

ТРАНСПОРТ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

УДК 620.191.33:620.194.8

ОЦІНКА УМОВ ЛАВИННОГО РУЙНУВАННЯ ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ ДОВІЛЬНО РОЗМІЩЕНИМИ НАСКРІЗНИМИ ТРІЩИНАМИ ТА НЕНАСКРІЗНИМИ ЗОВНІШНІМИ ТРІЩИНОПОДІБНИМИ ДЕФЕКТАМИ ЗАДАНОЇ ГЛИБИНИ

Є.І. Крижанівський, О.М. Мандрик, Р.С. Грабовський, О.Т. Касій

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353,
e-mail: ief@nung.edu.ua, hrabovskyy.r@gmail.com

Використовуючи результати експериментальних досліджень циклічної тріщиностійкості експлуатованої сталі 20, аналітично-чисельну оцінку впливу розмірів наскрізних тріщин на цілісність труби та методiku визначення величини руйнівного тиску для трубопроводу з довільно орієнтованими зовнішніми корозійно-механічними тріщиноподібними дефектами, досліджено умови руйнування останнього. Розглянуті методику дають змогу інтерпретувати виявлені в процесі технічної діагностики довільно орієнтовані наскрізні та ненаскрізні тріщиноподібні дефекти заданої глибини. Визначено умови, за яких настає лавинне руйнування труби.

Ключові слова: газопровід, корозійно-механічний тріщиноподібний дефект, наскрізна тріщина, руйнівний тиск, пороговий та критичний коефіцієнти інтенсивності напружень, порогова та критична довжина наскрізної тріщини.

По результатам экспериментальных исследований циклической трещиностойкости эксплуатируемой стали 20 применяя аналитически-численную оценку влияния размеров сквозных трещин на целостность трубы и методiku определения величины разрушающего давления для трубопровода с произвольно ориентированными внешними коррозионно-механическими трещиноподобными дефектами, исследованы условия разрушения последнего. Рассмотренные методики позволяют интерпретировать обнаруженные в процессе технической диагностики произвольно ориентированные сквозные и несквозные трещиноподобные дефекты заданной глубины. Определены условия, при которых наступает лавинное разрушение трубы.

Ключевые слова: газопровод, коррозионно-механический трещиноподобный дефект, коррозионно-усталостная трещина, разрушительное давление, критический коэффициент интенсивности напряжений, пороговая и критическая длина сквозной трещины.

Having applied the results of experimental researches of cyclical resistance of used steel 20 to cracking, analytical and numerical evaluation of through cracks dimensions influence on pipeline integrity and methodology for estimating the level of failure pressure in the pipeline with unspecified external corrosive and mechanical crack-like failures and the conditions of destroying the last ones have been researched. The considered methods enable us to explain the detected unspecified through and nonthrough crack-like failures at the certain depths during the process of technical diagnosis. The conditions have been determined which lead to avalanche destruction of the pipe.

Keywords: gas pipeline, corrosive and mechanical crack-like failure, through crack, destructive pressure, threshold and critical stress intensity factor, threshold and critical length of the through crack.

Вступ

Рівень аварійності, спричинений неконтрольованим розвитком наскрізних корозійно-механічних тріщин, на магістральних газопроводах пострадянського простору залишається високим. Так, наприклад, в Росії корозійне руйнування під напругою або стрес-корозійне руйнування спостерігали ще в 70-х роках на магістральних газопроводах “Бухара – Урал” і

“Середня Азія – Центр”. Тоді на південній ділянці цих газопроводів зареєстровано 103 випадки стрес-корозійного руйнування, а на підприємствах “Севергазпрому” сталося 7 подібного типу руйнувань, до того ж руйнувалися труби з поздовжнім та спіральним швом. У районі Красноуринська на шестинитковій ділянці газопроводу зареєстровано 11 аналогічних руйнувань [1].

Ця проблема пов'язана, насамперед з тим, що 72 % магістральних газопроводів Росії експлуатуються понад 20 років, а середній вік експлуатованих магістральних газопроводів – 33 роки [2]. Газопровідна система України аналогічна російській. На сьогодні понад 75 % газопровідної системи України експлуатується понад 20 років [3]. Результатом тривалої експлуатації є негативний вплив корозійного середовища, спричинений незадовільним станом ізоляційного покриття [4], погіршенням властивостей металу газопровідних труб унаслідок деградаційних процесів, які сприяють зниженню опору крихкому руйнуванню [4, 5] та підвищують ризик виникнення стрес-корозійного руйнування [6-8].

За статистикою у результаті внутрішньотрубної технічної діагностики магістральних газопроводів України виявляють 5000-6000 корозійно-механічних дефектів на кожні 100 км [9].

У зв'язку з цим інтерпретація виявлених в процесі технічної діагностування корозійно-механічних тріщин, а також оцінка потенційної можливості виникнення умов лавинного руйнування дефектних газопроводів за підходами механіки руйнування є актуальним науково-прикладним завданням.

Об'єкт та методична процедура досліджень та розрахунків

Об'єктом розгляду є труба з зовнішнім діаметром D та товщиною стінки t (рис. 1, а), яка містить зовнішню довільно орієнтовану до її осі наскрізну тріщину (рис. 1). Труба заповнена газом під тиском $P = P_p$.

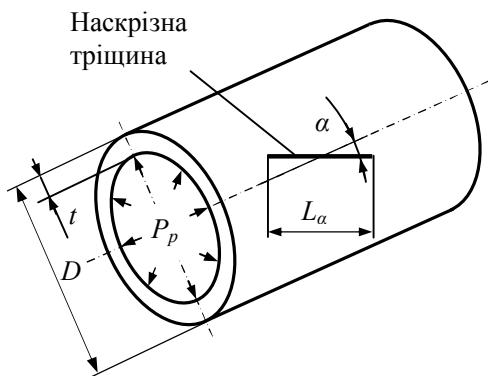


Рисунок 1 – Схематичне представлення довільно орієнтованої наскрізної тріщини у стінці газопровідної труби

Досліджувались труби магістральних трубопроводів (див. табл. 1), виготовлених з вуглецевої сталі 20 марки К38, згідно зі стандартом ГОСТ 20295-85.

Метою експериментально-розрахункових досліджень було визначення умов, за яких потенційно можливе лавинне руйнування газопровідної труби з наскрізною тріщиною та встановлення впливу параметрів наявних у трубі зовнішніх довільно орієнтованих корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів на можливість її подальшої експлуатації.

Таблиця 1 – Діаметр, товщина та робочі тиски в газопровідних трубах

№ труби	Зовнішній діаметр D , мм	Товщина стінки t , мм	Внутрішній тиск P_p , МПа
1	820	10,0	5,4
2	820	12,0	5,4

Зауважимо, що наскрізна довільно орієнтована тріщина (рис. 1) в циліндричному трубчастому елементі, навантаженому внутрішнім тиском, досліджена в роботі [10].

У випадку наскрізної довільно орієнтованої тріщини в трубчастому елементі оболонкового типу коефіцієнт інтенсивності напружень K_1^m розраховуються за формулою

$$K_1^m = F_1^m \frac{P_p \cdot D}{2t} \sqrt{\frac{L_\alpha}{2}}, \quad (1)$$

де

$$\beta = \left[\frac{3}{4} (1 - \nu^2) \right]^{1/4} \frac{L_\alpha}{\sqrt{4D \cdot t}}, \quad (2)$$

та $F_1^m = F_\beta(\alpha)$ змінюються згідно з графічними залежностями, зображеними на рис. 2. У нашому випадку значення функції $F_\beta(\alpha)$ визначаємо, вважаючи, що для магістральних газопроводів $\beta = 0,4 = const$ [10]. Розрахунки виконаємо для тріщини різного розташування, тобто $\alpha = 10 \div 50^\circ$.

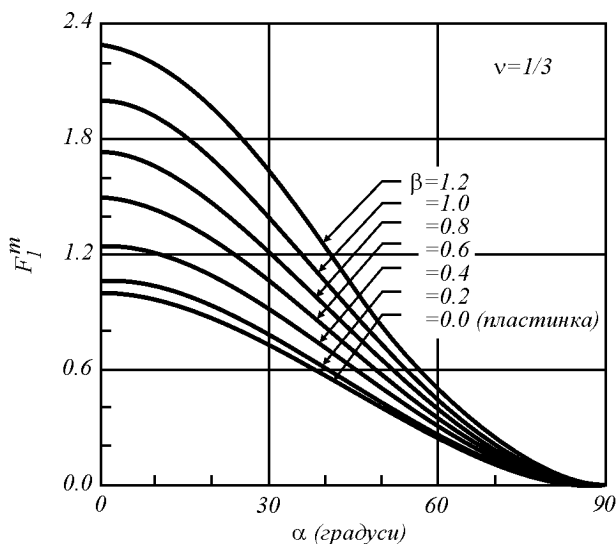


Рисунок 2 – Функція $F_1^m(\lambda)$ для циліндричної оболонки з довільно розміщеною тріщиною під дією внутрішнього тиску ($\nu = 0,3$)

Відзначимо, що у випадку утворення в газопровідній трубі наскрізної тріщини, згідно підходів механіки руйнування, можлива реалізація трьох сценаріїв її розвитку, що залежить від орієнтації та початкового розміру виявленого дефекту.

У першому випадку, коли розвиток фізично малої тріщини буде обумовлений впливом пульсуючого у трубі навантаження та ґрунтових вод, можливе утворення свища з розмірами наскрізної тріщини $L_{mp}(\alpha) < L_{th}(\alpha)$.

У випадку, коли розміри наскрізної тріщини будуть знаходитись у інтервалі $L_{th}(\alpha) \leq L_{mp}(\alpha) < L_{fc}(\alpha)$, швидкість розвитку корозійно-механічної тріщини визначатиметься діаграмою циклічної тріщиностійкості металу газопровідної труби.

У третьому випадку за умови $L_{mp}(\alpha) \geq L_{fc}(\alpha)$ відбуватиметься неконтрольований розвиток наскрізної тріщини у напрямку, паралельному до її осі, тобто матиме місце лавинне (катастрофічне) руйнування трубопроводу (див. рис. 3).



Рисунок 3 – Характерний приклад гільйотинного руйнування труби газопроводу “Уренгой – Помари – Ужгород” (2007 р.)

Підставивши у формулу (1) $K_I = K_{th}$, визначаємо порогове значення довжини тріщини L_{th} , тобто

$$L_{th}(\alpha) = \Phi_{th}(\alpha) = \left[\frac{1}{F_{\beta}(\alpha)} \cdot \frac{2t}{D} \cdot \frac{K_{th}}{P_p} \right]^2, \quad (3)$$

а підставивши у формулу 1 $K_I = K_{fc}$, визначаємо критичне значення довжини тріщини L_{fc} , тобто

$$L_{fc}(\alpha) = \Phi_{fc}(\alpha) = \left[\frac{1}{F_{\beta}(\alpha)} \cdot \frac{2t}{D} \cdot \frac{K_{fc}}{P_p} \right]^2. \quad (4)$$

Оцінку виникнення пластичного колапсу, тобто визначення руйнівного тиску P_f тривало експлуатованої газопровідної труби із зовнішніми довільно орієнтованими як з тріщинами, так і з корозійно-механічними тріщиноподібними дефектами, розміщеними як в основному металі труби, так і в зварних швах, проводили за унікальною методикою [2], узгодженою з діючими в Росії нормативними документами. Згідно з цією методикою розрахунок внутрішнього руйнівного тиску P_f дефектної труби,

що містить зовнішні тріщини або корозійно-механічні тріщиноподібні дефекти довжиною L та максимальною глибиною c , базується на даних про параметри D , t та границю міцності σ_B матеріалу газопровідної труби відповідно до залежності

$$P_f = \frac{\frac{y_B}{1,15}^3}{\cos^2 \alpha + m \frac{\sin^2 \alpha}{3k}} \frac{2t}{D}, \quad (5)$$

де коефіцієнти, що характеризують дефект

$$z = \frac{1 - S/S_0}{1 - \frac{S/S_0}{q}} = \frac{1 - (\pi \cdot c / 4 \cdot t)}{1 - \frac{(\pi \cdot c / 4 \cdot t)}{q}}, \quad q = \sqrt{1 + 0,52 \frac{L^2}{D \cdot t}},$$

$$z_k = \frac{1 - S/S_0}{1 - \frac{S/S_0}{g}} = \frac{1 - (\pi \cdot c / 4 \cdot t)}{1 - \frac{(\pi \cdot c / 4 \cdot t)}{g}}, \quad g = \sqrt{1 + 0,08 \frac{L^2}{D \cdot t}},$$

площа дефекту $S = \pi \cdot L \cdot c / 4$,

площа умовно наскрізного дефекту $S_0 = L \cdot t$,

μ – коефіцієнт, що враховує поздовжні і колові напруження в трубі при навантаженні її внутрішнім тиском:

$\mu = 0,5$ – для “незащемлених” трубопроводів (заплави рік, водні переходи, болота, нещільні ґрунти);

$\mu = 0,3$ – для “защемлених” трубопроводів (щільні ґрунти).

Результати досліджень та їх обговорення

Механічні характеристики сталі 20 визначались за стандартною процедурою випробовувань циліндричних зразків на розтяг [11]. Їх значення наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Механічні характеристики експлуатаційної сталі 20

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
373	235	22

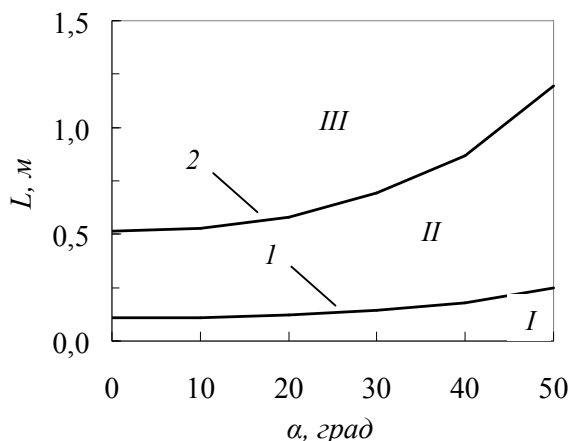
Характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 20 (табл. 3), тобто закономірності поширення корозійно-механічних тріщин визначали згідно методики [12, 13], використовуючи спеціальне експериментальне обладнання [14].

Таблиця 3 – Характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 20

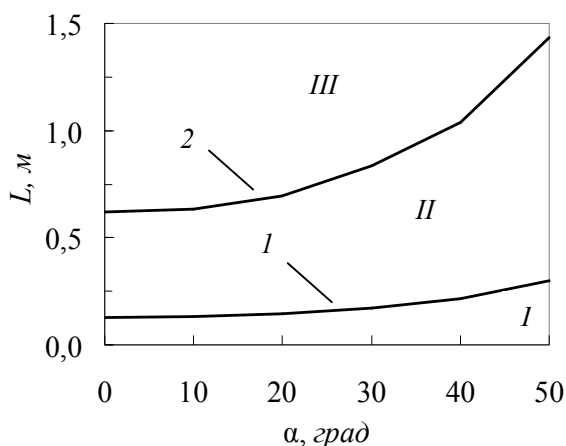
n	C , $m/\text{цикл} \times (MПа\sqrt{m})^{-n}$	K_{th} , $MПа\sqrt{m}$	K_{fc} , $MПа\sqrt{m}$
2,98	$8,00 \cdot 10^{-12}$	14,5	70,0

За результатами розрахунково-експериментальних досліджень циклічної тріщиностійкості трубопроводної сталі 20 та оцінки наскрізних розмірів довільно орієнтованих тріщин (рівняння 3 та 4) будували криві 1 та 2 (рис. 4).

Причому крива 1 відображає початкові умови утвореного наскрізного тріщиноподібного дефекту (довжину та його орієнтацію $L_{th}(\alpha)$), за яких потенційно можливий розвиток корозійно-механічної тріщини уздовж осі труби, що визначається діаграмою циклічної тріщиностійкості металу труби, а крива 2 – умови $L_{fc}(\alpha)$, за яких потенційно можливий її неконтрольований розвиток, тобто лавинне руйнування трубопроводу.



а)



б)

1 – крива утворення наскрізного тріщиноподібного дефекту (свища) у трубопроводі $L_{th}(\alpha) = \Phi_{th}(\alpha)$;

2 – крива граничного стану дефектного трубопроводу $L_{fc}(\alpha) = \Phi_{fc}(\alpha)$

Рисунок 4 – Діаграма оцінки потенційної можливості (ризик) гільйотинного руйнування трубопроводів із зовнішнім діаметром $D=820$ мм і товщиною стінки $t_1=10$ мм (а) та $t_2=12$ мм (б) з довільно орієнтованою наскрізною тріщиною

Одержані графічні залежності дають змогу встановити ряд характерних зон:

I – безпечна зона (відсутні умови лавинного руйнування труби з наскрізним дефектом (свищем));

II – зона росту тріщини (видовження наскрізного дефекту);

III – зона лавинного (катастрофічного) руйнування труби.

Аналіз одержаного результату свідчить, що, по-перше, найбільш небезпечними є осьові ($\alpha = 0^\circ$, рис. 4) наскрізні тріщини, оскільки в цьому випадку руйнування труби відбувається за умови їх мінімальної довжини (див. табл. 4), по-друге, зі збільшенням осьового кута нахилу як пороговий, так і критичний розміри наскрізної тріщини зростають, по-третє, товщина стінки труби впливає на порогові та критичні наскрізні розміри, які для труби з товщиною стінки $t=12$ мм на $\sim 20\%$ більші, ніж для труби з товщиною стінки $t=10$ мм (див. табл. 4 та рис. 4), тобто зростає розмір „безпечних” тріщин.

Таблиця 4 – Порогові та критичні розміри довільно орієнтованої наскрізної тріщини

α , град	$t=10$ мм		$t=12$ мм	
	$L_{th}(\alpha)$	$L_{fc}(\alpha)$	$L_{th}(\alpha)$	$L_{fc}(\alpha)$
0	0,107	0,516	0,128	0,619
10	0,109	0,527	0,131	0,632
20	0,120	0,580	0,144	0,696
30	0,144	0,695	0,173	0,834
40	0,179	0,866	0,215	1,039
50	0,247	1,193	0,297	1,432

На рисунку 5 представлено графічну залежність зміни величини руйнівного тиску P_f дефектної газопровідної труби, навантаженої внутрішнім тиском P_p , від глибини c та орієнтації α зовнішнього тріщиноподібного дефекту. Причому, розглядаючи зміну величини руйнівного тиску P_f , до уваги брали граничні – пороговий $L_{th}(\alpha)$ та критичний $L_{fc}(\alpha)$ – розміри (довжину) зовнішніх тріщиноподібних дефектів, припускаючи при цьому, що в процесі експлуатації трубопроводу вони розвиваються лише вглиб стінки труби. При цьому значення $L_{th}(\alpha)$ та $L_{fc}(\alpha)$ вважалися постійними, що цілком допустимо, враховуючи незначну їх зміну при співвідношенні $2t/D \leq 0,03$, тобто

$$L_{th}(\alpha) = const \text{ та } L_{fc}(\alpha) = const. \quad (6)$$

Аналіз одержаних результатів (таблиці 5 і 6 та рис. 5) засвідчує, що у навантаженому робочим тиском $P_p = 5,4$ МПа трубопроводі з довільно орієнтованим тріщиноподібним дефектом, що розвивається вглиб стінки труби з продовгуватістю, близькою до порогової $L_{th}(\alpha)$, відсутні умови для лавинного (катастрофічного) руйнування труби. Однак, якщо продовгуватість тріщиноподібного дефекту наближаються до критичної і він орієнтований у осьовому або близькому до нього напрямі, то потенційно можливе руйнування труби за в'язким механізмом в інтервалі глибин $(0,5 - 0,6) \leq c/t \leq 0,8$ залежно від орієнтації дефекту. При цьому зі зменшенням товщини стінки труби умови її руйнування настають за меншої глибини (табл. 5).

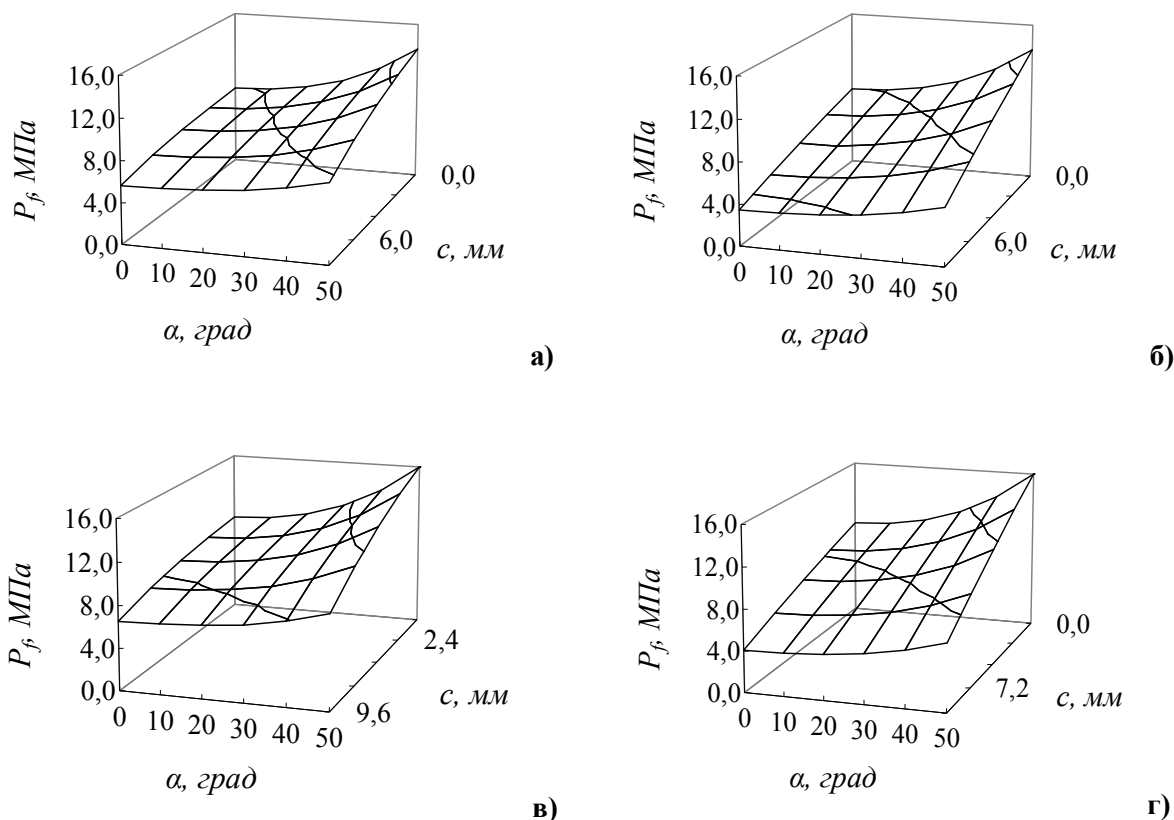


Рисунок 5 – Вплив глибини c та орієнтації α зовнішніх тріщиноподібних дефектів з пороговою $L_{th}(\alpha)$ (а, в) та критичною $L_{fc}(\alpha)$ (б, д) довжиною на величину руйнівного тиску P_f трубопроводів із зовнішнім діаметром $D=820$ мм і товщиною стінки $t_1=10$ мм (а, б) та $t_2=12$ мм (в, г)

Таблиця 5 – Розміри тріщиноподібних дефектів при яких виконується умова руйнування $P_p = P_f$

Труба $D \times t$ α , градус	820×10, мм		820×12, мм	
	c , м	$L_{fc}(\alpha)$, м	c , м	$L_{fc}(\alpha)$, м
0	4,8	0,516	7,5	0,619
10	5,0	0,527	7,7	0,632
20	5,5	0,580	8,2	0,696
30	6,3	0,695	8,9	0,834
40	7,2	0,866	–	–

Таблиця 6 – Руйнівний тиск трубопроводу з пороговими та критичними довільно орієнтованими тріщиноподібними дефектами заданої глибини

Товщина стінки труби t , мм	Глибина дефекту, c	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 50^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 50^\circ$		
		$L_{th}(\alpha)$, м	P_f , МПа	$L_{th}(\alpha)$, м	P_f , МПа	$L_{fc}(\alpha)$, м	P_f , МПа	$L_{fc}(\alpha)$, м	P_f , МПа	
10	0	0,107	7,91	0,247	13,43	0,516	7,91	1,193	13,43	
	0,4 t		7,13				11,15		5,86	9,67
	0,8 t		5,64				7,66		3,45	5,51
12	0	0,128	9,49	0,297	16,11	0,619	9,49	1,432	16,11	
	0,4 t		8,46				13,22		6,99	11,55
	0,8 t		6,53				8,92		4,09	6,56

Висновки

Запропоновано методику оцінки умов руйнування лінійної частини трубопроводу із зовнішніми, довільно розміщеними наскрізними та ненаскрізними тріщиноподібними дефектами заданої глибини.

На прикладі магістрального трубопроводу з різною товщиною стінки досліджено потенційні умови зародження та розвитку довільно орієнтованих корозійно-механічних тріщин в осьовому напрямі, а також встановлено розміри (довжину) первинного джерела руйнування – продовгуватість довільно орієнтованої наскрізної тріщини ($L_{fc}(\alpha)$), за яких можливе лавинне руйнування трубопроводу.

Досліджено вплив розмірів (глибини c та довжини L) довільно орієнтованих зовнішніх тріщиноподібних дефектів на величину руйнівного тиску.

Показані умови, за яких настає потенціально можлива в'язкого руйнування досліджуваних трубопроводів.

Проведені розрахунки для зазначених типорозмірів магістральних труб засвідчують, що тріщиноподібні дефекти, які розвиваються вздовж осі труби ($\alpha = 0^\circ$), є найбільш небезпечними, оскільки в цьому випадку руйнівний тиск P_f набуває мінімального значення.

Одержані в роботі результати та їх подальший розвиток сприятимуть прогностичній оцінці та запобіганню ризику виникнення аварійних ситуацій на магістральних газопроводах.

Література

1 Ничипоренко М. В. Досвід діагностування магістральних газопроводів ДК “Укртрансгаз” за допомогою внутрішньотрубних інспекцій поршнів / М. В. Ничипоренко, Є. Б. Іваник // Трубопровідний транспорт. – 2010. – № 6 (66). – С. 7–8.

2 Мазур И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: Елима, 2004. – 1104 с.

3 Бут В. С. Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів / В. С. Бут, О. І. Олійник // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: збірник наук. статей за результатами виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України у 2004–2006 рр.: зб. статей; під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Національна академія наук України. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – С. 491–496.

4 Крижанівський Є. І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: [наук.-техн. посіб. у 3-х т.] / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ – Львів: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – 2011. – 457 с.

5 Красовський А. Я. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стрес-корозією / А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, І. В. Лохман // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18–21.

6 Охрімчук С. О. Огляд можливих причин виникнення тріщин на двошовних трубах / С. О. Охрімчук, С. М. Руденко, Р. М. Бабельський // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 4 (70). – С. 22–25.

7 Поляков С. Г. Основні закономірності стрес-корозійного розтріскування магістральних газопроводів / С. Г. Поляков, А. О. Рибак // Проблеми міцності. – 2009. – № 5. – С. 7–17.

8 Велиюлин И. И. Исследование развития стресс-коррозионных трещин / И. И. Велиюлин, А. Е. Зорин, П. А. Колотовский // Территория “Нефтегаз”. – 2010. – № 5. – С. 24–25.

9 Махненко В. И. Ремонт магистральных трубопроводов сваркой без вывода их из эксплуатации / В. И. Махненко, В. С. Бут, О. И. Олейник // Проблемы прочности. – 2009. – № 5. – С. 86–100.

10 Murakami Yu. Handbook of stress intensity factors / Yu. Murakami // Pergamon Press, Oxford (UK). – 1987. – 1011 p.

11 Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: в 2 т. / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 368 с.

12 РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.

13 Механика разрушения и прочность материалов: [справ. пособ. в 4-х т. / О. Н. Романов, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др.; под общ. ред. В. В. Панасюка]. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – 680 с.

14 Грабовский Р. С. Установка для испытаний конструкционных материалов на циклическую коррозионную трещиностойкость / Р. С. Грабовский, И. Н. Дмытрах, Я. Н. Пукас [и др.] // Деп. ВИНТИ № 67 68 – В 89 от 10.11.1989 г. – С. 8.

Стаття надійшла до редакційної колегії
14.02.13

Рекомендована до друку
професором Семчуком Я.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Савицьким М.М.
(Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона
НАН України, м. Київ)