta_{th}^2(l) - \delta_t^2]}. \quad (15)$$

Інтегруючи рівняння (15) за умов (11) і вважаючи, що тріщина макроскопічна, тобто виконуються співвідношення

$$\delta_t(l)\delta_{cc}^{-1} = K_I^2(l)K_{Ic}^{-2}, \quad \delta_{sc} = K_{sc}^2(\sigma_0 E)^{-1}, \quad \delta_t(l) = K_I^2(l)(\sigma_0 E)^{-1},$$

отримаємо:

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} V_{sc}^{-1} dl - \frac{\alpha_0(1-R)^4}{8V_{sc}E\sigma_0} \sum_{i=1}^n [K_{Ih}^4(l_i) - K_{sc}^4] [K_{fc}^2(l_i) - K_I^2(l_i)]^{-1}. \quad (16)$$

Тут критичну довжину l_* тріщини визначаємо з критерію Ірвіна [5]:

$$K_I(l_*) = K_{fc}. \quad (17)$$

Вважатимемо, що навантаження P відбувається в часи $t = t_i$ ($i = 1, \dots, n$), коли корозійно-механічна тріщина поширюється на однакові довжини $\Delta l = n^{-1}(l_* - l_0)$. Використовуючи теорему про середнє [13] за великих n , тобто при $\Delta l \ll (l_* - l_0)$, вираз (16) запишемо так:

$$t_* = V_{sc}^{-1}(l_* - l_0) - \frac{\alpha_0(1-R)^4}{8V_{sc}E\sigma_0} \frac{n}{l_* - l_0} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[K_{Ih}^4(l) - K_{sc}^4]}{[K_{fc}^2 - K_I^2(l)]} dl. \quad (18)$$

Отже, співвідношення (18), коли відомі значення V_{sc} , σ_0 , α_0 , K_{fc} , K_{sc} , E , n , визначає залишкову довговічність тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами, які працюють за дії корозивно-агресивного середовища, довготривалого статичного навантаження p і зосереджених у часі квазідинамічних навантажень P (маневровий режим експлуатації).

Аналог задачі Гріффітса під час поширення корозійно-механічної тріщини за маневрового режиму експлуатації. Розглянемо нескінченну металеву пластину з початковою тріщиною довжини l_0 , яка розтягується постійними рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p , а за деякі проміжки часу n разів додатково навантажена зосередженими в часі квазідинамічними навантаженнями P . Необхідно визначити час $t = t_*$, з досягненням якого тріщина підросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Для розв'язання задачі застосуємо сформульовану розрахункову модель (10)–(11) і (15), а також кінцеву формулу (18), в яку необхідно підставити $K_I = p\sqrt{\pi l}$. Тоді вона набуде вигляду

$$t_* = V_{sc}^{-1}(l_* - l_0) - \frac{\alpha_0(1 - pP^{-1})^4}{8V_{sc}E\sigma_0} \frac{n}{l_* - l_0} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[P^4\pi^2 l^2 - K_{sc}^4]}{[K_{fc}^2 - p^2\pi l]} dl. \quad (19)$$

Проінтегрувавши вираз (19), отримаємо:

$$t_* = V_{sc}^{-1}(l_* - l_0) - 0,125\alpha_0 n (V_{sc}E\sigma_0)^{-1} (l_* - l_0)^{-1} \{(\pi^{-1}p^{-6}P^4K_{fc}^4 - \pi^{-1}p^{-2}K_{sc}^4) \times \\ \times \ln[(K_{fc}^2 - \pi p^2 l_0)(K_{fc}^2 - \pi p^2 l_*)^{-1}] - p^{-4}P^4 [K_{fc}^2(l_* - l_0) + 0,5\pi p^2(l_*^2 - l_0^2)]\}. \quad (20)$$

Розглянемо пластину, виготовлену зі сталі Х60, для якої [19, 20] $\alpha_0 = 2$, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_0 = 485$ МПа, $K_{fc} = 101$ МПа \sqrt{m} , $V_{sc} = 17 \cdot 10^{-9}$ м/х, $K_{sc} = 9,2$ МПа \sqrt{m} . При цьому вважатимемо, що пластина розтягується постійними навантаженнями $p = 340$ МПа, а зосереджені в часі квазідинамічні навантаження $P = 455$ МПа, за яких $l_* = 0,015$ м (це відповідає ситуації в трубі нафтопроводу із експлуатованої сталі Х60 за робочого тиску 9 МПа і гідроударів амплітудою 12 МПа). Підставляючи ці дані у формулу (20), отримаємо:

$$t_* = 101 \cdot (1 - \epsilon_0) - 4,3 \cdot 10^{-3} n (1 - \epsilon_0)^{-1} [0,76 + \ln(1 - 0,53\epsilon_0) - \\ - 0,67(1 - 0,79\epsilon_0) + 0,14\epsilon_0^2] \text{ (years)}, \quad \epsilon_0 = l_0 l_*^{-1}. \quad (21)$$

Тут невідомі величини t_* і n . Вважаємо, що за рік пластина піддана кількості m зосереджених у часі квазідинамічних навантажень P , тобто

$$n = m \cdot t_*. \quad (22)$$

Тоді на основі виразів (21) і (22) залишкова її довговічність

$$t_* = \frac{101(1 - \epsilon_0)}{1 + 4,3 \cdot 10^{-3} m (1 - \epsilon_0)^{-1}}; \\ f(\epsilon_0) = [0,76 + \ln(1 - 0,53\epsilon_0) - 0,67(1 - 0,79\epsilon_0) - 0,14\epsilon_0^2]. \quad (23)$$

Взявши до уваги вказані вище дані та співвідношення (23), побудуємо залежність залишкової довговічності $t = t_*$ від зміни кількості m зосереджених у часі квазідинамічних навантажень P (рис. 2) без і з урахуванням додаткового навантаження P .

За маневрового режиму експлуатації залишкова довговічність пластини дещо менша, ніж за стаціонарного, що свідчить про необхідність врахувати під час розрахунку ефект дії зосереджених у часі квазідинамічних навантажень P .

За тривалої дії експлуатаційних навантажень і навколишнього середовища пришвидшується розвиток у трубах нафтопроводів і їх зварних з'єднаннях дефектів типу тріщин, що призводить до експлуатаційних їх відмов. Тому, щоб передбачити це, важливо визначити їх залишковий ресурс з урахуванням експлуатаційних чинників. Щоб знайти залишкову довговічність нафтопроводу в маневровому режимі роботи (час до розгерметизації), побудуємо розрахункову модель розвитку в стінці труби товщиною h і радіуса r поверхневої півеліптичної тріщини з півосями a_0 , b_0 (рис. 3). Вважаємо, що в середині труби діє постійний тиск p , а за деякі проміжки часу вона додатково знаходиться під впливом зосереджених у часі квазідинамічних навантажень (гідроударів). Тут приймаємо, що за час росту тріщини відбувається n таких додаткових навантажень амплітудою P . Слід визначити залишкову довговічність труби з урахуванням цих змін, тобто час $t = t_*$,

коли внаслідок дії механічних навантажень і корозивно-агресивного середовища корозійно-механічна тріщина проросте крізь стінку труби $b = h$ і вона розгерметизується (рис. 3).

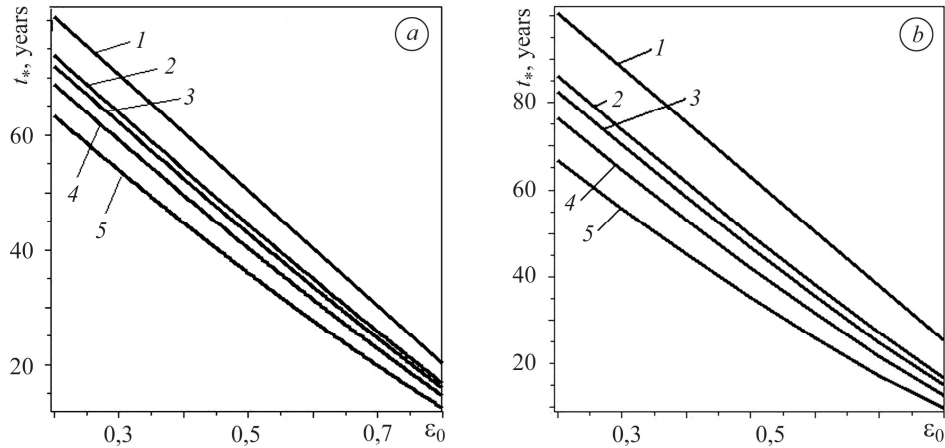
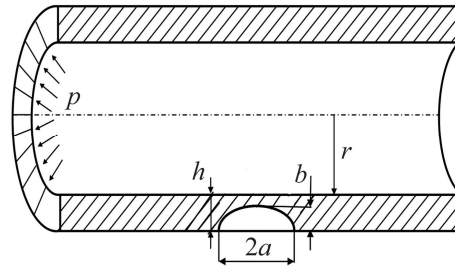


Рис. 2. Залежність залишкової довговічності t_* пластини (а) та труби (б) від зміни безрозмірної початкової довжини тріщини ϵ_0 в стаціонарному (крива 1) і маневровому (криві 2–5) режимах експлуатації за різної кількості m зосереджених в часі квазидинамічних навантажень P за рік: 2 – $m = 195$; 3 – 255; 4 – 365; 5 – 585.

Fig. 2. Dependence of residual lifetime t_* for plate (a) and pipe (b) on dimensionless value ϵ_0 of the initial crack length changes in stationary (curve 1) and shunting (curves 2–5) modes of operation for different values of the number m of time focusing quasi dynamic loads P per year: 2 – $m = 195$; 3 – 255; 4 – 365; 5 – 585.

Рис. 3. Схема навантаження труби нафтопроводу з зовнішньою поверхневою тріщиною.

Fig. 3. Scheme of oil pipe loading with external surface crack.



За енергетичним підходом зводимо задачу до розв'язання диференціального рівняння за таких початкових і кінцевих умов:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \Gamma / \frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right]; \quad (24)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad (25)$$

де критична площа тріщини

$$S_* = \pi b(t_*) a(t_*), \quad b(t_*) = h_1. \quad (26)$$

Тут A – робота зовнішніх сил; W_s – пружна компонента енергії деформації W ; $W_p^{(1)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування біля контуру тріщини, що викликані тиском p і залежні тільки від площі тріщини S ; $W_p^{(2)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування, що зумовлені гідроударами амплітуди P і залежні тільки від площі тріщини S ; Γ –

енергія руйнування стінки труби, яка залежить від площі тріщини S , характеристик середовища і часу t .

Розв'язати задачу (24)–(26) математично складно. Тому, не втрачаючи потрібної для інженерних цілей точності, застосуємо метод еквівалентних площ [10], згідно з яким зміна площі тріщини розглядуваної конфігурації буде наближено така, як для півкрової радіуса ρ такої ж початкової площі. При цьому вважаємо, що швидкість поширення півколової тріщини у всіх точках її контуру однакова. Враховуючи це, одержимо:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{V_{sc}(K_{fc}^2 - K_I^2)}{K_{fc}^2 - K_I^2 - 0,25\alpha_0\sigma_0^{-1}E^{-1}(1-R)^4 \sum_{i=1}^n \delta(\rho - \rho_i)[K_{Ih}^4 - K_{sc}^4]} \quad (27)$$

за початкової і кінцевої умов

$$t=0, \quad \rho(0) = \rho_0 = \sqrt{a_0 b_0}; \quad t=t_*, \quad \rho(t_*) = h. \quad (28)$$

Тут ρ_i – радіус півколової тріщини в момент i -го її просування. Коефіцієнт інтенсивності напружень K_I у цьому випадку запишемо у вигляді [14]

$$K_I = 0,7\sigma\sqrt{\pi h} f(\varepsilon), \quad f(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon(1+0,32\varepsilon^2)(1,04+0,23\varepsilon^2-0,1\varepsilon^4)}; \\ \varepsilon = \rho/h; \quad \varepsilon_0 = \rho_0 h^{-1}; \quad \sigma = prh^{-1}. \quad (29)$$

Розраховуватимемо для конкретної сталі Х60 труб нафтопроводів. Інтегруючи рівняння (27) за умов (28) і враховуючи (29), отримаємо:

$$t_* = \int_{\rho_0}^h V_{sc}^{-1} dl - \frac{\alpha_0(1-R)^4}{4V_{sc}E\sigma_0} \sum_{i=1}^n [K_{Ih}^4(\rho_i) - K_{sc}^4] [K_{fc}^2 - K_I^2(\rho_i)]^{-1}. \quad (30)$$

Тут $K_{Ih}^4(\rho_i)$ визначимо за формулою (30), якщо $\sigma = Prh^{-1}$.

Вважаючи n достатньо великим, тобто підростання тріщини $\Delta\rho_i$ після кожного гідроудару достатньо мале проти $\Delta\rho = (h - \rho_0)$, а також використовуючи теорему про середнє, співвідношення (30) можемо записати так:

$$t_* = V_{sc}^{-1} h(1 - \varepsilon_0) - \frac{\alpha_0(1 - pP^{-1})^4}{4V_{sc}E\sigma_0} \frac{n}{1 - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{[2,37P^4 r^4 h^{-2} f^4(\varepsilon) - K_{sc}^4]}{[K_{fc}^2 - 1,54p^2 r^2 h^{-1} f^2(\varepsilon)]} d\varepsilon. \quad (31)$$

Залишкову довговічність $t = t_*$ труб з урахуванням поширення тріщин розраховуватимемо для такої їх геометрії і силового навантаження [21–24]: для сталі Х60 – $r = 0,71$ м, $h = 0,0187$ м, $p = 9$ МПа, $P = 12$ МПа, а для експлуатованих труб $K_{sc} = 10$ МПа \sqrt{m} ; $K_{fc} = 101$ МПа \sqrt{m} ; $V_{sc} = 17 \cdot 10^{-9}$ м/х.

Для числової реалізації задачі співвідношення (31) запишемо через вказані вище геометричні і силові параметри, а також характеристики матеріалів для сталі Х60 у такому вигляді:

$$t_* = 125,6 \cdot (1 - \varepsilon_0) - \frac{2,4 \cdot 10^{-4} n}{1 - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{f^4(\varepsilon)}{[1 - 0,33f^2(\varepsilon)]} d\varepsilon \quad (\text{years}). \quad (32)$$

Вважатимемо також, що за рік труба m разів знаходиться під дією зосереджених у часі квазідинамічних тисків P , тобто n визначає формула (22). Тоді залишкова довговічність труби з урахуванням гідроударів

$$t_* = 125,6 \cdot (1 - \varepsilon_0)^2 [1 - \varepsilon_0 + 2,4 \cdot 10^{-4} m \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{f^4(\varepsilon)}{[1 - 0,33f^2(\varepsilon)]} d\varepsilon]^{-1} \quad (\text{years}). \quad (33)$$

На основі співвідношення (33) побудували (рис. 2b) залежність залишкової довговічності t_* пластини від безрозмірного початкового розміру тріщини ϵ_0 без і з урахуванням дії зосереджених у часі квазідинамічних навантажень (маневровий режим експлуатації). В інженерній практиці важливо знати, як залежить довговічність нафтопроводу від гідроударів, що і вдалось дослідити за математичною моделлю (27), (28).

ВИСНОВКИ

На основі раніше розробленого енергетичного підходу для дослідження сповільненого поширення тріщин, моделі прикладання імпульсних навантажень, а також базових механізмів поширення корозійно-механічної тріщини сформульована розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з зовнішньою поверхневою корозійно-механічною тріщиною за ламінарного потоку нафти і багаторазових гідроударів. З її допомогою вивчено залежність залишкового ресурсу труби нафтопроводу зі сталі X60 від кількості в ній гідроударів. Виявлено, що гідроудари навіть за незначного перевищення робочого тиску (до 3 МПа) можуть знизити довговічність труби нафтопроводу більш ніж на 30%.

РЕЗЮМЕ. Предложена расчетная модель для определения остаточного ресурса трубы нефтепровода с внешней поверхностной коррозионно-механической трещиной при ламинарном потоке нефти и многократных гидроударах. В ее основе – ранее разработанный энергетический подход для исследования замедленного распространения трещин, модель приложения импульсных нагрузок и базовые механизмы распространения коррозионно-механической трещины. С помощью модели исследована зависимость остаточного ресурса трубы нефтепровода из стали X60 от количества в ней гидроударов.

SUMMARY. The calculation model to determine the residual lifetime of the pipeline with outer surface corrosion-mechanical crack under the laminar flow of oil and reusable hydroblow is proposed. The model is based on energy approach to investigation of slow crack propagation previously developed by authors, model of pulse load application and the basic mechanisms of the corrosion-mechanical cracks growth. On the basis of the model the dependence of the residual resource of X60 steel oil pipes on the amount of water hammer is studied.

1. *Похмурский В. И.* Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
2. *Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романов, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник.* – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
3. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1984. – 640 с.
4. *Панасюк В. В., Дмитрах І. М.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: ФМІ НАН України, 1999. – 340 с.
5. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
6. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
7. *Троценко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при малоцикловом нагружении. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
8. *Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures // Ed. A. Carpinteri.* – Elsevir, 1994. – 1. – 952 p.
9. *Аганкин В. М., Кривошеин Б. Л.* Методы защиты трубопроводов от разрывов при неустановившихся режимах. – М.: ВНИИОЭНГ, 1976. – 40 с.
10. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 2. – С. 19–26. (*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // *Materials Science.* – 2008. – 44, № 2. – P. 163–174.)
11. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Механіка руйнування металевих пластин за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – 42, № 2. – С. 62–68.

- (*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // *Materials Science*. – 2006. – **42**, № 2. – P. 210–219.)
12. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
 13. *Кудрявцев Л. Д.* Курс математического анализа. – М.: Высш. шк., 1981. – 1. – 688 с.
 14. *Тим'як Н. І., Андрейків О. Є.* Визначення швидкості росту тріщин в умовах сумісної дії статичних навантажень і корозійно-активного середовища // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1995. – **31**, № 2. – С. 68–74.
(*Тим'як Н. І. and Andreikiv O. E.* Evaluation of crack-growth rate under conditions of simultaneous action of static loading and corrosive media // *Materials Science*. – 1995. – **31**, № 2. – P. 219–225.)
 15. *Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я.* Визначення електричних полів у системі електроліт–метал // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2007. – **43**, № 2. – С. 71–76.
(*Hembara O. V., Terlets'ka Z. O., and Chepil' O. Ya.* Determination of electric fields in electrolyte–metal systems // *Materials Science*. – 2007. – **43**, № 2. – P. 222–229.)
 16. *Elboujdaini M.* Initiation of environmentally assisted cracking in line pipe steel // 16th European on Fracture (ECF16th) “Fracture of Nano and Engineering materials and structures” (Alexandroupolis, Greece, July 3–7, 2006). – Dordrecht: Springer, 2006. – P. 1007–1008.
 17. *Слободян З. В., Никифорчин Г. М., Петрущак О. І.* Корозійна тривкість трубної сталі у нафтоводних середовищах // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2002. – **38**, № 3. – С. 93–96.
(*Slobodyan Z. V., Nykyforchyn H. M., and Petrushchak O. I.* Corrosion resistance of pipe steel in oil–water media // *Materials Science*. – 2002. – **38**, № 3. – P. 424–429.)
 18. *Розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту тріщин повзучості в елементах конструкцій за довготривалими статично-розривними навантаженнями / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, В. З. Кухар, Ю. Я. Матвіїв // Доп. НАН України*. – 2012. – № 4. – С. 50–56.
 19. *Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко, М. І. Греділь, Г. М. Никифорчин, Д. Габетта // Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2008. – **44**, № 5. – С. 29–37.
(*Influence of operation of Kh52 steel on corrosion processes in a model solution of gas condensate / О. Т. Tsyryl'nyk, Z. V. Slobodyan, O. I. Zvirko, M. I. Hredil', H. M. Nykyforchyn, G. Gabetta // Materials Science*. – 2008. – **44**, № 5. – P. 619–629.)
 20. *Електрохімічні показники експлуатаційної деградації сталей нафто- та газогонів / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, М. І. Греділь, О. І. Звірко, Д. М. Завербний // Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 284–289.
 21. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Визначення залишкового ресурсу труби з поверхневою тріщиною при довготривалому тиску і високій температурі // *Машинознавство*. – 2005. – № 4. – С. 3–6.
 22. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – К.: Наук. думка, 1988. – 648 с.
 23. *Чутливість до водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, Є. І. Крижанівський, Д. Ю. Петрина, О. С. Тарасівський, М. І. Греділь // Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2004. – **40**, № 6. – С. 111–114.
 24. *Крижанівський Є. І., Грабовський Р. С., Мандрик О. М.* Оцінювання робоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 1. – С. 105–110.
(*Kryzhaniv's'kyi, E. I., Hrabovs'kyi R. S., and Mandryk O. M.* Estimation of the serviceability of oil and gas pipelines after long-term operation according to the parameters of their defectiveness // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 1. – P. 117–123.)

Одержано 15.03.2016