

УДК 620.191.33: 620.193

О.М. Мандрик, Л.Є. Шкіца, Р.С. Грабовський, О.Т. Касій

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ЕКСПРЕС-ОЦІНКА УМОВ ГІЛЬЙОТИННОГО РУЙНУВАННЯ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Запропоновано методологічний підхід до експрес-оцінки потенційної можливості гільйотинного руйнування тривало експлуатованих магістральних газопроводів, який базується на визначенні критичних розмірів наскрізної тріщини. Експериментальні та розрахункові оцінки розмірів наскрізних тріщин засвідчують практичну можливість його застосування. Показано, що тривала експлуатація магістрального газопроводу в умовах підвищених тисків спричиняє більш суттєву деградацію металу труби.

Ключові слова: магістральний газопровід, гільйотинне руйнування, критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, критичний розмір наскрізної тріщини.

Актуальність проблеми

Україна володіє розгалуженою мережею магістральних трубопроводів для транспортування природного газу. Загальна довжина магістральних газопроводів і газопроводів відгалуження, які знаходяться у підпорядкуванні НАК "Нафтогаз України", становить 38,55 тис. км [4, 18, 22]. За умови стабільної роботи, газотранспортна мережа України забезпечує не лише стабільність економіки держави, але і є стратегічним чинником її національної безпеки [18, 22].

Однак в процесі тривалої експлуатації (понад 20 років) захисне ізоляційне покриття тривало експлуатованих трубопроводів поступово втрачає свої експлуатаційні властивості [3, 5, 322, 29, 35], і вже не може забезпечити надійний захист металу труб від корозійних процесів, що спричиняють виникнення і розвиток поверхневих корозійних (пітингів, язв, каверн) та тріщиноподібних дефектів, до яких відносяться гострі дефекти основного металу (риски, подряпини тощо) та дефекти зварного шва (підрізи, неповари, пори, шлакові включення) [1111, 19].

Крім того, метал магістральних трубопроводів зазнає деформаційного старіння. Тобто спостерігається зниження фізико-механічних характеристик металу, які визначають роботоздатність газопровідних труб [18, 20, 22, 25, 26, 28, 31, 33, 3433]. Так в процесі транспортування газу, внаслідок стаціонарних і нестаціонарних процесів метал таких труб зазнає постійного впливу асиметричних втомних навантажень, температурних впливів, зсувних процесів у зоні їх прокладання [13, 16, 17]. Ці процеси сприяють субкритичному розвитку як корозійних, так і тріщиноподібних дефектів, які, досягнувши критичних розмірів, можуть призвести до аварійної ситуації, і, як наслідок, до суттєвих економічних та екологічних збитків, а також до людських жертв, внаслідок розлітання фрагментів і осколків трубопроводу, пошкодження (травмування) повітряною ударною хвилею в результаті перетворення енергії стисненого газу, термічного впливу в результаті горіння [1, 2, 19, 27, 36].

Втрати, спричинені такими аваріями, складаються з вартості ремонтно-відновних робіт та збитку через втрату і від неподання газу споживачам. Останні втрати можуть виявитися найбільш суттєвими через те, що магістральні газопроводи проходять, як правило, в районах, віддалених від населених пунктів, а це збільшує терміни ремонту пошкоджених ділянок [4, 13, 15, 36]. Так, згідно з розрахунками у результаті аварії на лінійній частині газопроводу, залежно від місця розриву і часу закриття найближчих кранів, а також довжини лінійних ділянок між кранами при розрахунковому тиску 5,4 МПа, втрати можуть складати близько 620 тонн газу [10]. Крім того, реальну небезпеку для навколишнього середовища становлять випадки руйнування газопроводу із спалахуванням газу, за якого, при цьому температура полум'я сягає 1500 – 1800° С, а висота факела - 60 – 200 м. Частота аварійних ситуацій із загорянням становить 50 – 60% від загальної кількості аварій. Вони є джерелом викидів NO_x і CO та теплового впливу на навколишнє середовище [1]. Наприклад, під час аварії на газопроводі "Новопсков – Аксай – Моздок" у 1996 р. струмінь палаючого газу сягав 200 м і був спрямований уздовж траси газопроводу паралельно межі житлової забудови [12], а під час вибуху газопроводу "Мінськ – Торжок" у 1997 році за 4 години вигорів ліс в радіусі 10 – 15 км [14]. Останнім часом у Черкаській області (Україна) зареєстровано три випадки стрес-корозійного розтріскування на магістральному газопроводі

“Уренгой – Помари – Ужгород”. Аварії відбулися на ділянках газопроводу поблизу компресорних станцій (до 25 км) і супроводжувалися вибухом та загоранням газу. В результаті аварій утворювалися котловини довжиною до 50 м, шириною до 30 м і глибиною до 10 м із зоною термічного враження в радіусі до 750 м, розліт осколків при цьому сягав 500 м [30].

Зауважимо, що вперше таке руйнування було зареєстроване у 1965 році на Трансканадській системі газопроводів [30, 32]. В Росії корозійне розтріскування під напругою або стрес-корозійне руйнування спостерігали ще в 70-х роках на магістральних газопроводах “Бухара – Урал” і “Середня Азія – Центр” [19]. Тоді на південній ділянці цих газопроводів було зареєстровано 103 випадки стрес-корозійного руйнування, а на підприємствах “Севергазпрому” сталося 7 подібного типу руйнувань, при цьому руйнувалися труби з поздовжнім та спіральним швом.

В ряді випадків [13, 19], у ході пневматичних випробувань газопроводів спостерігалось гільйотинне (лавинне) руйнування. Так, під час проведення випробувань другої черги газопроводу “Пунга – Вуктил” діаметром труби 1420 мм повітрям під тиском 8,25 МПа мав місце факт крихкого поширення тріщини довжиною 330 м. Іншим прикладом є лавинне руйнування обв'язувального газопроводу компресорної станції, коли за температури повітря -35°C і внутрішнього тиску повітря 7,4 МПа тріщина із швидкістю понад 450 м/с поширилась на 875 м.

Встановлено, що крихке (лавинне) руйнування [13] виникає в інтервалі температур, які значно нижчі за температуру пластично-крихкого переходу. Тріщина поширюється здебільшого перпендикулярно до поверхні труби в осьовому напрямку трубопроводу зі швидкістю, яка перевищує швидкість декомпресії газу. Під час гільйотинного (лавинного) руйнування газопроводу довжина початкової тріщини критичних розмірів залежить від багатьох чинників (низька температура транспортованого газу, наявність залишкових напружень, термічне та деформаційне старіння, характер зовнішнього середовища тощо). Довжина руйнування газопроводу інколи сягає декількох кілометрів [13, 15].

В газотранспортній системі Росії за останні 30 років експлуатації основною причиною аварійних ситуацій гільйотинного типу приблизно у 60 % випадках було корозійне розтріскування під напруженням або стрес-корозія [36].

Оскільки $\sim 50\%$ магістральних газопроводів експлуатуються понад 30 років, тобто вичерпали свій амортизаційний ресурс, то виникають серйозні застереження щодо їх безпечної експлуатації. Тому для підвищення безпеки та забезпечення ефективності транспортування природного газу вітчизняною трубопровідною системою актуальною проблемою є оцінка її технічного стану та прогнозування аварійних ситуацій [18, 19, 22, 27].

1. Об'єкт та методична процедура досліджень та розрахунків

Об'єктом розгляду є газопровідна труба з зовнішнім діаметром D та товщиною стінки t , яка містить паралельну до її поздовжньої осі наскрізну тріщину довжиною L (рис. 1).

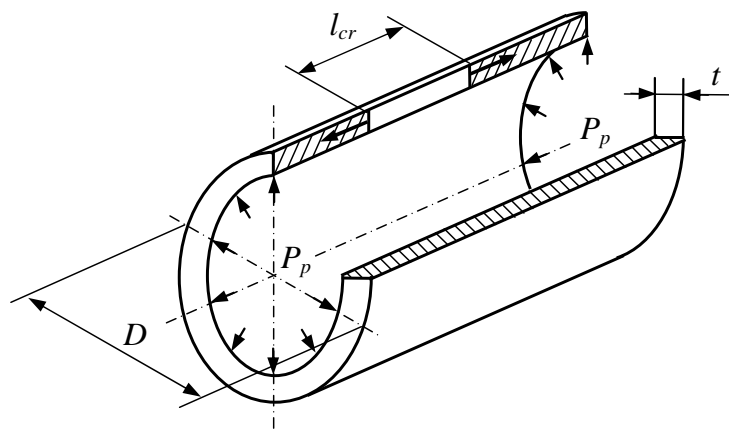


Рис. 1. Схема подання наскрізної тріщини в стінці газопровідної труби.

Процес лавинного розвитку стрес-корозійної макротріщини в трубопровідних сталях під впливом робочих навантажень, що діють в трубі, (тисків) P_p досліджували за відомою

методикою [6, 9, 21, 923]. При цьому виготовлені з металу експлуатованих труб з наявними пошкодженнями досліджували за допомогою в основу якої покладено призматичні зразки (рис. 2) та дослідну установку [7] (рис. 3, а) з метою виявлення закономірностей розвитку краєвих тріщини під час статичного навантаження, та випробувальній машині (рис. 4, а) на чистий згин (рис. 4, б) із жорстким способом навантаження.



Рис. 2. Загальний вигляд призматичного зразка для дослідження закономірностей розвитку краєвих тріщин.

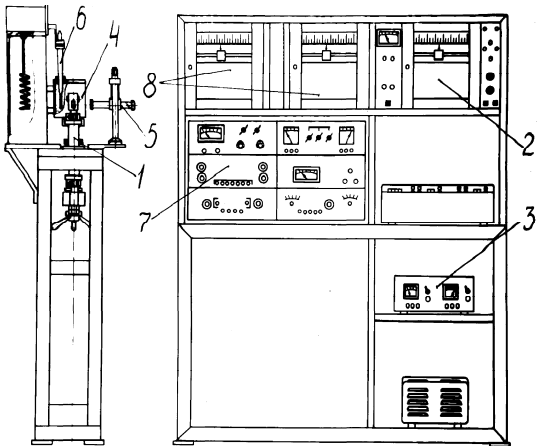
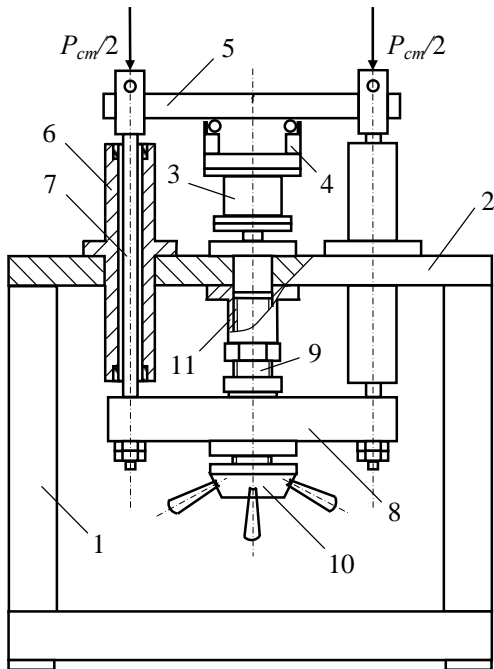
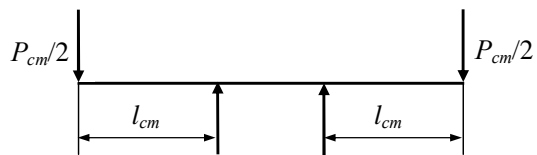


Рис. 3. Випробувальна установка для дослідження статичної корозійної тріщиностійкості конструкційних матеріалів:
 1 - випробувальна машина; 2 - прилад для реєстрації і контролю навантаження; 3 - джерело живлення мостової схеми; 4 - робоча камера; 5 - оптичний прилад для вимірювання довжини тріщини; 6 - система для підтримки заданої температури середовища в робочій камері; 7 - потенціостат; 8 - прилади для реєстрації електрохімічних параметрів (pH і φ).



а)



б)

Рис. 4. Схема випробувальної машини (а) на чистий згин (б) із жорстким способом навантаження:

- 1 - рама; 2 - підстава; 3 - динамометр;
- 4 - нижня опора; 5 - взірєць; 6 - напрямні;
- 7 - тяги; 8 - траверса; 9 - навантажувальний гвинт;
- 10 - маховик; 11 - опорна гайка.

Значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I у вершині краєвої тріщини в призматичному зразку визначали за формулою [9]:

$$K_I = \left[\frac{6M}{b\sqrt{(t)^3}} \right] \cdot \sqrt{\lambda \cdot f(\lambda)}, \quad (1)$$

де M – згинальний момент, прикладений до зразка;

b – ширина зразка;

t – висота зразка;

$$\lambda = \frac{l}{t};$$

l – довжина тріщини.

Функція $f(\lambda)$ відносної довжини тріщини змінювалась у межах $0 \leq \lambda \leq 0,8$ і обчислювалась за залежністю:

$$f(\lambda) = \begin{cases} 1,99 - 2,47\lambda + 12,97\lambda^2 - 23,17\lambda^3 + 24,80\lambda^4 + 60,50\lambda^{16} & \text{при } 0 \leq \lambda \leq 0,6 \\ \frac{0,6651}{\sqrt{\lambda(1-\lambda)^3}} & \text{при } 0,6 \leq \lambda \leq 0,8 \end{cases}. \quad (2)$$

Початком крихкого (лавинного поширення тріщини нормального розриву в деформованому твердому тілі вважається момент, коли коефіцієнт інтенсивності напружень K_I у вершині розглядуваної стрес-корозійної тріщини під час її локального розвитку стає рівним деякій константі матеріалу K_{Ic} . Тобто, критерій граничної рівноваги тіла з тріщиною (критерій Ірвіна [23]) можна записати так:

$$K_I(P_{cr}, l_{cr}) = K_{Ic}. \quad (3)$$

Тут P_{cr} – граничне значення зовнішнього навантаження P , з досягненням і перевищенням якого відбувається лавинний (неконтрольований) розвиток тріщини; l_{cr} – розмір тріщини. Величина K_{Ic} характеризує опір матеріалу поширенню в ньому тріщини у випадку квазістатичного збільшення навантаження (статична тріщиностійкість). Значення K_{Ic} є константою матеріалу в заданих умовах випробування і характеризує його тріщиностійкість при короткочасному статичному навантаженні.

Можливість реалізації крихкого руйнування труби внаслідок утворення в ній наскрізної тріщини (рис. 1) оцінювали з використанням формули [24] для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I у вершині наскрізної поздовжньої тріщини для циліндричної оболонки під дією внутрішнього тиску:

$$K_I = F \frac{P_p \cdot D}{2t} \sqrt{\frac{\pi \cdot l_{K_I}}{2}}, \quad (4)$$

де:

$$F = 1 + 0,072449\lambda + 0,64856\lambda^2 - 0,2327\lambda^3 + 0,038154\lambda^4 - 0,0023478\lambda^5;$$

$$\lambda = \frac{\frac{l_{K_I}}{2}}{\sqrt{\frac{D \cdot t}{2}}};$$

F – відома функція для циліндричної оболонки з наскрізною осью тріщиною під дією внутрішнього тиску P_p [24];

l_{K_I} – довжина наскрізної тріщини.

За формулою 4 визначали критичні розміри наскрізної тріщини за умови $K_I = K_{Ic}$, коли довжина тріщини буде рівна критичному значенню $l_{K_I} = l_{K_{Ic}}$, тобто:

$$l_{K_{Ic}} = \frac{8}{\pi} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{F \cdot P_p}\right)^2. \quad (5)$$

Або критичним вважали значення довжини наскрізної тріщини $l_{K_{Ic}}$, за якого починається процес спонтанного її поширення вздовж осі труби, вважали критичним l_{cr} .

Результати досліджень та їх обговорення

Оскільки критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} є основним параметром, який, з одного боку, характеризує опір матеріалу поширенню в ньому тріщини, а, з іншого, є критерієм конструкційної міцності, то критичні розміри l_{cr} наскрізної тріщини визначали за рівнянням 5, підставляючи до нього як власні експериментальні дані [8], і відомі з літератури [13, 18, 25, 26, 33] дані визначення критичної тріщиностійкості газопровідних сталей (див. таблицю 1). Причому подані в роботі характеристики критичної тріщиностійкості (критичне значення J -інтеграла за 0,2 мм приросту тріщини) подавали у вигляді критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} , обчисленого за допомогою рівняння:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{(1-\mu^2)}}, \quad (6)$$

J_{Ic} – критична тріщиностійкість (значення J -інтеграла за 0,2 мм приросту тріщини);

E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па);

μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

Таблиця 1

Вихідні дані та результати розрахунку за формулою 5 критичного розміру l_{cr} наскрізної тріщини в стінці магістральних газопроводів різних типорозмірів

Марка сталі	$D \times t$, мм	P_p , МПа	$T_{експ.}$, роки	J_{Ic} , кН/м	K_{Ic} , (МПа $\sqrt{м}$)	l_{cr} , мм	Джерело
МВ54 (аналог 10Г2ФБ)	1420×17,5	7,4	25	–	151,0	115,4	[13]
08Г2БН	1020×10,0	5,4	25	–	172,2	124,0	
Х-52 (аналог 17Г1С)	1220×12,0	5,4	0	412	300,9	230,0	[25, 33]
		5,4	30	127	167,1	131,0	
17Г1С	1220×12,0	5,4	0	322	266,0	207,0	
		5,4	31	208,5	214,1	169,0	
10Г2ФБ	1420×18,7	7,4	0	–	300,0	266,0	[8]
		7,4	30	–	141,8	117,0	

Слід зауважити, що в роботі [13] за результатами експериментальних досліджень було визначено критичні значення величини наскрізної тріщини l_{cr} . Різниця між одержаними розрахунковим та експериментальним шляхом (табл. 2) величинами l_{cr} не перевищує 5%, що свідчить про можливість використання формули 5 для визначення критичного значення величини наскрізної тріщини.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові дані критичного розміру l_{cr} наскрізної тріщини у стінках магістральних газопроводів різних типорозмірів

Марка сталі	$D \times t$, мм	P_p , МПа	l_{cr}^e , мм	l_{cr}^p , мм	$\Delta = \frac{l_{cr}^e}{l_{cr}^p} 100\%$, %
			експериментальні дані [13]	розрахована за формулою 5	
МВ54 (аналог 10Г2ФБ)	1420×17,5	7,4	118,0	115,4	2,3
08Г2БН	1020×10,0	5,4	118,0	124,0	4,8

Крім того, аналіз розглянутих вище випадків (табл. 3) свідчить, що експлуатація магістрального газопроводу високого тиску ($P_p = 7,4$ МПа) призводить до більшого ступеня деградації металу труби, ніж металу тривало експлуатованих газопровідних систем за меншого на третину ($P_p = 5,4$ МПа) робочого тиску. Так, у першому випадку критичне значення величини наскрізної тріщини l_{cr} в тривало експлуатованій трубі складає 44 % від її критичних розмірів для труби запасу, тоді як у менш навантажених трубах ця величина змінюється в межах 60-80 %.

Таблиця 3

Критичні розміри l_{cr} наскрізної тріщини у стінках не експлуатованих та тривало експлуатованих магістральних газопроводів різних типорозмірів

Марка сталі	$D \times t$, мм	P_p , МПа	l_{cr}^H , мм	$l_{cr}^{m.e.}$, мм	$\Delta = \frac{l_{cr}^{m.e.}}{l_{cr}^H} 100\%$, %
			не експлуатований метал	тривало експлуатований метал	
Х-52 (аналог 17Г1С)	1220×12,0	5,4	230,0	131,0	56,9
17Г1С	1220×12,0	5,4	207,0	169,0	81,6
10Г2ФБ	1420×18,7	7,4	266,0	117,0	44,0

Зауважимо, що критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} визначали згідно з методикою [6] за температури повітря $T = 20^\circ \text{C}$, використовуючи вище описане експериментальне устаткування. Оскільки величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} суттєво залежить від температури випробування, то, очевидно, і розмір наскрізної критичної тріщини l_{cr} у трубі магістрального газопроводу також залежатиме від температури навколишнього середовища. Крім

того, температурні залежності K_{Ic} використовують для виявлення областей крихкого-в'язкого переходу.

Висновки

За результатами розрахунків та експериментальними про статичну тріщиностійкість металу здійснено експрес-оцінку умов виникнення гільйотинного руйнування газопровідних труб.

Одержані результати вказують на те, що різниця між одержаними розрахунковим та експериментальним шляхом розмірами наскрізної тріщини l_{cr} не перевищує 5%, що доводить можливість застосування запропонованого методу експрес-оцінки.

Аналіз результатів свідчить, що тривала експлуатація магістрального газопроводу в умовах підвищених тисків призводить до більш суттєвої деградації металу труби.

1. Бабаджанова О. Ф. Фактори, що обумовлюють пожежну небезпеку лінійної частини магістрального газопроводу / О. Ф. Бабаджанова, Ю. Е. Павлюк, Ю. Г. Сукач // Пожежна безпека. – 2011. – № 18. – С. 27–34.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народно-хозяйственных, технических энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел второй. – М.: МГФ "Знание", 1998. – 416 с.
3. Борисенко В. А. Коррозионное разрушение газопроводов / В. А. Борисенко, Ю. П. Нихаенко, В. И. Крикун // Проблемы коррозии та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія-2006): у 2-х томах [спецвипуск журналу "Фізико-хімічна механіка матеріалів"]: VIII міжн. конф.-вист., 6-8 черв. 2006 р.: збірник праць. – 2006. – Спец. вип. №5. – С. 296-299.
4. 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.
5. Галеев В. Б. Ремонт магистральных трубопроводов и оборудования нефтеперекачивающих станций / В. Б. Галеев, Е. М. Сощенко, Д. А. Черняев – М.: Недра, 1968. – 224 с.
6. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
7. Грабовский Р. С. Установка для испытаний конструкционных материалов на статическую коррозионную трещиностойкость / Р. С. Грабовский, И. Н. Дмытрах, М. И. Лев [и др.] // Деп. ВИНТИ № 67 65 – В 89 от 10.11.1989 г. – С. 7.
8. Грабовський Р. С. Оцінка характеристик опору поширення тріщин експлуатованого металу магістральних нафтогазопроводів у корозійних середовищах / Р. С. Грабовський, В. С. Лужецький // Машинознавство. – 2008. – №11 (137). – С. 34-37.
9. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк – Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка. – 1999. – 341 с.
10. Довідник працівника газотранспортного підприємства / під заг. ред. А. А. Рудніка. – К.: Росток, 2001. – 1091 с.
11. ДСТУ–Н Б В.2.3.-21:2008 Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68 с.
12. Энергоэкологична безпека нафтогазових об'єктів / [Говдяк Р. М., Семчук Я. М., Чабанович Л. Б. та ін.] – Івано-Франківськ: Лілея НВ, 2007. – 556 с.
13. Иванцов О. М. Надежность магистральных трубопроводов / О. М. Иванцов, В. И. Харитонов. – М.: Недра, 1978. – 167 с.
14. Исаева Л. К. Основы экологической безопасности при техногенных катастрофах / Л. К. Исаева. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 156 с.
15. Каранович Е. В. Анализ причин аварий на магистральных газопроводах / Е. В. Каранович // Нефть и газ Западной Сибири: у 4-х томах / под общ. ред. О. Ф. Данилова: междунар. науч.-техн. конф., 19-20 окт. 2011 г.: материалы конференции. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2011. – Т2 – С. 41-43.
16. Крижанівський Є. І. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу / Є. І. Крижанівський, О. С. Тарасівський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 3 (12). – С. 31-34.
17. Крижанівський Є. І. Вплив середовища та нерівномірності споживання газу на безаварійну експлуатацію газопроводу / Є. І. Крижанівський, О. С. Тарасівський, С. Й. Тарасівський // Проблеми

- корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія-2008): у 2-х томах [спецвипуск журналу "Фізико-хімічна механіка матеріалів"]: IX міжн. конф.-вист., 10-12 черв. 2008 р.: збірник праць. – 2008. – Спец. вип. №7. – С. 791-796.
18. 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.
 19. Мазур И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов – М.: Елима, 2004. – 1104 с.
 20. Матросов Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. – М.: Металлургия, 1989. – 288 с.
 21. Механика разрушения и прочность материалов: [справ. пособ. в 4-х т. под общ. ред. В. В. Панасюка]. – К.: Наук. думка, 1988–1990.
 22. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник за заг. ред. В. В. Панасюка – Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / [Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк, І. В. Ориняк [та ін.]; за ред. Г. М. Никифорчина]; – Львів: Сполом, 2009. – 504 с.
 23. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник за заг. ред. В. В. Панасюка. – Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / [І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук, Л. Тот; за ред. І. М. Дмитраха]. – К.: ВД "Академперіодика", 2005. – 378 с.
 24. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник за заг. ред. В. В. Панасюка. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / [І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк; за ред. В. В. Панасюка]. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
 25. Никифорчин Г. М. Деградація властивостей сталей магистральных газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина [та ін.] // Проблеми міцності. – 2009. – № 5. – С. 66-72.
 26. Никифорчин Г. М. Чутливість механічних, корозійно-механічних та електрохімічних властивостей до експлуатаційної деградації сталей магистральных трубопроводів / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, М. І. Греділь // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: збірник наук. статей за результатами виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України у 2007-2009 рр.; зб. статей під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Національна академія наук України. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2009. – С. 29-32.
 27. Ориняк І. В. Наукові і організаційні засади впровадження ризик-аналізу в практику управління цілістю магистральных трубопроводів / І. В. Ориняк, М. В. Бородій, А. С. Батура // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин ("РЕСУРС"): звітна сесія цільової комплексної програми, 6-8 січня 2006 р.: наук.-техн. збірник під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – С. 11-15.
 28. Петрина Д. Ю. Вплив тривалої експлуатації нафтогазопроводів на умови корозійно-втомного руйнування матеріалу труб / Д. Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 1 (34). – С. 20-25.
 29. Поляков С. Г. Корозія внутрішньої поверхні магистральных газопроводів / С. Г. Поляков, Л. І. Ниркова, А. В. Клименко [та ін.] // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія-2006): у 2-х томах [спецвипуск журналу "Фізико-хімічна механіка матеріалів"]: VIII міжн. конф.-вист., 6-8 черв. 2006 р.: збірник праць. – 2006. – Спец. вип. №5. – С. 300-304.
 30. Поляков С. Г. Основні закономірності стрес-корозійного розтріскування магистральных газопроводів / С. Г. Поляков, А. О. Рибаків // Проблеми міцності – 2009. – № 5. – С. 7-17.
 31. Похмурський В. І. Зміна механічних та електрохімічних характеристик сталі газопроводів після тривалої експлуатації / В. І. Похмурський, Є. І. Крижанівський // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2009. – № 3 (21). – С. 5-10.
 32. Синугаев М. Ф. Стресс-коррозия на магистральных газопроводах и человеческий фактор / М. Ф. Синугаев, П. В. Климов, А. К. Гумеров [и др.] // Территория "Нефтегаз". – 2008. – № 8. – С. 32-36.
 33. Цирульник О. Т. Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магистральных газопроводів / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, Д. Ю. Петрина [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – Т. 43, № 5. – С.97-104.
 34. Цирульник О. Т. Оцінювання роботоздатності сталі 17Г1С після тривалої експлуатації на газогоні / О. Т. Цирульник, М. І. Греділь, О. З. Студент [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т. 13, № 4. – С. 49-55.
 35. Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С. Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 207 с.
 36. Яковлев А. Я. Стресс-коррозия на магистральных газонефтепроводах. – Киров: ОАО "Кировоградская областная типография", 2009. – 320 с.