

УДК:539.375;539.4:536.543

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ТРУБИ ГАЗОПРОВОДУ ЗА МАНЕВРОВОГО РЕЖИМУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА², В. З. КУХАР¹,
І. П. ШТОЙКО¹

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

Сформульована розрахункова модель для визначення довговічності труби газопроводу з поверхневою корозійною тріщиною за довготривалого розривного в часі тиску (маневровий режим експлуатації) і наводнювання її стінки. В основі моделі – розроблений раніше енергетичний підхід. Запропоновано механізм посилення корозійних процесів дифузійно рухливим воднем. Кількісно оцінено вплив наводнювання на залишковий ресурс труби газопроводу за маневрового режиму експлуатації.

Ключові слова: труба газопроводу, маневровий режим експлуатації, залишковий ресурс, перший закон термодинаміки, концентрація водню, коефіцієнт інтенсивності напружень, зона передруйнування, період докритичного росту корозійно-механічних тріщин.

На сьогодні в Україні термін служби більше 37% магістральних газопроводів (МГ) від їх загальної протяжності перевищив термін амортизації лінійної частини (33 роки), а 38% з них експлуатуються від 20 до 33 років. Загалом така система МГ вступила в третій період життєвого циклу – період відмов внаслідок старіння [1, 2], який характеризується зниженням їх робоздатності через посилення впливу корозійних і втомних процесів у металі труб і зварних швах, внаслідок чого збільшується ризик відмов. Тому виникла об'єктивна необхідність у розробці методології забезпечення робоздатності МГ на основі управління їх технічним станом, створення програм реконструкції і ремонту за фактичним станом та моніторингу.

У нормативних документах під час розрахунку довговічності труб і зварних з'єднань не враховують характеристик опору малоциклового руйнуванню, а найбільше – опору статично розривному в часі навантаженню. Аналіз умов експлуатації і типу руйнування трубопровідної системи свідчить про велику кількість відмов через вичерпання опору статично розривному в часі навантаженню (закриття і відкриття засувок). Ініціатором руйнування тут є малопомітний концентратор напружень типу тріщини.

Маневровий режим експлуатації (непередбачене закриття і відкриття засувок) – один із найнебезпечніших чинників виходу із ладу труб газопроводів. Моделювання їх навантаження за такого режиму малоцикловою втомою пов'язано з великими похибками, які підуть не в запас довговічності, а навпаки, в ризик непередбачуваного руйнування.

МГ у середньому витримують біля 360 циклів повторно-статичних навантажень в рік від внутрішнього тиску перепомповуваного газу, які викликають різні технологічні і експлуатаційні чинники (відключення помпових станцій через від-

мови електроустаткування, автоматики, механічного устаткування; зміни режимів перепомповування тощо). Повторно-статична дія внутрішнього тиску під час експлуатації газопроводів призводить до зародження і поширення статично-втомних тріщин у наводнених зонах металу труб [3, 4], а отже, до виникнення їх експлуатаційних відмов. Тому, щоб запобігти непередбаченому руйнуванню і аварійним ситуаціям, важливо визначити залишковий ресурс газопроводів з урахуванням експлуатаційних факторів, особливо за маневрового режиму експлуатації і наводнювання.

Розрахункова модель. Щоб знайти залишкову довговічність труби газопроводу в маневровому режимі роботи (час до розгерметизації) під час наводнювання її стінки в результаті катодного захисту, побудуємо розрахункову модель розвитку в стінці зовнішньої поверхневої півеліптичної тріщини з початковими півосями a_0, b_0 . Введемо (рис. 1а) такі позначення: r – радіус труби; h – товщина її стінки.

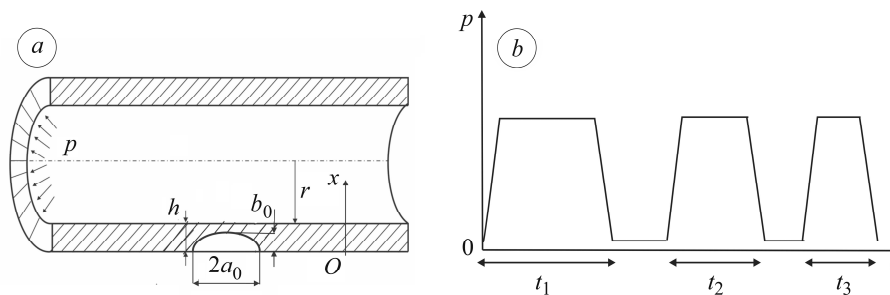


Рис. 1. Схема навантаження труби газопроводу з зовнішньою поверхневою тріщиною: а – зміна внутрішнього тиску; б – маневровий режим експлуатації.

Fig. 1. The load scheme of gas pipeline pipe with an external surface crack: а – change of the inner pressure in it; б – maneuvering operation mode.

Вважаємо, що в трубі діє постійний тиск p , а за деякі проміжки часу t_i ($i = 1, \dots, n$) відбувається його відключення, тобто закриваються і відкриваються засувки. У цьому випадку приймаємо, що за час росту тріщини є n таких додаткових зосереджених у часі навантажень (рис. 1б). Слід визначити залишкову довговічність труби з урахуванням цих змін, тобто часу $t = t_*$, коли внаслідок механічних навантажень, наводнювання її стінки за катодного захисту і дії корозивно-агресивного середовища тріщина проникне крізь стінку ($b = h$) і труба розгерметизується.

Для розв'язку задачі побудуємо математичну модель, тобто математичні рівняння, які описують цей процес. При цьому вважатимемо, що тріщина рухається неперервно від початкового розміру $S = S_0$ до кінцевого $S = S_*$. Це припущення коректне, оскільки її реальний рух супроводжується невеликими стрибками розміру ΔS_c за відносно тривалі проміжки часу t_0 .

Тому запишемо швидкість її росту V наближено в такому вигляді:

$$V = \frac{dS}{dt} \approx \frac{\Delta S_c}{t_0}. \quad (1)$$

Енергетичний баланс процесу для кожного стрибка тріщини ΔS_c буде:

$$A = W + \Gamma + Q + K. \quad (2)$$

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

$$W = W_s + W_p^{(1)}(S) + W_p^{(2)}(S), \quad (3)$$

де W_s – пружна складова енергії деформації W ; $W_p^{(1)}(S)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування біля контуру тріщини, які викликані тиском p і залежать тільки від площі тріщини S ; $W_p^{(2)}(S)$ – та їх частина, яку генерує тіло під час додаткового навантаження–розвантаження і яка залежить тільки від площі тріщини S ; Γ – енергія руйнування стінки труби, що залежить від площі тріщини S , характеристик середовища і часу t ; Q – теплова енергія за руйнування тіла, яку вважають відносно малою, тому під час обчислень її нехтуватимемо; K – кінетична енергія, яка тут також незначна.

Оскільки виконується умова балансу енергій, то виконуватиметься і умова балансу швидкостей зміни їх складових:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t}. \quad (4)$$

Підставляючи вираз (3) у формулу (4), цю умову запишемо так:

$$\frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] \frac{dS}{dt} - \frac{\partial \Gamma}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Тоді визначення залишкової довговічності труби зведемо до математичної задачі

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial \Gamma}{\partial t} / \frac{\partial}{\partial S} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right], \quad (6)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad (7)$$

$$t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad (8)$$

де критичну площу тріщини $S = S_*$ знаходимо за формулою

$$S_* = \pi b(t_*) a(t_*), \quad b(t_*) = h. \quad (9)$$

Розв'язок задачі (6)–(9) пов'язаний зі суттєвими математичними труднощами. Тому для його спрощення, не втрачаючи при цьому потрібної для інженерних цілей точності, застосуємо метод еквівалентних площ [5], згідно з яким площа тріщини розглядуваної конфігурації змінюватиметься наближено так само, як і півколової радіуса ρ такої ж початкової площі. При цьому вважаємо, що швидкість поширення півколової тріщини у всіх точках її контуру однакова. Враховуючи це, математичну модель (6)–(9) запишемо так:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \Gamma}{\partial t} / \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right], \quad (10)$$

$$t = 0, \quad \rho(0) = \sqrt{\pi^{-1} S_0}; \quad (11)$$

$$t = t_*, \quad \rho(t_*) = h.$$

На основі відомих результатів [5] вираз у квадратних дужках рівняння (10) подамо так:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(1)} - W_p^{(2)}) \right] = \gamma_C - \gamma_t - \frac{\partial W_p^{(2)}}{\partial \rho}, \quad (12)$$

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; δ_t – розкриття у вершині

тріщини за навантаження p ; δ_{CC} – його критичне значення за корозійного руйнування; σ_0 – усереднені напруження у зоні передруйнування. Невідомі величини Γ , $W_p^{(2)}(\rho)$ визначимо, користуючись результатами праць [6–8]:

$$\Gamma = \Delta\rho_C \sigma_0 \delta_{CC}, \quad \Delta\rho_C = 0,16\rho^{-1} \Delta S_C,$$

$$W_p^{(2)}(\rho) = 0,25(1-R)^4 \int_0^\rho \alpha_0 \sigma_0 \sum_{i=1}^n \delta(\rho - \rho_i) \left[\delta_t^2(\rho) - \delta_{scc}^2 \right] d\rho. \quad (13)$$

Тут α_0 – втомна характеристика матеріалу, яку визначають експериментально; δ_{scc} – нижнє порогове значення δ_t , за якого тріщина не поширюється під корозійно-механічним навантаженням; $R = \sqrt{\delta_{scc} / \delta_t}$ – коефіцієнт асиметрії циклу; $\delta(x)$ – дельта-функція [9]; ρ_i – радіус контуру корозійно-механічної тріщини в момент i -го навантаження–розвантаження тиском газу p .

Підставляючи вирази (12), (13) у (10) з урахуванням відомих результатів [8, 10–13], отримаємо рівняння для визначення періоду докритичного росту тріщини $t = t_*$ у трубі під дією постійного тиску, а також n навантажень–розвантажень:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{[\partial(\delta_{CC} \Delta\rho_C) / \partial t]_{t=t_0}}{\delta_{CC} - \delta_t - 0,25\alpha_0(1-R)^4 \sum_{i=1}^n \delta(\rho - \rho_i) \left[\delta_t^2(\rho) - \delta_{scc}^2 \right]}. \quad (14)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (14) додамо відповідно такі початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad \rho(0) = \rho_0; \quad (15)$$

$$t = t_*, \quad \rho(t_*) = h. \quad (16)$$

Якщо навантаження і розвантаження відсутні, то воно набуде вигляду

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{[\partial(\delta_{CC} \Delta\rho_C) / \partial t]_{t=t_0}}{\delta_{CC} - \delta_t}. \quad (17)$$

Як свідчать результати випроб [11–13], за малих і середніх значень δ , швидкість V_{sc} поширення корозійно-механічної тріщини за сталого навантаження є постійною, тобто

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{[\partial(\delta_{CC} \Delta\rho_C) / \partial t]_{t=t_0}}{\delta_{CC} - \delta_t} \approx V_{sc}. \quad (18)$$

Звідси знайдемо, що

$$[\partial(\delta_{CC} \Delta\rho_C) / \partial t]_{t=t_0} = V_{sc} (\delta_{CC} - \delta_t). \quad (19)$$

Тепер рівняння (14) можна записати ще як

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{V_{sc} (\delta_{CC} - \delta_t)}{\delta_{CC} - \delta_t - 0,25\alpha_0(1-R)^4 \sum_{i=1}^n \delta(\rho - \rho_i) \left[\delta_t^2(\rho) - \delta_{scc}^2 \right]} \quad (20)$$

за початкових і кінцевих умов (15), (16).

Вважаємо, що за тривалий час поверхня стінки труби може наводнюватися за катодного захисту до концентрації водню $C_H(h)$, яка в стаціонарному режимі по товщині труби розподілятиметься за лінійним законом:

$$C_H(x) = C_H(h) h^{-1} (h - x). \quad (21)$$

Тут x – перпендикулярна до поверхні труби координата (рис. 1).

На основі результатів праць [8, 14] довжину стрибка $\Delta\rho_c$ тріщини подамо як суму елементарного її поширення на довжину ρ_a внаслідок анодного розчинення під час наводнювання стінки труби і механічного стрибка ρ_m у результаті навантаження, тобто

$$\Delta\rho_c = \rho_a + \rho_m, \quad (22)$$

де

$$\rho_m = \beta\delta_t. \quad (23)$$

Довжину ρ_a знаходимо так. Досліджено [15] вплив водню на швидкість поширення корозійних тріщин. При цьому величину ρ_a визначали так:

$$\rho_a = M(n_1\mu F)^{-1} \left[\int_0^{t_1} i_a(t) dt + \gamma F D \int_0^{t_1} \frac{\partial C_H}{\partial x} dt \right], \quad (24)$$

де M – атомна маса; n_1 – валентність металу в іонізованому металі; μ – його густина; F – число Фарадея; i_a – густина анодного струму; γ – коефіцієнт, який врівноважує розмірність струму і потоку водню, що знаходять із експерименту; D – коефіцієнт дифузії водню. Тоді швидкість поширення корозійно-механічної тріщини за сталого навантаження і з урахуванням впливу водню можна наближено подати як

$$V_{scH} \approx V_{sc} + M(n_1\mu)^{-1} \gamma D \frac{\partial C_H}{\partial x}. \quad (25)$$

Для врахування наводнювання стінки труби в рівняння (20) замість величини V_{sc} підставимо V_{scH} . Тоді, інтегруючи його за умов (15), (16) і вважаючи, що тріщина макроскопічна, тобто виконуються співвідношення

$$\frac{\delta_t(\rho)}{\delta_{CC}} = \frac{K_I^2(\rho)}{K_{IC}^2}, \quad \delta_{scc} = \frac{K_{scc}^2}{\sigma_0 E}, \quad \delta_t(\rho) = \frac{K_I^2(\rho)}{\sigma_0 E},$$

отримаємо:

$$t_* = \int_{\rho_0}^h V_{scH}^{-1} d\rho - \frac{\alpha_0(1-R)^4}{8V_{scH}E\sigma_0} \sum_{i=1}^n \left[K_I^4(\rho_i) - K_{scc}^4 \right] \left[K_{IC}^2 - K_I^2(\rho_i) \right]^{-1}. \quad (26)$$

Вважатимемо, що навантаження–розвантаження труби відбувається за час $t = t_i$ ($i = 1, \dots, n$), коли корозійно-механічна тріщина поширюється на однакові довжини $\Delta\rho = n^{-1}(\rho - \rho_0)$. Використовуючи теорему про середнє [9] за великих n , тобто для $\Delta\rho \ll (h - \rho_0)$, вираз (26) запишемо так:

$$t_* = V_{scH}^{-1}(h - \rho_0) - \frac{\alpha_0(1-R)^4}{8V_{scH}E\sigma_0} \frac{n}{h - \rho_0} \int_{\rho_0}^h \frac{K_I^4(\rho) - K_{scc}^4}{K_{IC}^2 - K_I^2(\rho)} d\rho. \quad (27)$$

Отже, співвідношення (27) за відомих значень V_{scH} , σ_0 , α_0 , K_{IC} , K_{scc} , E , n визначає залишкову довговічність труби з поверхневою тріщиною, яка працює за дії корозивно-агресивного середовища, довготривалого наводнювання і внутрішнього тиску, а також піддана дії n навантажень–розвантажень, тобто включення і виключення внутрішнього тиску.

Корозійно-механічні характеристики експлуатованої сталі Х60

Умови	K_{sc}	K_{lc}	V_{sc}
	МПа \sqrt{m}		m/h
За наводнювання	10	101	$6,12 \cdot 10^{-7}$
Без	14	178	$1,5 \cdot 10^{-7}$

Розраховуватимемо залишкову довговічність $t = t_*$ труби з урахуванням корозійного поширення тріщин і навантажень–розвантажень для двох випадків, коли стінка труби наводнюється за катодного захисту і без. Вважаємо, що труба виготовлена зі сталі Х60, а її геометричні параметри і навантаження такі: $r = 0,71$ м, $h = 0,0187$ м,

$p = 9$ МПа. Механічні і корозійні характеристики для експлуатованих труб взяті із праці [16] і наведені в таблиці.

Коефіцієнт інтенсивності напружень K_I (його максимальне значення) у цьому випадку для півколової тріщини запишемо у вигляді [5]

$$K_I = 0,7\sigma\sqrt{\pi h} f(\epsilon), f(\epsilon) = \sqrt{\epsilon}(1 + 0,32\epsilon^2)(1,04 + 0,23\epsilon^2 - 0,11\epsilon^4);$$

$$\epsilon = \frac{\rho}{h}; \epsilon_0 = \frac{\rho_0}{h}; \sigma = \frac{pr}{h}. \quad (28)$$

Для числової реалізації задачі співвідношення (27) з урахуванням (28) подамо через вказані вище геометричні і силові параметри, а також корозійно-механічні характеристики для сталі Х60:

за наводнювання стінки труби під час катодного захисту

$$t_* = 3,1 \cdot 10^4 \cdot (1 - \epsilon_0) - \frac{46,9 \cdot n}{1 - \epsilon_0} \int_{\epsilon_0}^1 \frac{f^4(\epsilon)}{[1 - 0,33f^2(\epsilon)]} d\epsilon, \quad (29)$$

без наводнювання

$$t_* = 12,5 \cdot 10^4 \cdot (1 - \epsilon_0) - \frac{6,1 \cdot n}{1 - \epsilon_0} \int_{\epsilon_0}^1 \frac{f^4(\epsilon)}{[1 - 0,33f^2(\epsilon)]} d\epsilon. \quad (30)$$

Вважатимемо, що за рік труба піддана m навантажень–розвантажень, тобто

$$n = m \cdot k, \quad (31)$$

де k – роки її експлуатації. Тоді залишкову довговічність труби в роках з урахуванням маневрового режиму експлуатації знайдемо так:

за наводнювання її стінки під час катодного захисту

$$t_* = 3,5 \cdot (1 - \epsilon_0)^2 \left[1 - \epsilon_0 + 5,3 \cdot 10^{-3} m \int_{\epsilon_0}^1 \frac{f^4(\epsilon)}{[1 - 0,33f^2(\epsilon)]} d\epsilon \right]^{-1}, \quad (32)$$

без наводнювання

$$t_* = 14,3 \cdot (1 - \epsilon_0)^2 \left[1 - \epsilon_0 + 7 \cdot 10^{-4} m \int_{\epsilon_0}^1 \frac{f^4(\epsilon)}{[1 - 0,33f^2(\epsilon)]} d\epsilon \right]^{-1}. \quad (33)$$

На основі співвідношень (32), (33) побудовані (рис. 2) залежності залишкової довговічності t_* труби від безрозмірного значення ϵ_0 початкового розміру тріщини в стаціонарному (крива 1) (без урахування навантаження–розвантаження) і маневровому (криві 2–4) режимах експлуатації за різної кількості m включень–виключень тиску газу в трубопроводі за рік.

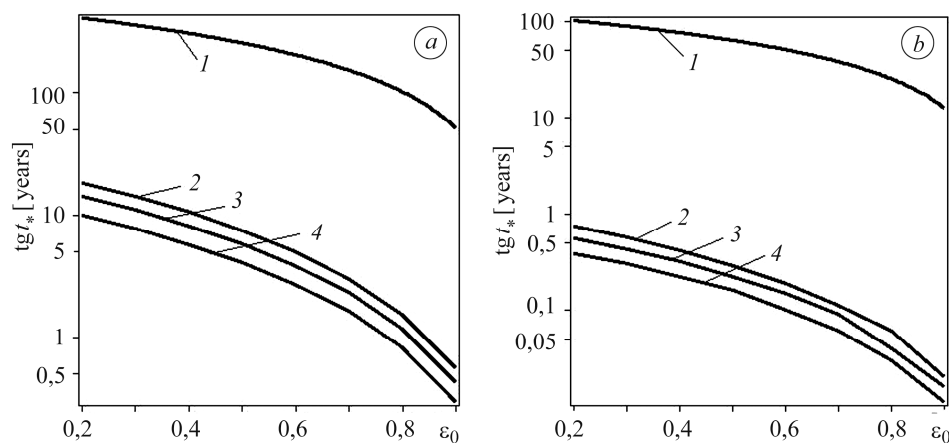


Рис. 2. Залежність залишкової довговічності t_* труби від зміни безрозмірного значення ε_0 початкового розміру тріщини в стаціонарному (крива 1) і маневровому (криві 2–4) режимах експлуатації за різного значення m (0; 195; 255; 365):
 а – без наводнювання; б – з наводнюванням.

Fig. 2. Dependence of the pipe residual life time t_* on initial size crack ε_0 in a stationary (curve 1) and maneuvering (curves 2–4) modes of operation for different values m (0; 195; 255; 365): a – without hydrogenation; b – with hydrogenation.

Порівнюючи ці графіки, виявили, що наводнювання стінки труби газопроводу може зменшити її залишкову довговічність на порядок, а маневровий режим експлуатації – більш ніж на два порядки.

ВИСНОВКИ

На основі раніше розробленого енергетичного підходу сформульована розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу труби газопроводу з поверхневою корозійною тріщиною за маневрового режиму експлуатації і безперервного наводнювання її стінки внаслідок катодного захисту. Встановлено, що наводнювання стінки труби зі сталі Х60 може зменшити її залишкову довговічність на порядок, а маневровий режим експлуатації – більш ніж на два порядки.

РЕЗЮМЕ. Сформулирована расчетная модель для определения долговечности трубы газопровода с поверхностной коррозионной трещиной при длительном разрывном во времени давлении (маневренный режим эксплуатации) и наводороживания ее стенки. В основе модели – разработанный ранее энергетический подход. Предложен механизм усиления коррозионных процессов диффузией подвижным водородом. Количественно оценено влияние наводороживания на остаточный ресурс трубы газопровода при маневренном режиме эксплуатации.

SUMMARY. The computational model to determine the life time of the gas pipeline pipe with a surface corrosion crack under long-term discontinuous in time pressure (maneuvering operation mode) and hydrogenation of its walls is formulated. The energy approach developed earlier by the authors and the proposed mechanism of corrosion processes strengthen by the diffusion mobility of hydrogen is put into the basis of this model. The impact of hydrogenation on the residual life of the gas pipeline pipe under maneuvering operation mode is assessed quantitatively.

1. Гордієнко І. А., Коломєєв В. М., Фролов А. Ф. Стан вимірювання кількості та параметрів якості природного газу у системі ДК “Укртрансгаз” // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 5. – С. 44–47.
2. Чувильдєєв В. Н., Вирясова Н. Н. Деформация и разрушение конструкционных материалов: проблемы старения и ресурса / Под общ. ред. В. Н. Чувильдєєва. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2010. – 68 с.

3. Крижанівський С. І., Никифорчин Г. М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. у 3-х т. / За ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – Т. 1. – 458 с.; 2011. – Т. 2. – 448 с.; 2012. – Т. 3. – 432 с.
4. Крижанівський С. І., Тарасівський О. С. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 3 (12). – С. 31–34.
5. 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.
6. 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.
7. Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Яворська Н. В. Ріст тріщин повзучості в елементах конструкцій за довготривалого навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 3. – С. 12–17.
(Andreikiv O. Ye., Dolins`ka I. Ya., and Yavorska N. V. Growth of creep cracks in structural elements under long-term loading // Materials Science. – 2012. – **48**, № 3. – P. 266–273.)
8. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
9. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа. – М.: Высш. шк., 1981. – Т. 1. – 688 с.
10. 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.
11. 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., Petrushchak O. I. Corrosion resistance of pipe steel in oil-water media // Materials Science. – 2002. – **38**, № 3. – P. 424–429.)
12. Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures / Ed. Andrea Carpinteri. – Elsevir, 1994. – Vol. 1. – 952 p.
13. 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. 88–99.
(Influence of operation of Kh52 steel on corrosion processes in a model solution of gas condensate / O. T. Tsyryl'nyk, Z. V. Slobodyan, O. I. Zvirko, M. I. Hredil, H. M. Nykyforchyn, G. Gabetta // Materials Science. – 2008. – **44**, № 5. – P. 619–629.)
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., Андрейків О. Є. Вплив наводнювання стінок нафтових та газових трубопроводів на їх ґрунтову корозію і довговічність // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 27–34.
(Hembara O. V. and Andreikiv O. Ye. Effect of hydrogenation of the walls of oil-and-gas pipelines on their soil corrosion and service life // Materials Science. – 2012. – **47**, № 5. – P. 598–607.)
16. Електрохімічні показники експлуатаційної деградації сталей нафто- та газогонів / О. Цирульник, З. Слободян, М. Греділь, О. Звірко, Д. Завербний // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 284–289.

Одержано 25.06.2015