

УДК 622.691

О. Міленін, канд. техн. наук

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
Національної академії наук України

## ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ ВИЯВЛЕНИМИ ДЕФЕКТАМИ ТА РЕСУРС ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІСЛЯ РЕМОНТУ ПІД ТИСКОМ

*Резюме.* Досліджено питання припустимості напружено-деформованого стану лінійних частин магістральних трубопроводів із виявленими дефектами. Наведено основні аспекти методології оцінювання ймовірності аварійних ситуацій. Показано результати чисельних досліджень ступеня пошкодженості магістральних трубопроводів та впливу ремонту під тиском на залишковий ресурс конструкції.

*Ключові слова:* магістральний трубопровід, дефект, ремонт під тиском, ресурс безпечної експлуатації, ранжування, підсилюючі конструкції, ймовірність руйнування, чисельна методологія.

A. Milenin

## PROBABILISTIC ANALYSIS OF THE STATE OF MAIN PIPELINES WITH THE REVEALED DEFECTS AND THEIR SAFE EXPLOITATION RESIDUAL LIFE AFTER IN-SERVICE REPAIR

*The summary.* Problem of stresses and strains state admissibility of main pipelines linear parts with revealed defects has been studied. Numerical procedure of main pipeline defected parts failure probability assessment has been presented. The results of numerical investigations of pipeline defectiveness and of in-service repair influence on pipeline residual life have been shown.

*Key words:* main pipeline, defect, in-service repair, safe exploitation residual life, ranking, reinforcing constructions, probability of failure, numerical methodology.

**Вступ.** Одним із найважливіших етапів підтримки працездатності магістральних трубопроводних систем є регулярний неруйнівний контроль і аналіз припустимості їх фактичного стану та ресурсу безпечної експлуатації конструкції на певний період і, за необхідності, ремонт виявлених дефектів. При цьому специфікою сухопутних магістральних трубопроводів (МТ) є їх істотна протяжність, тривалість експлуатації та неоднорідність механічного, температурного, корозійного впливу на конструкції по довжині. Як результат, на ділянках трубопроводів формуються дефекти різної природи, які знижують несучу здатність стінки МТ і при істотному розвитку можуть призвести до аварійної ситуації. Використання різних технологічних методів ремонту МТ без виведення з експлуатації є одним із сучасних підходів підтримки їх працездатності. Інтерес до подібних технологічних підходів зумовлений, перш за все, економічною вигодою та незначним негативним впливом на навколишнє середовище. Крім того, можливе довготермінове планування локальних ремонтних робіт, які дозволять безперервно підтримувати ресурс безпечної експлуатації трубопроводу на необхідному рівні [1–3].

Планування ремонтних робіт на діючому МТ базується на чотирьох взаємопов'язаних аспектах: аналіз фактичного стану ділянки МТ з позиції необхідності ремонту; гарантія безпеки робіт; оптимізація параметрів ремонту з точки зору необхідної його ефективності; забезпечення необхідного ресурсу експлуатації відремонтованої конструкції [4–5]. Сучасні нормативні документи орієнтовані,

здебільшого, на капітальний ремонт дефектних ділянок МТ і повне відновлення їх несучої здатності, що не дозволяє враховувати специфіки ремонту під тиском і реалізувати ефективне планування за результатами внутрішньотрубної діагностики (ВТД) стану лінійних ділянок МТ. Зокрема, до таких особливостей слід віднести питання ранжування виявлених у процесі ВТД дефектів; урахування природного розкиду наявних даних про розміри та положення дефектів і фактичних властивостей металу трубопроводу; вибір методу ремонту з точки зору максимального ресурсу експлуатації відремонтованої конструкції. Крім того, на сьогодні фактично відсутні послідовні та вичерпні методики оцінювання припустимості стану МТ із виявленими дефектами, відремонтованої деякими специфічними методами, наприклад, підсилюючими конструкціями, що є типовими для ремонту під тиском. Це зумовлено, перш за все, тим фактом, що напружено-деформований стан МТ після ремонту є доволі складним для розрахунку й аналізу. В цій роботі, що виконувалася в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в рамках створення комплексної системи планування ремонту МТ без виведення з експлуатації, запропоновано чисельну методику оцінювання фактичного стану трубопроводу із виявленими дефектами, та ресурсу його експлуатації після ремонту на основі розрахункової ймовірності порушення цілісності стінки труби в зоні кожного знайденого дефекту.

Основними дефектами МТ є дефекти типу несучільності металу корозійної, стрес-корозійної природи (локальна та загальна корозійна втрата металу, тріщини стрес-корозії), дефекти зварних швів (непровари, пори), дефекти форми (вмятини) [6]. Їх припустимість визначається різними національними й галузевими стандартами та регламентними нормами, що базуються на детермінованих критерійних співвідношеннях. При цьому для врахування стохастичних відхилень вхідних даних від відомих значень використовуються різні коефіцієнти запасу, що є максимально консервативним підходом [7–8]. Використання ймовірнісних методик дозволяє коректно описувати можливий розкид значень вхідних даних, виходячи як з наявного досвіду досліджень дефектних трубопровідних систем, так і на технологічних характеристиках апаратури, що використовується, та методиках аналізу. Зокрема, точність дефектоскопів ВТД визначає можливі фактичні розміри виявлених дефектів, тоді як у разі дослідження стану трубопроводу в шурфі точність визначення розмірів дефекту істотно вище. Те ж стосується властивостей металу МТ, що можуть бути визначені експериментально, тоді як більшість стандартів оперують мінімальними нормативними значеннями.

Аналіз ступеня пошкодженості лінійної частини МТ і необхідності ремонту безпосередньо пов'язаний з питанням ранжування виявлених при ВТД дефектів з точки зору послідовності їх ремонту, оскільки необхідні формальні характеристики, що описують ступінь розвитку конкретного дефекту й терміни його ремонту, визначають ступінь її пошкодженості та залишковий ресурс. При цьому ця проблема ускладнюється тим фактом, що дефекти МТ мають різну природу та різний механізм розвитку, але повинні бути ранжовані за допомогою уніфікованої методології. Порядок їх ремонту, заснований на існуючих детермінованих регламентних нормах, що підрозділяють дефекти на певне число груп за ступенем небезпеки (до чотирьох), не може бути однозначним, зважаючи на необхідність ранжування дефектів у рамках однієї групи. Тому при плануванні ремонту без виведення МТ з експлуатації ефективним є не дискретне ранжування по обмеженому набору груп, а безперервне, зокрема, по величині ймовірності аварійної ситуації. З урахуванням наведеного, було розроблено методику ранжування дефектів на основі розрахункової ймовірності порушення цілісності стінки труби в зоні кожного знайденого дефекту.

Врахування стохастичного відхилення значень різних вхідних даних описується за допомогою усіченого розподілу Гауса (геометричні розміри дефекту, міцнісні

властивості матеріалу трубопроводу, швидкість корозії) і Вейбулла (характеристики тріщиностійкості матеріалу). Розрахунок імовірності порушення цілісності в області виявленого дефекту проводився на основі методу Монте-Карло за допомогою наступного алгоритму: 1 – виходячи з відомої густини розподілу початкових даних, знаходиться репрезентативна вибірка їх конкретних значень у відомих діапазонах варіювання; 2 – на основі детермінованих критеріїв руйнування визначається припустимість виявленого дефекту для кожного набору геометричних і експлуатаційних характеристик з репрезентативної вибірки; 3 – зі значення частоти виконання детермінованого критерію припустимості дефекту визначається ймовірність руйнування в області даного дефекту та ресурс безпечної експлуатації цієї ділянки МТ; 4 – на базі вибраної довжини ділянки МТ, що ремонтується, аналізується розподіл сумарного ризику руйнування та ресурсу протягом вибраного періоду часу експлуатації.

Як детермінований критерій припустимості тріщиноподібного дефекту (див. рис. 1) при експлуатації МТ пропонується використовувати двопараметричний критерій крихко-в'язкого руйнування, що має вигляд [9]

$$Y = f(L_r) - K_r \quad (1)$$

де

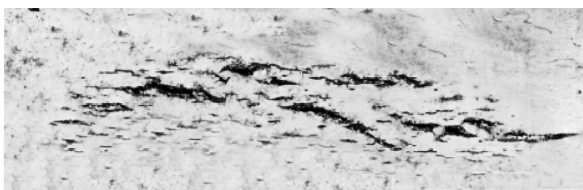
$$f(L_r) = \begin{cases} (1 - 0,14 \cdot L_r^2) \cdot [0,3 + 0,7 \cdot \exp(-0,65 \cdot L_r^6)] & \text{при } L_r \leq L_r^{\max} = \frac{\sigma_B + \sigma_T}{2 \cdot \sigma_T}; \\ 0 & \text{при } L_r > L_r^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}}$$

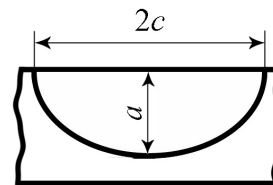
$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_T}$$

$K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень у даній точці контуру поверхневої напівеліптичної тріщини;  $\sigma_{ref}$  – реферативне напруження в області дефекту, методика розрахунку якого наведена, зокрема, в [10].

Відповідно, умова  $Y > 0$  є достатньою для гарантованої припустимості даного дефекту.



(a)



(б)

Рисунок 1. Зовнішній вигляд (а) і схема тріщиноподібного дефекту на поверхні трубопроводу (б)

При аналізі припустимості тріщиноподібного дефекту через певний період часу  $\Delta t$  необхідно враховувати можливість зростання тріщини, а саме,

$$\begin{cases} a(\Delta t) = a_0 + V_a \cdot \Delta t \\ c(\Delta t) = c_0 + V_c \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

де  $a_0, c_0$  – початкові розміри тріщини,  $V_a, V_c$  – швидкості росту тріщини уподовж відповідного розміру.

Значення  $V_a, V_c$  можуть бути оцінені таким чином:

$$V_i(K_I) = \begin{cases} V_{\max}, & \text{если } K_I \geq K_{ISCC}; \\ 0, & \text{если } K_I < K_{ISCC} \end{cases} \quad (4)$$

де  $V_{\max}$  – максимальна швидкість росту тріщини, що визначається по діаграмі статичної корозійної тріщиностійкості матеріалу в даних умовах,  $i=a, c$ .

Оцінювання ризику порушення цілісності МТ в області дефекту типу корозійного стоншення (див. рис. 2) проводиться на основі такого детермінованого критерію [10]:

$$Y = \delta_{\min} - W \cdot \Delta t - \delta_p \cdot R_i, \quad i = s, u, \quad (5)$$

де  $\delta_p$  – мінімальна припустима товщина стінки трубопроводу, що визначається або конструктивно-експлуатаційними вимогами до МТ на даній ділянці, або додатковим чисельним дослідженням;  $R_i$  – функція форми дефекту стоншення, що має такий вигляд:

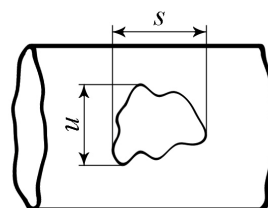
$$R_s = \begin{cases} 0,2, \text{ і дè } \lambda = \frac{1,285 \cdot s}{\sqrt{D \cdot \delta_p}} \leq 0,3475 \\ \left( 0,9 - \frac{0,9}{\sqrt{1,0 + 0,48 \cdot \lambda^2}} \right) \left( 1,0 - \frac{0,9}{\sqrt{1,0 + 0,48 \cdot \lambda^2}} \right)^{-1}, \text{ і дè } \lambda > 0,3475 \end{cases} \quad (6)$$

$$R_u = \begin{cases} 0,2, \text{ і дè } \psi = \frac{u}{D} \leq 0,3475 \\ \frac{-0,73589 + 10,511 \cdot \psi^2}{1,0 + 13,838 \cdot \psi^2}, \text{ і дè } \psi > 0,3475 \end{cases} \quad (7)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу.



(a)



(б)

Рисунок 2. Зовнішній вигляд (а) і схема дефекту типу локального корозійного стоншення на поверхні трубопроводу (б)

Наведена методологія аналізу бази даних про дефекти, що було виявлено при ВТД трубопроводу, реалізована у вигляді графічного програмного блоку. Нижче, як приклад наведено результати розрахунку характерних модельних дефектів, розміри яких наведено в таблицях 1–2. Геометричні й експлуатаційні параметри досліджуваної

лінійної ділянки МТ такі:

довжина ділянки  $L$ , м – 1200;

внутрішній діаметр, мм – 1420;

товщина стінки  $d$ , мм – 20;

мінімальна припустима товщина стінки, мм – 16;

матеріал трубопроводу – сталь 17Г1С:  $\sigma_T=360$  МПа;  $\sigma_B=510$  МПа;

тиск на вході досліджуваної ділянки  $P_{\max}$ , МПа – 7,5;

тиск на виході досліджуваної ділянки  $P_{\min}$ , МПа – 6,5.

Параметри розподілених стохастичним чином величин приведені в Таблиці 3.

Значення ризику руйнування на ділянках із кожним окремим з модельних дефектів в процесі експлуатації МТ і пріоритет їх ремонту згідно наведених вище методик показані в таблиці 4. Як видно, при вказаних параметрах розподілу геометричних розмірів дефектів близьких до таких, що отримані засобами сучасної ВТД, ймовірність відмов достатньо висока в порівнянні, наприклад, з результатами [2], заснованими на стаціонарних вимірюваннях. Проте такий достатньо консервативний підхід дозволяє отримати чітку градацію і робити висновки про ступінь пошкодженості МТ.

Таблиця 1. Характеристики модельних дефектів корозійного стоншення

№ дефекту	Довжина $s$ , мм	Ширина $u$ , мм	Мінімальна товщина стінки $\delta_{\min}$ , мм	Положення дефекту, м
1	330	200	16	2
2	210	200	16,8	250
3	350	350	15,7	450
4	400	350	15,1	600
5	380	460	15,5	900

Таблиця 2. Характеристики модельних тріщиноподібних дефектів

№ дефекту	Тип тріщини	Довжина $c$ , мм	Глибина $a$ , мм	Положення дефекту, м
6	поздовжня	110	1,60	10
7	поздовжня	90	1,60	400
8	окружна	75	1,50	710
9	окружна	150	1,55	820
10	поздовжня	100	1,55	1000

Таблиця 3. Значення параметрів розподілів властивостей матеріалу МТ і розмірів дефектів

Параметр	Нормальний закон розподілу				Розподіл Вейбулла		
	$\bar{X}$	$\xi$	A	B	$X_0$	$X_d$	$\eta$
$c$ , мм	$c'$	7,5	$c'-15$	$c'+15$	–	–	–
$a$ , мм	$a'$	$0,03 \cdot d$	$a'-0,1 \cdot d$	$a'+0,1 \cdot d$	–	–	–
$s$ , мм	$s'$	15	$s'-30$	$s'+30$	–	–	–
$u$ , мм	$u'$	15	$u'-30$	$u'+30$	–	–	–
$\delta_{\min}$ , мм	$\delta'_{\min}$	$0,03 \cdot d$	$\delta'_{\min} - 0,1 \cdot d$	$\delta'_{\min} + 0,1 \cdot d$	–	–	–

$W$ , мм/рік	$W'$	$0,1 \cdot W'$	$0,08 \cdot W'$	$0,12 \cdot W'$	–	–	–
$V_{\max}$ , мм/рік	4,4	0,22	4,0	4,8	–	–	–
$K_{ISCC}$ , МПа·мм <sup>0,5</sup>	–	–	–	–	63,3	686,2	4,0
$K_{IC}$ , МПа·мм <sup>0,5</sup>	–	–	–	–	632,5	3405,8	4,0

**Примітка:** штрихом позначені результати експериментальних вимірювань і довідкові дані.

Одним із часто використовуваних методів ремонту МТ під тиском є підсилення дефектних ділянок зварними конструкціями типу герметичних муфт [11–12]. При цьому підвищення працездатності ділянки МТ зумовлено як зниженням тангенціальних напружень в області геометричної аномалії в результаті перерозподілу зусиль по стінці трубопроводу та муфти при підвищенні внутрішнього тиску в трубопроводі від ремонтного до експлуатаційного значення, так і можливістю муфти прийняти експлуатаційне навантаження у разі виникнення в області дефекту течі. Для оцінювання ефективності такого типу ремонту та гарантії необхідного ресурсу експлуатації відремонтованої конструкції необхідним є аналіз розвитку напружено-деформованого стану в області дефекту.

Таблиця 4. Ймовірність руйнування (пріоритет ремонту) модельних дефектів у процесі експлуатації

№ дефекту	Час експлуатації, роки				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
1	0,0 (7)	0,00025 (9)	0,0055 (9)	0,052 (9)	0,179 (9)
2	0,0 (7)	0,0 (10)	0,0015 (10)	0,0142 (10)	0,063 (10)
3	0,0 (7)	0,00125 (8)	0,026 (8)	0,131 (8)	0,338 (7)
4	0,0041 (5)	0,0562 (3)	0,240 (4)	0,490 (4)	0,758 (4)
5	0,0 (7)	0,007 (7)	0,0715 (7)	0,263 (7)	0,494 (7)
6	0,0130 (1)	0,139 (1)	0,436 (1)	0,796 (1)	0,979 (1)
7	0,0050 (2)	0,0962 (2)	0,269 (2)	0,600 (3)	0,864 (3)
8	0,0010 (6)	0,0353 (6)	0,0612 (5)	0,462 (5)	0,720 (5)
9	0,0040 (3)	0,054 (4)	0,251 (3)	0,317 (2)	0,9369 (2)
10	0,0020 (5)	0,0412 (5)	0,177 (6)	0,419 (6)	0,715 (6)

Для оцінювання ймовірності руйнування конструкції в нерівномірному напружено-деформованому стані за механізмом пластичного колапсу довело свою доцільність використання статистики Вейбулла, за допомогою якої аналізується інтегральна ймовірність руйнування за принципом «слабкої ланки». Для циліндричних конструкцій з поверхневими геометричними аномаліями, які навантажені внутрішнім тиском, може використовуватися інтегральне співвідношення

$$P_d = 1 - \exp \left[ - \int_s \left( \frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS}{S_0} \right], (\sigma_1 > A), \quad (8)$$

де  $\sigma_1$  – головне напруження;  $S$  – площа аксіального поперечного перетину в області найменшої зміряної товщини;  $S_0$  – структурний параметр матеріалу;  $m$ ,  $A$ ,  $B$  – коефіцієнти розподілу Вейбулла.

Слід зазначити, що інтегрування в (8) проводиться у площині найвищої ймовірності руйнування, що дещо підвищує консервативність запропонованої методології, але такий крок виправданий, тому що тангенціальна складова тензора напружень як мінімум удвічі перевершує інші.

Важливим етапом дослідження є визначення коефіцієнтів Вейбулла, що, у свою чергу, визначає точність кількісного оцінювання ймовірності аварійної ситуації. Оскільки підсилюючі конструкції часто встановлюються на дефекти типу корозійної локальної втрати металу (ЛВМ) або інших дефектів несучільності після контрольованого шліфування, в рамках даного дослідження був запропонований наступний підхід регресійного аналізу: з набору типових розмірів ЛВМ вибиралися максимально припустимі, й у цьому випадку ймовірність руйнування дорівнювала 0,05. Для оцінювання припустимості зовнішніх корозійних дефектів було використано практичні рекомендації API 579 відповідно (5)–(7). Розрахунок розподілу напружень і деформацій в області ЛВМ обчислювали за допомогою програмного пакета ANSYS, що дозволило оцінити значення коефіцієнтів розподілу Вейбулла, необхідних для подальших розрахунків:  $S_0=0,4 \text{ мм}^2$ ,  $m=4$ ,  $A=500 \text{ МПа}$ ,  $B=670 \text{ МПа}$ .

Як приклад використання розробленої методології, розглянуто випадок ділянки трубопроводу з внутрішнім корозійним дефектом, підсиленого муфтою, що характерно, зокрема, для магістральних нафтопроводів. Небезпека внутрішнього корозійного дефекту, відремонтованого таким чином, полягає в тому, що при цьому не припиняється його подальше природне зростання. І у випадку, якщо ймовірність руйнування в процесі збільшення глибини дефекту не перевищить критичного значення (тут прийнято 0,05), то в результаті виникне теча, продукт, що транспортується, заповнить простір між муфтою та стінкою трубопроводу й експлуатаційне навантаження нестиме вже підсилююча конструкція. Герметичні муфти припускають рівномірність зі стінкою трубопроводу, тому, за умови якісного монтажу, такий сценарій не матиме істотного впливу на ресурс експлуатації дефектної ділянки МТ. Але якщо ймовірність порушення цілісності стінки МТ з дефектом при певній глибині останнього буде вищою за критичне значення, то можливі спонтанне руйнування стінки та вихід дефекту за межі муфти.

На рисунку 3 зображено діаграми залежності ймовірності порушення цілісності трубопроводу з внутрішнім дефектом від його глибини без ремонту і з урахуванням підсилення. Як бачимо, при довжині дефекту, меншій 150 мм, спонтанного порушення цілісності стінки трубопроводу, підсиленого муфтою, не відбудеться, тоді як при довжині 200 мм і значному корозійному зростанні глибини дефекту ризик спонтанного руйнування вищий за критичний.

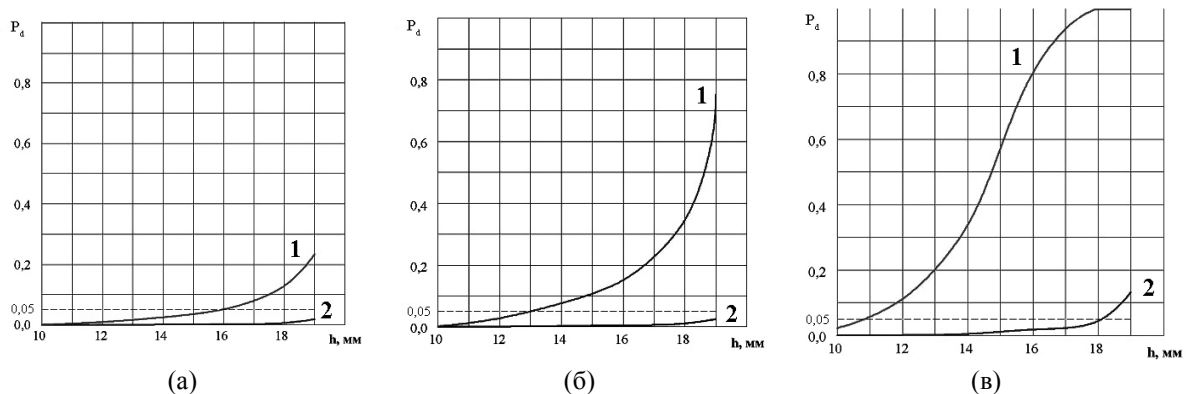


Рисунок 3. Ймовірність порушення цілісності трубопроводу з внутрішнім напівеліптичним дефектом різної довжини (а – 100 мм, б – 150 мм, в – 200 мм) у разі його корозійного зростання; 1 – без ремонту; 2 – з урахуванням ремонту підсилюючою муфтою

**Висновки.** Створено універсальну методологію чисельного аналізу стану лінійних частин магістральних трубопроводів із виявленими дефектами, ресурсу їх безпечної експлуатації у фактичному стані та після ремонту під тиском. В основу запропонованої методології покладено загальні принципи механіки руйнування та

ймовірнісний аналіз ризику порушення цілісності стінки трубопроводу з дефектом. Побудовано методика оцінювання ступеню пошкодженості лінійних ділянок магістральних трубопроводів за результатами внутрішньотрубної діагностики з позицій можливості подальшої експлуатації та планування ремонту під тиском (ранжування дефектів). На основі концепції руйнування стінки магістрального трубопроводу з типовою поверхневою геометричною аномалією типу локальна втрата металу за принципом пластичного колапсу, запропоновано ймовірнісний підхід до аналізу ефективності ремонту за допомогою підсилюючих конструкцій (зварних муфт) та ресурсу експлуатації відремонтованої конструкції в умовах розвитку пошкодженості.

#### **Література**

1. Bjornoy O.H. Assessment of corroded pipelines: Past, Present and Future. / O.H. Bjornoy, M.J. Marley // *Offshore and Polar Engineering: Proc. of 11<sup>th</sup> International Conf.*, June 17–22, 2001. – Stavanger, Norway. – Vol. 1. – 2001. – P. 93–101.
2. Махненко, В.И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций. [Текст] / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, О.И. Олейник // *Автоматическая сварка*. – № 5. – 2008. – С. 5–10.
3. LaMorte C. R. Advanced Welding Repair and Remediation Methods for In-Service Pipelines / C. R. LaMorte, M. Boring N. Porter. – Columbus: EWI, 2007. – 283 p.
4. Boring M. A. Improved burnthrough prediction model for in-service welding application. / C. R. LaMorte, M. Boring N. Porter // *IPC2008: Proc. of 7th International Conf.*, September 29–October 3, 2008. – Calgary, Alberta, Canada, 2008. – P. 249–259.
5. *Welding of Pipelines and Related Facilities. API Standard 1104*. Washington: API Publications and Distribution, 2000. – 12 edition. – 82 p.
6. Трубопроводный транспорт нефти и газа [Текст] / Р.А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
7. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами: ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. – [Чинний від 2009-01-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 91 с. – (Національний стандарт України).
8. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила: СНиП 2.05.06-85\*. – [Действителен с 1996-11-10]. – М: ВНИИСТ Миннефтегазстроя, 1997. – 146 с.
9. *Fitness-for-Service. Recommended Practice 579*. – [First edition]. – Washington: API Publications and Distribution, 2000. – 625 p.
10. Махненко, В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций [Текст] / В.И. Махненко – Киев: Наукова думка, 2006. – 619 с.
11. Магістральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок: ВБН В.3.1-00013471-07:2007. – [Чинний від 2007-4-23]. К.: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 112 с. – (Відомчі будівельні норми).
12. Bang I.-W. Numerical Simulation of Sleeve Repair Welding of In-Service Gas Pipelines // I.-W. Bang, Y.-P. Son, K. H. Oh et al./ *Welding Journal*. – № 12. – 2002. – P. 273-282.