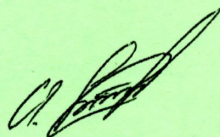


622.692.4

T 19

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Тараєвський Олег Степанович



УДК 622.692.4

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДУ НА ЙОГО  
БЕЗАВАРІЙНУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Крижанівський Євстахій Іванович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу, ректор,  
завідувач кафедри “Нафтогазового обладнання”,  
м. Івано-Франківськ.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Тимків Дмитро Федорович**, Івано-Франківський  
національний технічний університет нафти і газу,  
завідувач кафедри “Інформатики”, м. Івано-  
Франківськ;  
кандидат технічних наук

**Банахевич Юрій Володимирович**, УМГ  
„Львівтрансгаз” ДК “Укртрансгаз”, начальник  
виробничого відділу по експлуатації  
магістральних газопроводів і ГРС, м. Львів.



Захист відбудеться 02 листопада 2007 р. о 10 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, м. Івано-Франківськ, вул. С. П. Королька, 6019, Україна, м. Івано-Франківськ.

З дисертацією є рукопис  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76013, м. Івано-Франківськ, вул. С. П. Королька, 6019.

Автореферат і дисертація

Вчений секретар  
вченої ради Д  
канд. техн. на

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** У процесі експлуатації на магістральні газопроводи діють різні за характером і природою навантаження та середовища. Одночасна дія змінних навантажень і корозійного середовища веде до корозійно – втомного руйнування матеріалу труб.

Високий рівень напружень у стінках газопроводів викликаний внутрішнім тиском (до 7,5 МПа) перекачуваного газу, а для зварних кільцевих з'єднань ще і високим рівнем залишкових зварювальних напружень, які можуть досягати  $(0,4..0,6) \sigma_T$ . Це ставить особливі вимоги як до визначення їх величин, так і до прогнозування режимів експлуатації газопроводів.

Важливим етапом проведення досліджень є статистичний аналіз реальних режимів роботи магістральних газопроводів із пересіченим профілем траси, що дозволить встановити реальну картину руху газу в газопроводах. Однією із зовнішніх причин нестаціонарності роботи газопроводу є періодичне збурення від добових, місячних, а також річних коливань газоспоживання, які мають певну закономірність. Для оперативного диспетчерського керування, в основному, має значення облік коливання газоспоживання протягом доби. Для проведення таких досліджень важливо встановити причину виникнення нестаціонарного процесу, яка, в свою чергу, в більшості випадків визначає характер його протікання.

Згідно з останніми статистичними даними велика кількість відмов нафтогазопроводів (майже 80 %) зумовлені первинними корозійно-механічними пошкодженнями в місцях корозійних каверн і зварних з'єднань трубопроводів.

Таким чином, визначення впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію є актуальною науковою та прикладною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота носить прикладний характер і входить до комплексу робіт ДК „Укртрансгаз”, спрямованих на підвищення надійності і довговічності експлуатації газотранспортного комплексу України, окреслених Національною програмою „Нафта і газ України до 2010 року”, виконувалась у рамках науково-дослідної роботи „Дослідження корозійних процесів та розробка методів удосконалення протикорозійного захисту газопроводів” № д/р 01034001613/.

**Мета і завдання досліджень.**

**Мета роботи** полягає у розробці ефективних методів оцінки впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасний стан та уявлення про механізм руйнування магістральних газопроводів, параметри режиму роботи та фактори, що впливають на їх надійну експлуатацію;
- розробити нові методи визначення впливу нерівномірного споживання газу на напружений стан газопроводу, встановити реальну картину руху

газу, а також виявити закономірності пульсацій та їхній вплив на безаварійну експлуатацію газопроводу;

- встановити вплив наводнювального середовища на механічні характеристики різних зон зварного кільцевого з'єднання трубопроводу виготовленого із сталі 17Г1С, а також схильність до водневої крихкості;
- дослідити експериментальним шляхом основні закономірності втомного руйнування різних зон зварного кільцевого з'єднання трубопроводу із сталі 17Г1С при різних рівнях навантаження, що відповідають реальним режимам роботи газопроводів;
- розробити адекватну математичну модель низькочастотної пульсації тиску в газопроводі, яка описує закономірності руху газу і враховує нерівномірне споживання газу;
- запропонувати методику розрахунку параметрів режиму та прогнозування залишкового ресурсу роботи трубопроводу, що характеризуються нерівномірним споживанням газу та впливом терміну і характеру режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію.

**Об'єкт дослідження:** магістральні газопроводи, що працюють у режимі нерівномірного газоспоживання.

**Предмет дослідження:** оцінка впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію.

**Методи дослідження.** Дослідження проведене із застосуванням апробованих практикою сучасних методів та засобів для механічних і електроннофрактографічних експериментальних досліджень із дотриманням стандартних методик і використанням методів математичної статистики та планування експерименту. Основні висновки роботи узгоджуються з відомими даними теоретичних і експериментальних досліджень.

**Положення, що захищаються:** закономірності впливу робочого тиску в газопроводі і параметрів середовищ на корозійно - втомні характеристики матеріалу труб із метою прогнозування залишкового ресурсу газопроводу.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в підвищенні безаварійної експлуатації газопроводу на базі комплексних теоретичних і практичних досліджень, зокрема:

- вперше встановлено вплив нерівномірного газоспоживання на напружений стан газопроводу, реальну картину руху газу в газопроводі, а також виявлені закономірності пульсації та їх вплив на безаварійну експлуатацію газопроводу;
- вперше виявлені основні закономірності втомного руйнування зварного з'єднання сталі 17Г1С газопроводу при різних рівнях навантаження в наводнювальному середовищі та встановлено чутливість до водневої крихкості під час поляризації з одночасним активним навантаженням, встановлені фрактографічні ознаки облегчення розвитку корозійно - втомної тріщини під дією цього середовища та навантаження;



- удосконалено математичну модель низькочастотної пульсації тиску, на основі якої виявлено вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан, а також закономірність пульсації тиску на надійну експлуатацію газопроводу;
- знайшла подальший розвиток технологія оцінки безаварійної експлуатації найбільш небезпечних ділянок газопроводу з урахуванням одночасно впливу терміну експлуатації, режиму роботи та середовища, що дозволяє встановити залишковий ресурс роботи з урахуванням нерівномірності споживання газу.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробці оцінки впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію.

На основі дослідних даних розраховані значення коефіцієнтів, що враховують вплив концентратора ( $\beta_k$ ), вплив наводнювального корозійного середовища ( $\beta_c$ ), а також коефіцієнт, який враховує одночасну дію наводнювального середовища та концентратора напруження ( $\beta_{kc}$ ).

Запропонована математична модель дозволяє визначати низькочастотну пульсацію тиску, а також вплив нерівномірності газоспоживання на безаварійну експлуатацію газопроводу.

Розроблена методика розрахунку впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його надійну експлуатацію, впроваджена на підприємствах ДК „Укртрансгаз”.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Вони опубліковані в роботах без співавторів: досліджено вплив водню на руйнування трубопроводу під час нерівномірного газоспоживання [7]; проведено аналіз руйнування газопроводу при нерівномірному газоспоживанні [8]; проведено прогнозування нерівномірності газоспоживання [5]; дана прогнозна оцінка ресурсу трубопроводу під час нерівномірності газоспоживання [10].

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить проведення аналізу впливу нерівномірності газоспоживання на напружений стан газопроводу [1], розробка методики випробувань, взірців та виявлена чутливість до водневої крихкості зварного з'єднання (33) сталі 17Г1С [2], розробка алгоритму та програми розрахунку залишкового ресурсу роботи трубопроводу [3], проведено втомні випробування та мікрофрактографічний аналіз зруйнованих взірців [4], встановлені границі витривалості та наведено розрахунок коефіцієнтів [6], проведений аналіз потенційних причин аварій газопроводу, дана характеристика 33 сталі 17Г1С [9].

Автор брав безпосередню участь у розробці та впровадженні методики розрахунку впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його надійну експлуатацію в структурні підрозділи ДК „Укртрансгаз”.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародній НПК „Наукові дослідження – теорія та експеримент” (м. Полтава 2005р), IV міжнародній НПК „Динаміка

наукових досліджень -2005” (м. Дніпропетровськ, 2005р), III Всеукраїнській науково – технічній конференції молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (м.Київ, НАН України інститут електрозварювання ім.Є.О. Патона, рада наукової молоді ІЕЗ ім.Є.О.Патона, 2005р),VIII Міжнародній конференції – виставці „Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів” (м. Львів, 2006), Міжнародній науково-технічній конференції „Ресурсозберігаючі технології у нафтогазовій енергетиці” (м. Івано-Франківськ, 2007).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 друкованих праць, з них – 6 статей у фахових наукових виданнях ВАК України, в тому числі 1 – одноособова, 4 – тези доповідей на конференціях.

#### **Структура і обсяг дисертації.**

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 131 сторінках, а також проілюстрована 27 рисунками, 4 таблицями. Список використаних джерел містить 149 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** дано загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково – технічної проблеми визначення впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію. Обґрунтовано актуальність теми, на підставі чого сформульовані мета та основні задачі дослідження. Висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

У **першому** розділі аналізується стан та перспективи розвитку газотранспортної системи України. Стабільна робота магістрального трубопроводу залежить від його технічного стану. При оцінці останнього важливе місце займає достовірне визначення напружено-деформованого стану його лінійної частини.

Щоб надійно оцінити працездатність трубопроводів, необхідний комплексний системний підхід, однією з важливих складових якого є визначення напруженого стану труби, зокрема, в місцях із дефектами та у зварних з'єднаннях. Наявність дефектів у процесі експлуатації може призвести до передчасного руйнування трубопроводу. Однією з причин виникнення їх у металі труб і зварних з'єднаннях є корозійно - втомні тріщини. Як показує практика, термін експлуатації трубопроводів значною мірою визначається схильністю трубних сталей та їхніх зварних з'єднань до водневої крихкості. Тому ці питання були предметом досліджень багатьох відомих вчених. Вагомий внесок у цю галузь знань внесли О.Б. Айбіндер, О.Є. Андрейків, В.Л.Березін, Б.С. Білобран, П.П. Бородавкін, В.Я. Грудз, І.І. Капцов, В.І. Кир'ян, А.Я. Красовський, А.О. Кичма, Є.І. Крижанівський, Л.М. Лобанов,

А.Я. Недосєка, Г.М. Никифорчин, І.В. Орняк, В.А.Осадчук, Й.В.Перун, С.Г.Поляков, В.І. Похмурський, В.Ю.Чернов, Л.С.Шлапак та ін.

Однією з важливих складових комплексного системного підходу щодо надійної оцінки працездатності трубопроводів є визначення впливу наводнювального середовища та концентраторів напружень на руйнування газопроводів, зокрема, у місцях із дефектами та у зварних з'єднаннях, з якими пов'язано 70-80 % усіх відмов трубопроводів, які експлуатувалися протягом 30 років. Особливо це стосується зварних кільцевих швів, які, як правило, додатково не обробляються для зменшення залишкових напружень. Умови експлуатації катодно захищених магістральних газопроводів прискорюють можливість наводнювання і відповідно небезпеку руйнування, спричинену явищем водневої крихкості. Враховуючи особливості експлуатації газопроводів як зварної конструкції, під час руйнування якої поряд із водневою крихкістю проявляються дії корозійної втоми, останнім часом надають особливого значення вивченню впливу відносно малої кількості циклів навантаження на довготривалих випробувань. Реалізація таких досліджень, а особливо довготривалих випробувань, необхідних для правильного визначення ресурсу роботи трубопроводу, вимагає створення нових методологічних підходів до постановки та проведення експерименту.

У другому розділі наведений статистичний аналіз реальних режимів роботи газопроводів, що дозволить встановити реальну картину руху газу в газопроводі, а також загальні характеристики технологічних процесів.

Невідповідність між об'ємами поставки газу і його споживанням призводить до нестаціонарності газових потоків, що в поєднанні зі складною технологічною схемою газопроводів та пересіченим профілем траси приводить до складності прогнозування режимів роботи газопроводів та керування ними. Слід зазначити, що в залежності від вибору режиму роботи газотранспортних систем України можна зекономити або марно витратити на перекачку понад 3 млрд.м<sup>3</sup> газу на рік. Тому проблема вибору експлуатації складної газотранспортної системи, зокрема режиму роботи та керування ним в умовах нестаціонарності, є зараз особливо значущою для народногосподарського комплексу України.

Науково обґрунтоване визначення планових задач подачі газу в умовах нестаціонарності полягає в отриманні достовірної інформації про добову та сезонну нерівномірності споживання газу. На даний час формуються два основних напрямки прогнозування: перспективне та оперативне.

Вважається, що промислові споживачі газу рівномірно споживають газ протягом доби. Це твердження не завжди вірне, оскільки кількість спожитого газу як пального в промисловості визначається багатьма факторами, наприклад, нерівномірністю поступлення сировини, вимогами технологічного процесу до якості продукції та інше. Тому для промислових споживачів газу існує добова нерівномірність газоспоживання, яка може суттєво відрізнятись від нерівномірності споживання газу побутовими споживачами.

Буферні споживачі можуть використовувати різні види енергоносіїв ( в т.ч. і природний газ), їх використання в регіоні призводить до згладжування нерівномірності газоспоживання.

На рис 1 (а,б) показано графіки добового газоспоживання ГРС№ 2 і № 5 м. Черкаси, а на рис. 2 – графік добового газоспоживання м. Сімферополь. Як видно з графіків, зміна споживання газу протягом доби носить періодичний характер, причому частота коливань може бути різною як для одного і того ж регіону в різні дні року, так і для різних регіонів. Внаслідок періодичності вказана функція може бути апроксимована синусоїдою, параметри якої можна вибрати в залежності від фактичних величин газоспоживання та динаміки їх зміни для конкретного регіону.

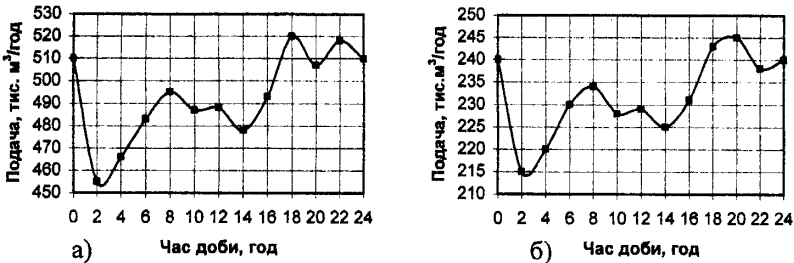


Рис. 1. Графіки добового газоспоживання ГРС № 5 (а), та № 2 м. Черкаси (б)

Від кількості споживачів і характеру споживання газу протягом доби залежить коливання витрати в газотранспортній системі, яке в свою чергу викликає коливання тиску.

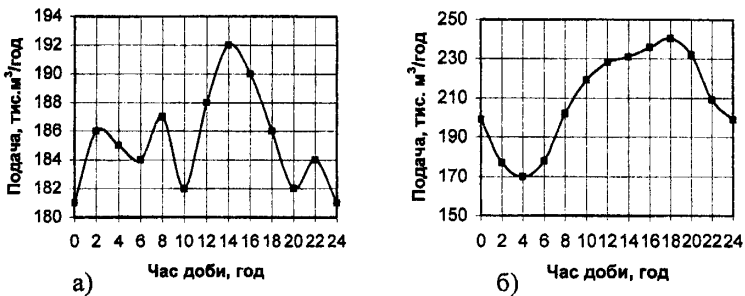


Рис. 2. Графік добового газоспоживання м. Сімферополь (а) та Миколаїв (б)

Як видно з графіків газоспоживання, скачки відбору газу відбуваються з часовим інтервалом, меншим 2 годин. У зв'язку з цим у газопроводі буде спостерігатися хвильовий процес, викликаний скачкоподібним пониженням чи підвищенням тиску. Це значить, що на низькочастотну складову процесу, викликану синусоїдальною зміною відбору, накладатиметься високочастотна складова, викликана скачкоподібною зміною тиску в точці відбору. Тому



загальний процес коливання тиску в газопроводі характеризується спектром частот.

Крім того, різке збільшення або зменшення споживання газу призводить до неусталеності його течії по трубопроводу, причому неусталені процеси внаслідок зміни густини газу можуть тривати годинами чи навіть добами. До аналогічних наслідків призводить зменшення або збільшення підкачки газу, раптове включення або відключення компресорних станцій, відкриття чи закриття засувок тощо.

Побудовані функції добового газоспоживання взяті за основу реалізації задач коливання тиску в газопроводі.

У третьому розділі викладені методика та результати експериментальних досліджень щодо чутливості до водневої крихкості трубної сталі 17Г1С; корозійно – втомних характеристик; механізму руйнування трубопроводу під впливом наводнювального середовища та нерівномірного газоспоживання.

Досліджували зварні з'єднання (ЗЗ) трубопровідної низьколегованої сталі 17Г1С. Зварювали ручним електродуговим зварюванням, силою струму 210 А, електродами УОНИ – 13/55, які попередньо прогартовувались при 560 К протягом однієї години. Циліндричні зразки двох типів вирізали вздовж твірної труби зі ЗЗ. Тип перший – гладка робоча частина діаметром 5 мм зі зварним швом (ЗШ) у центрі завширшки 3...4 мм. Тип другий – зразок діаметром 5 мм із круговим вирізом у певній зоні ЗЗ глибиною 1 мм, шириною відповідно 2мм.

На зразках другого типу вивчали вплив наводнювання на різні зони ЗЗ (зону термічного впливу – ЗТВ, зварний шов – ЗШ, основний метал – ОМ). Зразки навантажували зі стандартною швидкістю деформування  $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Наводнювали зразки за різної густини струму катодної поляризації в електрохімічній комірці, яка охоплювала їх робочу частину. Використовували водні розчини  $\text{H}_2\text{SO}_4$  із різною наводнювальною здатністю: рН1 та рН0.

Реалізували наступну послідовність наводнення і навантаження

а) зразки попередньо наводнювали протягом 1 год. за певною густиною струму поляризації, припиняли наводнювання і навантажували механічно на повітрі. Така схема дозволяла визначити вплив внутрішнього (абсорбованого металом) водню на механічну поведінку сталі;

б) зразки попередньо наводнювали протягом однієї години і, не припиняючи наводнювання, навантажували в середовищі до руйнування, що давало можливість виявити вплив водню, абсорбованого металом попередньо і під навантаженням. Схильність металу до водневої крихкості (ВК) оцінювали за відносним звуженням, яке, як відомо, найчутливіше до неї. Для цього обчислювали коефіцієнт  $k_{\psi} = \frac{\psi''}{\psi'} \cdot 100\%$ , де  $\psi''$ ;  $\psi'$  - відповідно відносне звуження наводнених і ненаводнених зразків.

Результати експериментів представлені на рис.3 (а,б). Сталь та її ЗЗ високопластичні за звичайних випробувань на повітрі (рис.3 а). Попереднє електролітичне наводнення в розчині з рН1 не впливає на пластичність гладких

зразків ЗЗ на повітрі (режим а), коефіцієнт  $\kappa_\psi = 1$  навіть за дуже високої густини струму поляризації, що контрастує з впливом агресивнішого розчину (рН0). Ці результати підтверджують загальне правило про низьку чутливість високопластичних низьколегованих сталей до водневої крихкості (ВК). Після додаткового наводнення (режим б) під навантаженням ЗЗ інтенсивно окричується (рис. 3 б). До того ж у розтягнутому, особливо пластично деформованому металі, збільшується розчинність водню, а також поряд із дифузійним діє дислокаційний його перенос. Порівняно малий вплив рН середовища в цьому випадку зумовлений, очевидно, фактом, постійної генерації все нових центрів адсорбції в деформованій поверхні, що полегшує проникнення водню в метал.

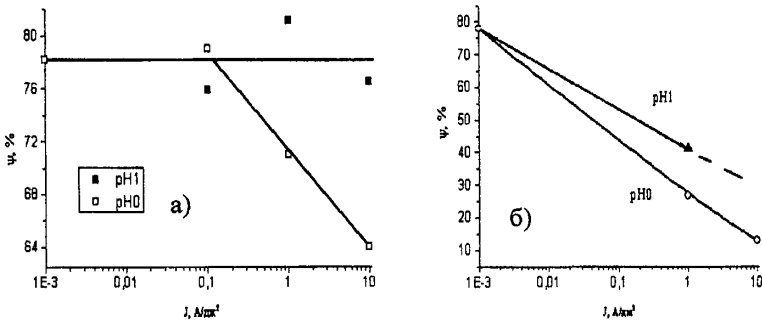


Рис. 3. Залежність відносного звуження від струму поляризації та рН середовища

Найінформативнішим показником схильності ЗЗ до ВК є відносне звуження ( $\psi$ ). Результати досліджень на зразках із вирізом (тип другий) у певній зоні ЗЗ представлені на рис.4. Дані результати можна використовувати для порівняння різних зон ЗЗ. Характеристика пластичності ( $\psi$ ) ненаводнених зразків у зонах ОМ та ЗТВ практично не відрізняється. Отже, водень одночасно окричує ОМ ( $\kappa_\psi = 0,67$ ) та більше ЗТВ ( $\kappa_\psi = 0,65$ ). Механізм впливу водню на ЗШ складніший. За низького струму поляризації метал пластифікується, а в подальшому  $\psi$  інтенсивно знижується до рівня властивого ЗТВ. Таким чином, у ЗЗ найчутливішим до крихкого руйнування під дією водню є ОМ та ЗТВ, що підтверджено металографічним аналізом профілів зламу ЗЗ.

Інформація щодо корозійної втоми ЗЗ магістральних газопроводів досить обмежена, а особливо в агресивному наводнювальному середовищі з поверхневими концентраторами у різних зонах ЗЗ.

Проводились втомні випробування даних типів зразків при малій кількості циклів навантаження частотою 0,3 Гц.

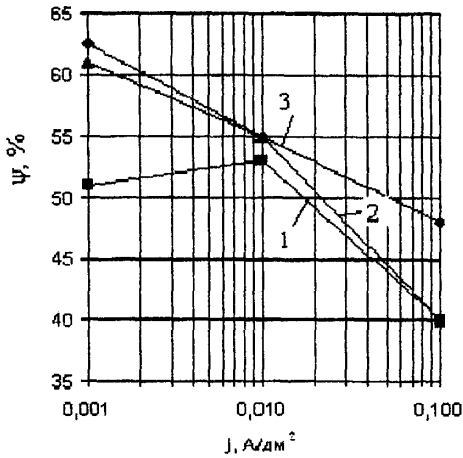


Рис. 4. Залежність відносного звуження від струму поляризації 1- ЗШ; 2- ЗТВ; 3- ОМ

Вибір даної частоти зумовлений тим, що під час експлуатації газопроводу в ньому на протязі доби при нерівномірному газоспоживанні виникають напруження, які коливаються з такою частотою. Результати випробувань представлені діаграмами втоми в координатах  $\sigma - \ln N$  на рис.5,6.

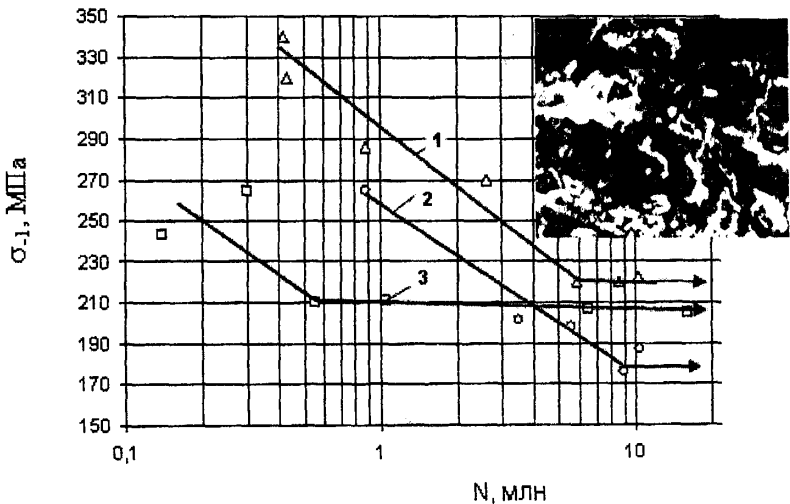


Рис. 5. Криві втоми та мікрофрактограма зламів взірців 33 сталі 17Г1С на повітрі: 1 - циліндричні гладкі зразки I – типу; 2 - зразки з концентратором у ЗШ; 3 - зразки з концентратором у ЗТВ

Отримані експериментальні дані дають можливість встановити границю витривалості як для циліндричних зразків із гладкою робочою частиною, яка охоплює всі зони ЗЗ, так і для зразків із концентратором у певній зоні ЗЗ на повітрі та у наводнювальному середовищі.

Отримані графічні залежності дозволяють визначити коефіцієнт, який враховує вплив концентратора напруження на стійкість сталі. Даний коефіцієнт визначається за нижченаведеними формулами як для ЗТВ, так і для ЗШ:

$$\beta_{кзТВ} = \frac{\sigma_{-1зТВ}}{\sigma_{-1}} = 0,88; \quad \beta_{кзШ} = \frac{\sigma_{-1зШ}}{\sigma_{-1}} = 0,79. \quad (1)$$

Слід зазначити, що чим більший цей коефіцієнт, тим більша стійкість сталі до негативного впливу концентратора напруження.

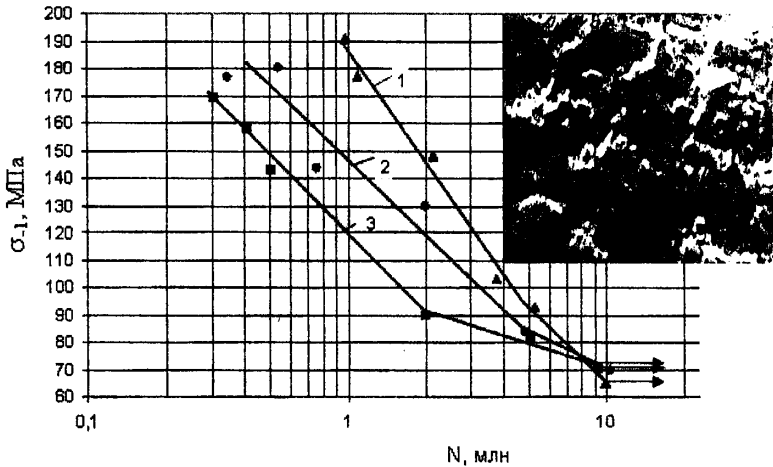


Рис. 6. Криві втоми та мікрофрактограма зламів взірців ЗЗ сталі 17 Г1С у наводнювальному середовищі:

1 - циліндричні гладкі зразки I – типу; 2 - зразки з концентратором у ЗШ; 3 - зразки з концентратором у ЗТВ

Вплив наводнювального корозійного середовища на стійкість гладких циліндричних зразків характеризується коефіцієнтом  $\beta_c$ , який дорівнює 0,30. Одночасний вплив концентрації напружень і середовища на стійкість сталі характеризується коефіцієнтом  $\beta_{кc}$  (ЗТВ 0,36, ЗШ 0,41). Зі збільшенням даного коефіцієнта підвищується стійкість сталі проти одночасного впливу середовища та концентратора напруження.

Маючи значення трьох коефіцієнтів, провели порівняльний розрахунок допустимих напружень. Даний розрахунок показав, що враховуючи коефіцієнт  $\beta_{кc}$ , який враховує одночасну дію концентратора напруження та середовища, можна підвищити допустимі напруження в процесі проектування магістральних газопроводів.

$$\frac{\beta_{\text{кзТВ}}}{\beta_{\text{кзТВ}} \cdot \beta_c} \approx 1,4; \quad \frac{\beta_{\text{кзЗШ}}}{\beta_{\text{кзЗШ}} \cdot \beta_c} \approx 1,8 \quad (2)$$

Виконані випробування показують, що розрахунок допустимих напружень, які виникають у результаті нерівномірного газоспоживання в наводнювальних середовищах, необхідно проводити з урахуванням коефіцієнта  $\beta_{\text{кз}}$ , що дасть змогу підвищити їх. А це в свою чергу дасть можливість збільшити пропускну здатність магістрального газопроводу за рахунок підвищення тиску.

Для більш повного з'ясування механізму руйнування магістральних трубопроводів, зокрема їх зварних з'єднань, проведений мікрофрактографічний аналіз зламів взірців. За результатами мікрофрактографічного аналізу зламів зразків, які проходили випробування на повітрі, не виявлено суттєвих аномалій з точки зору мікромеханізму руйнування (рис. 5). Суттєві зміни у мікробудові втомних зламів виявлені після корозійно - втомних випробувань взірців у корозійно - наводнювальному середовищі. У процесі таких випробувань наводнювальне середовище сприяє суттєвому розшаруванню площин ковзання, що відповідає одному із низькоенергоємних мікромеханізмів втомного руйнування, відомих у фрактографічній практиці, що призводить до суттєвого зниження границі корозійної втоми (від 220 до 60 МПа). Аналіз характеру руйнування в залежності від рівня напружень та бази низькочастотних випробувань показує, що при вищих рівнях напружень на поверхні зламу кратероподібних включень проявляється значно більше напружень, ніж при низьких рівнях. Крім того у зварному шві та у зоні термічного впливу кількість кратероподібних включень значно більша, ніж в основному металі навіть при низьких рівнях навантажень. Дане явище пояснюється впливом водню на формування таких мікропор, які прискорюють реалізацію мікромеханізму міжзеренних сколів у процесі корозійно - втомних руйнувань (рис. 6).

Таким чином, отримані відомості відносно корозійної втоми в агресивному середовищі, в тому числі з поверхневими концентраторами в різних зонах ЗЗ, а також механізму руйнування трубопроводу під впливом наводнювального середовища та нерівномірного газоспоживання, дають змогу під час проектування та експлуатації газопроводів користуватись достовірними вихідними даними, необхідними для прогнозування ресурсу роботи магістрального газопроводу.

**Четвертий** розділ присвячений розробці математичних моделей низькочастотної пульсації тиску, а також напружень, що виникають у середині трубопроводу. В залежності від вигляду конкретного графіка газоспоживання для його апроксимації пропонуються різноманітні варіанти математичних моделей, в основі яких лежить періодична функція. Запропоновано апроксимувати графік добового газоспоживання у вигляді

$$Q(t) = Q_{cp} + \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i) \quad (3)$$

Число гармонік ряду  $n$  вибирається в залежності від необхідної точності апроксимації, а циклічну частоту  $\omega_i$ , фазове зміщення  $\varphi_i$  та амплітудну складову  $Q_i$  визначають на основі обробки фактичного матеріалу за певний період часу (наприклад, за рік).

Для досягнення достатньої для інженерних розрахунків точності в ряді випадків достатньо однієї гармоніки ряду, тобто характер газоспоживання може бути апроксимований функцією

$$Q(t) = Q_{cp} + A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) . \quad (4)$$

Величину  $Q_{cp}$  в (3) і (4) визначають як середнє статистичне або математичне очікування за певний період газозабезпечення регіону. Однак можливе і середньоінтегральне визначення  $Q_{cp}$

$$Q_{cp} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T Q(t) dt . \quad (5)$$

Чим довший період спостережень  $T$ , тим більш достовірне значення середньостатистичної і середньоінтегральної величини середньодобового газопостачання.

Загальноприйнято оцінювати характер добової нерівномірності газоспоживання коефіцієнтом добової нерівномірності, який є відношенням середньодобової величини газоспоживання до максимального (пікового) газоспоживання протягом доби. Використовуючи залежність (4), отримаємо

$$k_d = \frac{Q_{cp}}{Q_{max}} = \frac{Q_{cp}}{Q_{cp} + A} = \frac{1}{1 + \frac{A}{Q_{cp}}} . \quad (6)$$

Коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання не залежить від характеристики трубопроводу, по якому подається газ у даний регіон, і є властивістю даного регіону як споживача енергії. Іншими словами, коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання можна визначити ще до подачі газового пального регіону газопостачання. Тоді, знаючи коефіцієнт нерівномірності газоспоживання, можна наближено прогнозувати характер газоспоживання даного регіону протягом доби:

$$Q(t) = Q_{cp} \cdot \left[ 1 + \left( 1 - \frac{1}{k_d} \right) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \right] . \quad (7)$$

Залежність (7) дозволяє побудувати графік добової нерівномірності газоспоживання за відомим коефіцієнтом добової нерівномірності споживання газу.

Великим енергетичним центрам, для яких частина споживачів енергії є буферними споживачами, притаманна ступінчаста зміна газоспоживання. У таких випадках на синусоїдальний закон зміни газоспоживання протягом доби накладається ступінчаста функція, в результаті чого апроксимація залежності може бути виражена функцією

$$Q_{(i)} = Q_{cp} + \Delta Q \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \pm q_i \cdot \sigma(t - t_i) , \quad (8)$$

де  $q_i$  – величина  $i$ -того скачка газоспоживання в момент часу  $t_i$ ;



$\sigma(t-t_1)$  - одинична функція Хевісайда.

На основі викладеної методики розроблено алгоритм та програму, які дозволяють розраховувати та прогнозувати споживання газу за допомогою коефіцієнта добової нерівномірності газоспоживання.

Побудовані функції добового газоспоживання покладено в основу реалізації задач коливання тиску в газопроводі

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (9)$$

Для рівняння (9) поставимо задачу знайти максимальну амплітуду і циклічну частоту коливань, коли характер газоспоживання визначається синусоїдальною кривою. З цієї метою за початок координат вибираємо кінцеву точку газопроводу, в якій відбувається відбір газу, а вісь лінійних координат  $Ox$  направимо вздовж осі трубопроводу в напрямку течії газу. Будемо відраховувати амплітудні значення коливань тиску від його стаціонарного значення в кожній точці трубопроводу.

Провівши ряд математичних операцій отримаємо

$$p(x,t) = \frac{2a}{F} \cdot \rho \cdot Q_a \cdot \sqrt{\frac{\chi}{\omega}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{\chi}} x} \cdot \sin(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{\chi}} \cdot x). \quad (10)$$

Із (10) видно, що коливання тиску в газопроводі за частотою співпадають із коливаннями відбору газу (вимушуючої сили), але зміщені за фазою в залежності від лінійної координати

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial M}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\text{де } \chi = \frac{c^2}{2a}.$$

Із метою оцінки амплітуди і частоти коливань тиску в газопроводі при скачкоподібній зміні відбору газу в кінці газопроводу використаємо рівняння (11). При цьому будемо вважати, що до початку нестаціонарності процесу ( $t=0$ ) газопровід працював у стаціонарному режимі і перекачував газ з витратою  $Q_{cp}$

$$P(x,t) = P(0,t) + \frac{c^2}{F} \cdot \left[ -\frac{M_{cp} - M_1}{L} \cdot t + \frac{2 \cdot M_{cp} \cdot L}{\pi^2 \cdot \chi} \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n \cdot \cos \frac{\pi \cdot n \cdot x}{L} \cdot (1 - e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \chi \cdot t}{L^2}}) \right]. \quad (12)$$

Розроблена математична модель низькочастотної пульсації тиску, що враховує вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан, а також закономірність пульсації тиску на безаварійну експлуатацію газопроводу, дозволяє отримати достовірну інформацію щодо тисків, які виникають у середині газопроводу.

Допустимі напруження в матеріалі зразка визначають за формулою

$$\sigma_d \leq \frac{\sigma_a}{m} \beta \beta. \quad (13)$$

Однак у цьому розрахунку не враховується можлива взаємодія між впливом концентрації напружень і дією корозійного середовища. Очевидно, більш правильно буде визначати допустимі напруження за формулою

$$\sigma_0 \leq \frac{\sigma_0}{m} \beta_{kc}, \quad (14)$$

$$\text{де } \sigma_0 = \frac{d}{2 \cdot \delta} \cdot P(x, t), \quad (15)$$

Коливання напружень, що виникають у трубі протягом дня, визначаються за допомогою рівності (14), яка базується на розробленій математичній моделі, яка, в свою чергу, дозволяє враховувати одночасно коефіцієнти добової нерівномірності газоспоживання ( $k_s$ ) та вплив середовища та концентратора ( $\beta_{kc}$ ).

Враховуючи особливості експлуатації газопроводів, у першу чергу, їх зварних з'єднань (33), при катодному захисті та дії на них циклічних навантажень у корозійному середовищі, руйнування протікає через водневу втому. Катодний захист частково або повністю усуває протікання анодних процесів у газопроводах, але не зменшує, а навпаки, підсилює процеси виділення іонів водню на поверхню газопроводу, що призводить до наводнення і викликає водневу крихкість. Крім того, якщо до катодно захищеної сталі постійно підводиться свіже корозійне середовище, яке інтенсивно переміщується, то процес наводнення протікає безперервно. Тому явище водневої втоми при катодному захисті газопроводів має місце. Найбільш чутливими до такого виду руйнування є кільцеві зварні з'єднання газопроводу.

Проведені випробування показують, що розрахунок допустимих напружень, які виникають у середині газопроводу в результаті нерівномірного газоспоживання в наводнювальних середовищах, необхідно проводити із урахуванням коефіцієнта  $\beta_{kc}$ , що дасть змогу підвищити їх, а це в свою чергу дасть можливість збільшити пропускну здатність магістрального газопроводу за рахунок підвищення тиску.

Таким чином, важливою умовою забезпечення стійкості газопроводів проти корозійно - втомних руйнувань у перекачуючому середовищі є правильний і раціональний вибір величини допустимого напруження для даного робочого середовища та малій кількості циклів навантаження.

Запропонований метод прогнозування залишкового ресурсу роботи трубопроводу ґрунтується на спостереженні в процесі експлуатації, а також на визначенні механічних параметрів труб під час експлуатації газопроводу, відхилення яких можуть значно порушити встановлені норми безпеки систем транспортування газу.

Отримані криві втоми та їх характер для кожного типу зразка математично описані з метою прогнозування залишкового ресурсу роботи трубопроводу.

Аналізуючи отримані результати роботи трубопроводу, який експлуатується 20 років, слід зазначити, що залишковий ресурс у кільцевому ЗЗ становить 11 %, а з концентратором у зонах ЗШ та ЗТВ відповідно 26 % і 8 %.

Тому найбільш небезпечною зоною у кільцевому зварному шві є зона термічного впливу. Це зумовлено тим, що неповне зняття залишкових напружень розтягу, які виникають під час зварювання, найбільш ймовірні. Таким чином, отримані результати є важливими для прогнозування ресурсу роботи магістральних газопроводів та раціонального вибору режиму роботи КС.

## ВИСНОВКИ

На основі виконаних комплексних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливу наукову задачу забезпечення безаварійної експлуатації магістральних газопроводів за допомогою розроблених ефективних методів оцінки впливу параметрів режиму роботи на їх безаварійну експлуатацію.

При цьому отримані такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану магістральних газопроводів показано величину і рівень проблем, які є недостатньо вивченими та не забезпечені необхідним теоретичним підґрунтям, ряд обмежень щодо їх вирішення. Обґрунтовано необхідність розробки нових методів оцінки впливу параметрів режиму роботи на безаварійну експлуатацію газопроводу.
2. Запропонований новий метод визначення впливу нерівномірного газоспоживання на напружений стан трубопроводу, а також виявлені закономірності пульсації тиску та їх вплив на безаварійну експлуатацію газопроводу.
3. Розроблено новий спосіб оцінки впливу наводнювального середовища на механічні характеристики 33 сталі 17Г1С магістрального газопроводу та встановлено найвищу чутливість до водневої крихкості під час поляризації з одночасним активним навантаженням. У результаті встановлено, що найвразливіші до водневої крихкості є основний метал та зона термічного впливу кільцевого зварного з'єднання газопроводу.
4. За результатами експериментальних досліджень встановлені закономірності втомного руйнування зварного з'єднання сталі 17Г1С газопроводу при різних рівнях навантаження в наводнювальному середовищі та встановлені фрактографічні ознаки розвитку корозійно - втомної тріщини. Встановлені границі витривалості 33 з врахуванням концентратора напружень та наводнювального середовища дали змогу визначити коефіцієнти, що враховують вплив концентратора ( $\beta_k$ ), вплив наводнювального корозійного середовища ( $\beta_c$ ) та коефіцієнт, який враховує одночасну дію наводнювального середовища та концентратора напруження ( $\beta_{kc}$ ).
5. Удосконалено математичну модель низькочастотної пульсації тиску, яка враховує вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан, а також закономірність пульсації тиску на безаварійну експлуатацію газопроводу.

6. Розроблена та запропонована методика розрахунку параметрів режиму та прогнозування залишкового ресурсу роботи трубопроводу із урахуванням нерівномірності споживання газу.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу //Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. - №3(12). – С.31-34.
2. Чутливість до водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального газопроводу/ О.Т Цирульник, Є.І. Крижанівський, О.С. Тараєвський, Д.Ю Петрина, М.І. Греділь -Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 2004. - №6. – С.111-114.
3. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Визначення залишкового ресурсу роботи кільцевих зварних з'єднань газопроводів // Науковий вісник Івано –Франківського національного університету нафти і газу. – 2005. - №1(10). – С.42-46.
4. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С., Петрина Д.Ю. Вплив наводнення на корозійно – механічні властивості зварних швів газопроводів. //Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. -№1(14). – С.29-34.
5. Тараєвський О.С. Прогнозування нерівномірності газоспоживання. //Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. -№1(22). – С.82-86.
6. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Дослідження корозійно – втомних характеристик сталі 17Г1С магістрального газопроводу// Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2006. – Спец випуск Том 1 – С.290-295.
7. Тараєвський О.С. Вплив водню на руйнування трубопроводу під час нерівномірного газоспоживання//Міжнародна НПК „Наукові дослідження – теорія та експеримент”, м. Полтава, 2005. – С.58-63.
8. Тараєвський О.С. Руйнування трубопроводу при нерівномірному газоспоживанні// IV Міжнародна НПК „Динаміка наукових досліджень – 2005”, м. Дніпропетровськ, 2005. – С.15-18.
9. Петрина Д.Ю., Тараєвський О.С., Вуйцік Д.С. Схильність зварного зєднання магістрального газопроводу до водневої крихкості// III Всеукраїнська науково – технічна конференція „Зварювання та суміжні технології”, м. Київ, 2005. – С.110-111.
10. Тараєвський О.С. Прогнозна оцінка ресурсу трубопроводів під час нерівномірності газоспоживання//Міжнародна науково – технічна конференція „Ресурсозберігаючі технології у нафтогазовій енергетиці”, м. Івано – Франківськ, 2007. – С.266-267.

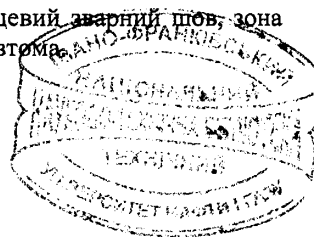
## АНОТАЦІЯ

Тараєвський О.С. Вплив параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13. – Трубопровідний транспорт, газонафтоосховища, Івано – Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано – Франківськ 2007.

Дисертація присвячена розробці ефективних методів впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його безаварійну експлуатацію. В роботі вирішуються задачі визначення впливу нерівномірності споживання газу на напружений стан газопроводу, встановлення картини руху газу, а також виявлення закономірностей пульсацій та їхній вплив на безаварійну експлуатацію газопроводу. Виявлені основні закономірності втомного руйнування зварного з'єднання сталі 17Г1С газопроводу при різних рівнях навантаження в наводнювальному середовищі та встановлено чутливість до водневої крихкості під час поляризації з одночасним активним навантаженням, встановлені фактографічні ознаки облегчення розвитку корозійно – втомної тріщини під дією цього середовища та навантаження. Удосконалено математичну модель низькочастотної пульсації тиску на основі якої виявлено вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан, а також закономірність пульсації тиску на надійну експлуатацію газопроводу. Розроблена методика розрахунку впливу параметрів режиму роботи газопроводу на його надійну експлуатацію, впроваджена на підприємствах ДК „Укртрансгаз”.

**Ключові слова:** магістральний газопровід, кільцевий зварний шов, зона термічного впливу, воднева крихкість, низькочастотна втома.



## АННОТАЦИЯ

Тараевский О.С. Влияние параметров режима работы газопровода на его безаварийную эксплуатацию - Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук за специальностью 05.15.13. - Трубопроводный транспорт, газонефтоосховища, Івано - Франковский национальный технический университет нефти и газа. Івано - Франковск 2007.

Цель диссертационной работы является разработка эффективных методов оценки влияния параметров режима работы газопровода на его безаварийную эксплуатацию. В работе определено влияние неравномерного газопотребления на напряженное состояние газопровода, реальную картину движения газа в

газопровод, а также выявленные закономерности пульсации и их влияние на безаварийную эксплуатацию газопровода.

Выполненный предыдущий анализ современного состояния и представление о механизме разрушения, параметрах режима работы и факторы, которые влияют на их безаварийную эксплуатацию газопроводов.

Определено влияние водородсодержащей среды на коррозионно - механические характеристики разных зон сварного кольцевого соединения трубопровода из стали 17Г1С, а также склонность к водородной хрупкости. Исследованы экспериментальным путем основные закономерности усталостного разрушения, сварного кольцевого соединения трубопровода при разных уровнях напряжения, которые отвечают режимам работы газопроводов.

Установлены фрактографические признаки облегчения развития коррозионно - усталостной трещины под действием водородсодержащей среды и разных уровней напряжения. Усовершенствована математическая модель низкочастотной пульсации давления, на основе которой выявлено влияние неравномерности газопотребления на напряженное состояние, а также закономерность пульсации давления на безаварийную эксплуатацию газопровода. Нашли дальнейшее развитие технология оценки безаварийной эксплуатации наиболее опасных участков газопровода с учетом одновременно влияния срока эксплуатации, режима работы и среды, которая разрешает установить остаточный ресурс работы с учетом неравномерности потребления газа.

Разработанная методика расчета влияния параметров режима работы газопровода на его надежную эксплуатацию внедрена на предприятиях ДК „Укртрансгаз“. Приведенная методика разрешает определить в процессе эксплуатации остаточный ресурс с определенной вероятностью не разрушения. Усталостные процессы имеют вероятностный характер. Это позволяет в совокупности с методами неразрушительного контроля и использованием риск - анализа при существующей концепции безопасности - „реализовать и исправлять“ поддерживать трубопровод в трудоспособном состоянии. Однако, при таких условиях эксплуатации (подчеркиваю, совместного действия сменных нагрузок и среды) при долгодействующей эксплуатации в материале труб накапливаются дефекты, которые в конечном результате приводят к их разрушению. Особая опасность заключается в труднодоступных местах (невозможно своевременно удалить опасность) или в осложненных условиях эксплуатации (например, трубопровод попал в зону сдвига). Здесь должна работать новая концепция риск - анализа - „предвидеть и опередить“. Именно данная методика разрешает сделать это еще на стадии проектирования.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, кольцевой сварной шов, зона термического влияние, водородная хрупкость, низкочастотная усталость.



## SUMMARY

Tarayevs'kyi O.S. Influence of gas pipelines duty parameters on their trouble – free operation. – Manuscript.

Thesis for the degree of the Candidate of Sciences in specialty 05.15.13 – pipeline transport, gas oil storages. – Ivano – Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas, Ivano – Frankivs'k, 2007.

The thesis is dedicated to the elaboration of proficient methods of gas pipeline duty parameters influence on its trouble – free operation. The study solves the problems of determining the influence of uneven gas consumption on the gas pipeline stress state? The establishment of the gas flow picture as well as the detection of the surge regularities and other influence on the gas pipeline trouble – free operation.

Detected are the main regularities of welded joint fatigue breakdown of gas pipeline 17Г1С steel at various loading levels in water in water invaded environment and determined is the sensitivity to hydrogen embrittlement during polarization with the simultaneous active loading, established are also the factual signs of weakening the development of a corrosive and fatigue crack under the influence of the above mentioned environment and loading. Perfected is the mathematical model of low frequency gas pressure surge based on which determined was the influence of uneven gas consumption on the stress state as well as the influence of gas pressure surge regularities on gas pipeline reliable exploitation. Elaborated is the methodology for the calculation of the influence of the gas pipeline duty parameters on its reliable exploitation which has been implemented at the enterprises of affiliate company AC “Ukrtransgaz”.

**Key words:** gas main, annular welded seam, thermal influence zone, hydrogen embrittlement, low frequency fatigue.