

УДК 622.692.4

**Й.Й. Лучко, А.О. Кичма**  
**ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТЕНЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ДІЛЯНОК**  
**МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

*У статті розглянуто деякі проблеми експлуатації та довговічності потенційно-небезпечних ділянок тривало експлуатованих магістральних трубопроводів. Удосконалений експрес метод оцінки роботоздатності ділянок трубопроводів на основі визначення їх просторового положення та твердості основного металу і зварних швів та розмірів корозійних і тріщино подібних дефектів, безпосередньо у трасових умовах.*

*Ключові слова:* магістральний трубопровід, твердість металу, оцінка роботоздатності, трубна сталь, розрахункові і допустимі напруження, коефіцієнт запасу міцності.

*Форм. 8. Табл. 4. Літ. 12.*

**Й.Й. Лучко, А.О. Кычма**  
**ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО - ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ**  
**МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*В статье рассмотрено некоторые проблемы эксплуатации и долговечности потенциально опасных участков длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов. Усовершенствован экспресс метод оценки работоспособности участков трубопроводов на основе определения их пространственного положения и твердости основного металла и сварных соединений и размеров коррозионных и трещино подобных дефектов непосредственно в трасовых условиях.*

*Ключевые слова:* магистральный трубопровод, твердость металла, оценка работоспособности, трубная сталь, расчетные и допустимые напряжения, коэффициент запаса прочности

**J.J. Luchko, A.O. Kychma**  
**PROBLEMS OF OPERATION POTENTIALLY UNSAFE OF SEGMENTS OF PIPELINES**

*The paper presents some problems of operation and durability potentially unsafe of segments of pipelines. Basing on the investigations, recommendations for engineering practice are suggested.*

*Keywords:* pipeline, hardness of metal, assessment of the capacity for work, steel of pipe, calculated and ultimate strength

**Постановка проблеми.** Магістральні трубопроводи (МТ) відносяться до особливо відповідальних інженерних споруд. Високі робочі тиски, велика протяжність трас, складні гідрогеологічні умови їх проходження, значні економічні збитки при аваріях МТ – все це обумовлює підвищені вимоги до їх міцності і надійності. Досвід тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок трубопровідних систем, таких як магістральні нафтогазопроводи, вказує на важливість урахування специфічних особливостей перерозподілу їх сумарних напружень і деформацій. Сучасні тенденції розвитку інженерних розрахунків стосовно забезпечення надійної і безаварійної експлуатації відповідальних вузлів і конструктивних елементів трубопровідних систем свідчать, що злободенною залишається проблема контролю їх напружено-деформованого стану та оцінки міцності і водночас забезпечення таких умов перебігу експлуатації, за яких унеможливується виникнення критичних (з точки зору руйнування) станів МТ. Тому узагальнення досвіду та розроблення ефективної методики оцінки міцності і формулювання висновків щодо подальшої експлуатації чи способів ремонту тривало експлуатованих ділянок потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів не втрачає своєї актуальності і донині.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методи розв'язування задач розрахунку на міцність трубопроводів великих діаметрів, наведено в багаточисленних роботах [1-4]. Багаторічний досвід експлуатації трубопровідних систем засвідчив, що чинні норми з проектування і експлуатації магістральних трубопроводів не повністю забезпечують реальну оцінку величини напружень і деформацій складових технічних систем, коли йдеться про роботу матеріалу труб за границею пружності в умовах експлуатаційних навантажень, зокрема, це стосується тих ділянок, що перебувають у екстремальних умовах, за яких виникають надмірні рівні напружень, які спричиняють утворенню пластично деформованих зон чи руйнування. У працях [ 5, 6 ] наведено низку причин перед аварійної експлуатації та фактори, які призводять до цього. Як вказує практика, зусилля спричинені вказаними зовнішніми навантаженнями, діючи сумісно з внутрішнім тиском, можуть викликати появу у стінках труб таких рівнів напружень, які перевищують границю пропорційності для основних марок сталей, з яких виготовлені магістральні трубопровідні системи.

Забезпечення несучої здатності трубопроводів на потенційно-небезпечних ділянках під час їх тривалої експлуатації є дуже важливою задачею. Особливості роботи надземних переходів магістральних нафтопроводів у гірських умовах розглянуті у роботі [7]. У праці [8] наведені результати оцінювання границі текучості та тимчасового опору трубною сталі марки «Ц» за твердістю за Брінелем. Основні положення і методи діагностування стану технічних об'єктів та виявлення їх дефектності неруйнівними методами контролю розглянуто у працях [9,10] і нормативному документі [11]. Сучасні іноземні технології забезпечення тривалої експлуатації і цілісності магістральних трубопроводів описані у працях [12,13]. Визначення залишкового ресурсу труб нафтопроводів з тріщинами і оптимізація параметрів їх експлуатації розглянуті у роботі [14].

**Невирішені частини проблеми.** Відомі методи [15] експериментального визначення механічних характеристик основного металу трубопроводу і біляшовної зони на спеціально виготовлених зразках, які проводяться на обладнанні у стаціонарних лабораторіях за умов одновісного напруженого стану. Такі роботи вимагають великих матеріальних і часових затрат, але переважно технологічна ситуація на трасі вимагає більш оперативного вирішення цього питання.

**Метою дослідження** є узагальнення досвіду тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок МТ. Використовуючи неруйнівні методи контролю та діючі нормативні документи, обґрунтувати і розвинути експрес метод оцінки роботоздатності ділянок трубопроводів на основі визначення їх просторового положення та стану основного металу і зварних швів та розмірів корозійних і тріщино подібних дефектів безпосередньо у трасових умовах і проведення розрахунків та формулювання висновків про можливість подальшої експлуатації МТ або способи їх ремонту.

**Основні результати досліджень.** Починаючи з 1962 року усі споруджені в країнах СНД магістральні трубопроводи розраховувалися на міцність за методом граничних станів [16]. Суть цього методу стосовно магістральних трубопроводів полягає у тому, що розглядають такий його стан, при якому споруда перестає опиратися дії внутрішнього тиску або утворення значних залишкових деформацій унеможливить його подальшу нормальну експлуатацію.

При проектному розрахунку МТ основний геометричний параметр ділянки труби – товщина стінки визначається за відомою величиною робочого тиску, виходячи з першого граничного стану руйнування трубопроводу від внутрішнього тиску. При цьому враховують лише кільцеві нормальні напруження від внутрішнього тиску та поздовжні осьові напруження (пов'язані з поздовжньою силою) від усіх розрахункових навантажень і впливів. Розрахунковий опір встановлюють за нормативним значенням границі міцності матеріалу труб. Жодних дефектів у стінці трубопроводу не допускається.

З метою запобігання утворенню значних поздовжніх деформацій трубопроводу також виконують перевірку за другим граничним станом, записуючи умову через найбільші поздовжні нормальні напруження, що пов'язані як з нормальною силою так і згинальним моментом від усіх нормативних навантажень і впливів. Допустимі поздовжні нормальні напруження встановлюють за мінімальним значенням границі текучості. Розтягальні допустимі напруження визначають без врахування дії внутрішнього тиску, а стискальні – з його врахуванням відповідно до критерію міцності енергії формозміни. Допустимі значення робочих навантажень і впливів визначаються здебільшого розрахунком за другим граничним станом. Обумовлена дефектами тіла труби, концентрація напружень у явному вигляді, також не приймається до уваги.

Методи які використовуються при проектуванні і розрахунку магістральних трубопроводів дозволяють забезпечити достатньо високий рівень надійності в процесі їх експлуатації. Здебільшого, максимальні проектні розтягувальні напруження в металі труб не перевищують  $0,7 - 0,8 \sigma_T$  для кільцевого напрямку і  $0,9 \sigma_T$  для поздовжнього напрямку.

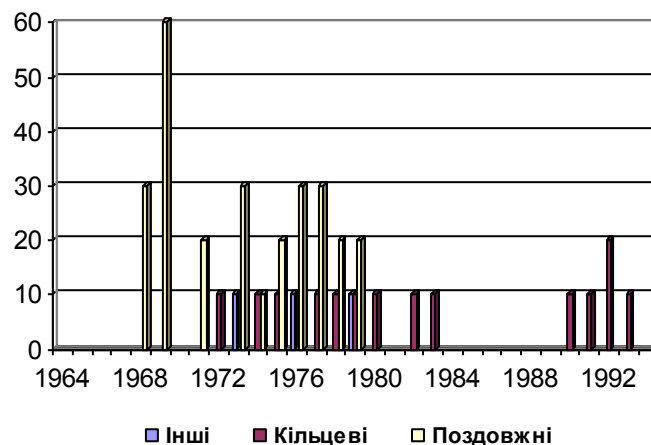
Проте, враховуючи той факт, що при спорудженні трубопроводу частину найнебезпечніших дефектів тіла труби не вдається виявити, перед введенням його в експлуатацію обов'язково проводять випробовування трубопроводу внутрішнім тиском більшим від робочого.

На магістральних трубопроводах, введених в експлуатацію до 1980 року, на ділянках III і IV категорії випробовувальний тиск не менше як на 10% перевищував робочий, а на ділянках вищих категорій –  $P_{вип} \geq 1,25P_{роб}$ . Найбільший внутрішній тиск при випробуваннях не перевищував 90% від тиску, що викликає в металі труб напруження, які рівні границі текучості  $\sigma_T$ .

Як показує практика, передпускові випробовування не викривають усіх дефектів в тілі трубопроводу. Після введення його в постійну експлуатацію в ньому залишається певна кількість дефектів і особливо в кільцевих зварних швах, які з одного боку при випробовуваннях внутрішнім

тиском зазнають дії поздовжніх напружень істотно менших від кільцевих, а з другого боку на ділянках III і IV категорії проходять лише 20% контроль фізичними методами.

Небезпека руйнування стінки трубопроводу в дефектних зонах з часом зростає в наслідок дії повторно-змінних навантажень, спричинених змінами режимів експлуатації, як показує діаграма приведена на *рис. 1*. На *рис. 1* наведено діаграму аварійних розривів нафтопроводів «Дружба» за період з 1964 по 1993 роки у місцях дефектів, допущених при виготовленні труб та при виконанні будівельно-монтажних робіт (поздовжні та кільцеві зварні шви, заплати, та ін.). Як видно з діаграми, на початковій стадії експлуатації переважали розриви вздовж твірної здебільшого по поздовжніх зварних швах від дії кільцевих напружень, спричинених внутрішнім тиском. У 80-90 роках поздовжні розриви труб припинилися. Що певною мірою також пояснюється зниженням робочих тисків. Проте розриви по кільцевих зварних швах продовжувалися. На початку 90-х років мали місце декілька серйозних аварій нафтопроводів діаметром 1020 і 1220мм з розривом кільцевих зварних швів, виконаних напівавтоматичним способом.



*Рис. 1. Кількість аварійних розривів нафтопроводів у дефектних зонах по роках*

Відома аварія нафтопроводу з умовним діаметром 1200 мм і товщиною стінки 12мм під час виконання ремонтних робіт із заміною ізоляційного покриття, що проводились методом поступового шурфування та відновлення ділянки трубопроводу у відкритих траншеях [ 17 ]. Осередок руйнування кільцевого шва знаходився зверху нафтопроводу (положення 12 години за циферблатом годинника) у зоні непровару максимальною довжиною 370 мм та дії найбільших розтягальних поздовжніх напружень, спричинених згином підкопаної ділянки. Заповнюючий шар довжиною біля 1,5 м виконано без або з частковим оплавленням з'єднувальних труб. Виявлені чисельні непровари шириною до 8 мм і загальною довжиною до 700 мм, були закриті кореневим та облицювальним шарами.

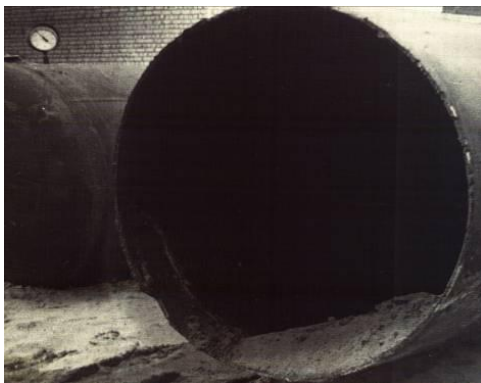
На *рис.2 а* показано поверхню руйнування дефектного зварного шва при стендових випробуваннях ділянки трубопроводу 1220×12 мм довжиною 70 м під тиском 4,2 МПа,  $\sigma_{02}=375$  МПа за схемою трьохточкового згину [18]. Під час стендових випробувань ділянки трубопроводу його кільцевий зварний шов знаходився біля проміжної опори в зоні дії згинального моменту, близького за величиною до максимального. Збільшення цього моменту здійснювали за рахунок опускання крайньої опори. Руйнування наступило раптово по всьому периметру перерізу при напруженнях більших за границю текучості матеріалу труби, після опускання опорного перерізу на 2 м. Причиною руйнування послужив непровар кореневого та частково заповнюючого шарів, довжина яких в окремих місцях досягала 708 мм.

Графічні залежності згинального моменту від найбільшої поздовжньої деформації згину показано на *рис.2 б*. Криву 1 побудовано за результатами випробування цієї труби, криву 2 – за результатами розрахунків за методикою роботи [19], що ґрунтується на деформаційній теорії пластичності. Діаграму деформування, одержану при випробуваннях зразків, вирізаних в поздовжньому напрямі, схематизовано при розрахунках лінійно пружною зоною і площиною текучості ( $\sigma_T=375$ МПа,  $\varepsilon_T=0,00178$ ).

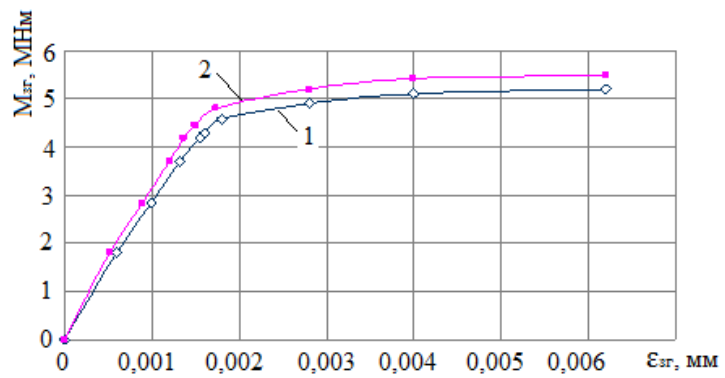
На *рис.3*. показано фотографії зруйнованого зварного шва магістрального газопроводу (МГ) на ділянці Комарно – Дроздовичі Ду 500 мм. Аварійний витік газу відбувся внаслідок розкриття тріщини в кільцевому зварному шві за тиску 4,4 МПа ( див. *рис.3а*). МГ Комарно – Дроздовичі

був введений в експлуатацію у 1961 р, змонтований із труб зі сталі марки 14ХГС і призначений для транспортування газу.

Згідно сертифікату №580 Харцизького трубного заводу (ХТЗ) на сталеві електрозварні газопровідні труби розміром 529x8 мм, які виготовлені згідно технічних умов 182-60 зі сталі марки 14ХГС за ТУ №10161-56, матеріал труби має наступні фізико-механічні характеристики: границя міцності  $\sigma_b=555,0-575,0$  МПа; границя текучості  $\sigma_T = 380,0-400,0$  МПа. Результати металографічних досліджень зразків, вирізаних із труб розглянутої ділянки МГ "Комарно – Дроздовичі" показали, що матеріал проб сталі мав наступні фізико-механічні і технологічні характеристики: границя міцності  $\sigma_b=487$  МПа; границя текучості  $\sigma_T= 238$  МПа; відносне видовження  $\varepsilon= 27$  %; відносне звуження  $\psi= 50,9$ ; ударна вязкість КСУ= 54 Дж/см<sup>2</sup>.



a



b

**Рис. 2. Дослідження зварного шва при стендових випробуваннях ділянки трубопроводу: a - руйнування дефектного зварного шва; b - Залежність згинального моменту від параметра кривизни: під час випробовування труби: 1 – за результатами випробувань; 2 – за результатами розрахунку [19]**

За результатами обстеження можна відмітити, що у результаті деградації металу тіла труби, циклічних навантажень та недопустимих дефектів у зоні кільцевого шва, під дією напружень утворилась наскрізна тріщина довжиною 1250 мм, і відбулося руйнування зварного кільцевого шва. Стик був заварений з грубим порушенням технології зварювання [20] з непроваром у корені шва. На зварне з'єднання діяли додаткові напруження від пружного згину трубопроводу, що виникли у результаті горбистого рельєфу місцевості. Тріщина у заповненні зварного шва довжиною 520 мм утворилась значно раніше, про що свідчить рис. 3, b. У зоні трубопроводу, що примикає до місця аварії виявлено ще ряд дефектних кільцевих зварних швів.



a



b

**Рис.3. Вигляд зруйнованого зварного шва магістрального газопроводу після аварійного витoku газу: a – стан трубопроводу після розкриття тріщини в кільцевому зварному шві; b – фрагмент перерізу труби з суцільною тріщиною в зоні зварного шва**

Оскільки руйнування зварного шва МГ "Комарно – Дроздовичі" відбулося у січні місяці у густонаселеному районі, то дану аварію необхідно було ліквідувати дуже оперативно. Виходячи з цього на місці зруйнованого зварного шва було встановлено котушку, що дозволило транспортувати газ при пониженому тиску. Для визначення можливості подальшої безпечної експлуатації ділянки МГ, що безпосередньо прилягає до зони руйнування зварного шва газопроводу були проведені комплексні обстеження. Ділянка газопроводу довжиною 80 м, яка безпосередньо примикає до місця руйнування кільцевого зварного шва була розбита на зони, у які ввійшли місця розташування де відбувся витік газу і чотирьох шурфів. Використовувались технології, що дають можливість визначати просторове положення трубопроводів як з поверхні землі за допомогою електромагнітних трасошукачів, так і безпосереднім контактом з тілом труби у шурфі. Прив'язка визначених точок осі трубопроводу до просторових державних координат проводилась за допомогою GPS-приймачів. Із результатів відхилень осі трубопроводу в горизонтальній і вертикальній площинах видно, що положення у горизонтальній площині суттєво відрізняється від прямолінійного положення і досягає 2 м на відстані 12 м, що обумовило виникнення додаткових напружень в трубопроводі вже на стадії монтажу. У зв'язку з цим враховували додаткові напруження, що виникають в трубопроводі за рахунок відхилення його осі від прямолінійності, використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ), у тому числі і програмний комплекс "Solid Works Simulation".

Місцезнаходження шурфів вибирали на ділянках найменших радіусів пружного вигину труби, за результатами досліджень просторового розташування трубопроводу, стану електрохімічного захисту, а також можливих зсувів і результатів попередніх обстежень. Під час діагностики були проведені обстеження твердості безпосередньо матеріалу шва і біляшовної зони кільцевих зварних з'єднань у шурфі суміжному із зруйнованою ділянкою газопроводу. Схема розміщення точок заміру твердості металу труби, шва і біляшовної зони показана на рис. 4. Результати замірів твердості за шкалою Брюнелля (НВ) у різних зонах заміру у шурфі №1 наведені у таблиці 1.

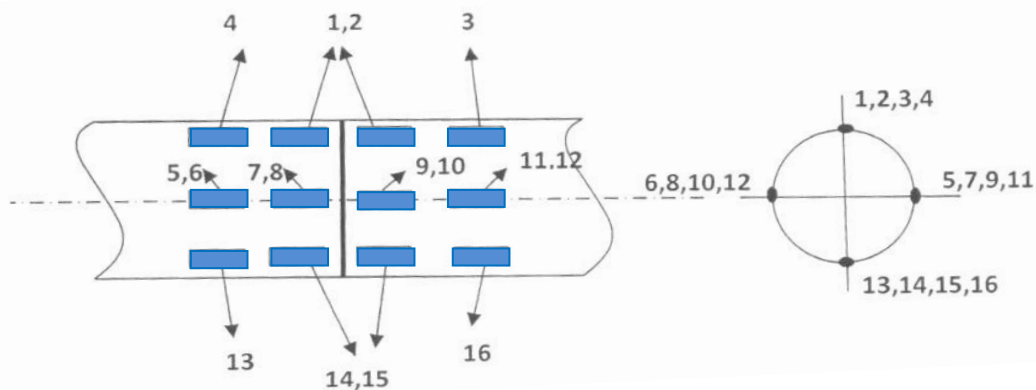


Рис.4. Схема розміщення точок заміру твердості металу труби і шва: 1,2,7,8,9,10,14,15 – біляшовна зона; 3,4,5,6,11,12,13,16 – на віддалі 200 мм від зварного шва

Таблиця 1.

Значення твердості металу труби і зварного шва у різних точках заміру у шурфі №1

№ зони заміру	Значення твердості, НВ Н/мм <sup>2</sup>
1,7,8,14	1930,1870,1850,1920
2,9,10,15	1840,1770,1790,1800
4,5,6,13	1680,1530,1560, 1610
3,11,12,16	1490,1470,1480,1440

Аналіз отриманих результатів під час натурних вимірювань показав, що твердість металу зварного шва зліва біляшовної зони лежить у діапазоні 1920-1850 Н/мм<sup>2</sup>, а справа – відповідно 1840-1770 Н/мм<sup>2</sup>. Твердість металу труби на відстані 200 мм зліва від осі шва лежить у діапазоні 1680-1530 Н/мм<sup>2</sup>, а відповідно справа 1490-1480 Н/мм<sup>2</sup>, що указує на деяку різницю механічних характеристик двох суміжних труб. Твердість металу зварного шва у біляшовній зоні досягає значень 1770-1930 Н/мм<sup>2</sup> і відповідає рекомендованим нормативним значенням [20], яке повинно знаходитись у діапазоні 1600-2000 Н/мм<sup>2</sup>.

Суть удосконаленого експрес-методу визначення НДС і оцінки роботоздатності аварійної ділянки трубопроводу полягає у тому, що більшість робіт і розрахунків оперативно проводиться безпосередньо на основі одержаних даних експериментальних досліджень, проведених у трасових умовах. З цією метою удосконалено методику визначення границі текучості та границі міцності металу труб у польових умовах за результатами вимірювань інформативного параметра твердості портативними твердомірами. Під час удосконалення експрес-методу оцінки роботоздатності МГ були проведені ряд напрацювань. Зокрема було здійснено дослідження твердості на спеціально виготовлених зразках. До проведення випробування їх на розтяг, здійснювались заміри твердості та границі текучості втисканням кульки згідно [21] і за допомогою переносного твердоміра "ТЕМП-3" згідно нормативного документу [11]. Різниця між середніми результатами визначення твердості металу труби за допомогою стаціонарного твердоміра і переносного твердоміра «ТЕМП-3» з врахуванням експериментально встановленого коефіцієнта кореляції не перевищувала 1,7 %.

Використовуючи залежності, які рекомендовані в [11] визначали границю текучості  $\sigma_T$  і границю міцності  $\sigma_B$  на основі значень заміряної приладом «ТЕМП-3» твердості за Брінеллем:

$$\sigma_T = 0,367 \text{ HB} - 240 = 0,367 \times 1610 - 240 = 350,87 \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$\sigma_B = 0,345 \text{ HB} = 0,345 \times 1610 = 555,45 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Заготовлені зразки випробували на розривній машині у результаті чого встановлювали границю текучості  $\sigma_T$  і границю міцності  $\sigma_B$  і порівнювали з аналогічними параметрами отриманими за формулами (1) і (2). Порівняння усереднених результатів вимірювання твердості і механічних характеристик матеріалу плоских зразків на розривній машині і аналогічними параметрами визначеними за допомогою динамічного переносного твердоміра "ТЕМП-3" за формулами (1) - (2) показали задовільну збіжність.

У випадку зменшення товщини стінки ділянки труби, наприклад корозійної виразки, міцність трубопроводів оцінювали за методом граничних станів згідно [16]. Для комплексного розрахунку такої проблемної ділянки МГ застосувати метод скінченних елементів (МСЕ). Використання МСЕ вдало поєднує матричне представлення основних рівнянь рівноваги і руху з застосуванням комп'ютерної техніки для їх розв'язання. При розробці математичної моделі застосовували плоскі або об'ємні елементи типу PIPE, BEAM, TRIANG, SHELL, SOLID та інші. Континуальну суцільну конструкцію замінювали сукупністю скінченних елементів, з'єднаних між собою у вузлах кінцевим числом жорстких зв'язків. Взаємодію трубопроводу з ґрунтом представляли у вигляді моделі пружно-пластичного тіла. Диференціальні рівняння дійсної системи приведені до системи алгебраїчних рівнянь, яка відповідає числу ступенів вільності всієї ідеалізованої системи. Для цього всередині зони кожного дискретного елемента задавали розподіл узагальнених переміщень чи напружень або ж сумісний розподіл переміщень і напружень. Істотним є вибір оптимального числа елементів та кількості вузлів таким чином, щоб забезпечити достатню точність розрахунків, а також виявлення оптимального числа ітерацій. Визначивши вектор переміщень вузлів елементів МТ, використовуючи узагальнений закон Гука, знаходили розрахункові напруження. Сумарні напруження визначали на основі теорії Губера-Мізеса і порівнювали з допустимими напруженнями.

Розрахунок коефіцієнтів запасу міцності трубопроводів з гострокінцевими дефектами за статичного навантаження проводимо на основі діаграми оцінки руйнування (ДОР), яка є граничною кривою, що визначає границю міцності між безпечним та небезпечним станами ділянок трубопроводів. ДОР ґрунтується на двокритеріальному підході і дозволяє одночасно аналізувати два граничні стани – крихкий та в'язкий [22]

$$Y = f(S_r, K_r), \quad (3)$$

де  $K_r = K_1 / K_{1c}$  характеризує міру наближення до крихкого руйнування в деякій точці в зоні тріщиноподібного дефекту,  $K_1$  - розрахунковий КІН,  $K_{1c}$  - критичне значення КІН, а  $S_r = \sigma_{ref} / \sigma_B$  - оцінює міру наближення до в'язкого руйнування,  $\sigma_B$  - границя міцності,  $\sigma_{ref}$  - довідкове напруження. Існують різні подання функції (3), обґрунтовані головним чином на узагальненні експериментальних даних. Зокрема, в нормативному документі [23] рекомендовано ДОР будувати в координатах  $K_r - S_r$ .



Параметри  $K_r$  і  $S_r$  – комплексні і включають характеристики напружено-деформованого стану, форми і розміри дефектів, а також властивості матеріалу, що визначають опір матеріалу відповідно крихкому та в'язкому руйнуванню

$$K_1 = K_1^H + K_1^{res}, \quad (4)$$

де  $K_1^H$  визначається зовнішнім навантаженням, а  $K_1^{res}$  – залишковими напруженнями.

Тоді, відповідно:

$$K_r = K_r^H + K_r^{res}. \quad (5)$$

Згідно настанови [ 24 ] залежно від значень коефіцієнта запасу міцності гострокінцеві дефекти віднесено до трьох умовних категорій: незначний, помірний, значний, і критичний.

Розроблені алгоритм і програма для оцінки коефіцієнта запасу міцності ділянок трубопроводу з дефектами з врахуванням зміни параметрів тріщиностійкості ударної в'язкості (KCV) і коефіцієнта інтенсивності напружень ( $K_{1c}$ ) металу труб. Визначені допустимі розміри тріщиноподібних дефектів і максимальний тиск газу, за яких експлуатація МТ буде безпечною.

**Висновки.** Аналізуючи вище викладене, можна зробити такі висновки:

1. На основі проведених досліджень зруйнованого зварного шва у шурфі і металографічних робіт у лабораторії встановлено, що стикове з'єднання було виконано з грубими порушеннями технології зварювання з непроваром у корені шва. Тріщина довжиною 520 мм утворилась значно раніше від моменту аварії, розгерметизація якої відбулася при тиску  $P=4.4$  МПа.

2. Результати експериментальних досліджень засвідчили, що існує певна закономірність між твердістю тіла труби, визначеною переносними твердомірами у трасових умовах і їх границею міцності і границею плинності. Отримані результати логічно узгоджуються з результатами інших авторів [ 8 ] і нормативними документами [ 11 ].

3. Оцінку НДС ділянок тривало експлуатованих МТ, що пролягають на горбистій місцевості необхідно проводити з урахуванням деградації металу труб, сумарних навантажень і впливів: з урахуванням залишкових напружень у зоні зварних швів і додаткових напружень пружного згину трубопроводу з використанням методу скінченних елементів і двокритеріального підходу оцінки руйнування для гострокінцевих дефектів..

4. На основі аналізу проблем тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів і проведених експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано методичні засади удосконаленого експрес методу оцінки роботоздатності потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів.

### Література

1. Айнбіндер А.Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость [Текст] / А. Б. Айнбіндер // – М.: Недра, 1991. – 287 с.
2. Орыняк И.В. Оценка предельного давления трубы с вмятиной / И.В. Орыняк, Л.С. Шлапак // Проблемы прочности. – 2001. – № 5. – С. 101 – 110.
3. Дарчук О. І. Розрахункова схема трубопроводу підсиленого бандажем. / О. І. Дарчук, Й. Й. Лучко, В. А. Зозуляк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів: Каменяр, 1998. – Вип. 3. – С. 584-593.
4. Kuchma A. Estimation of work capacity of pipelines on the bases of results of semimodel testing / A. Kuchma, J. Luchko // Scientific journal of the Ternopil national technical university. – 2018. – №2. (90) – Р. 39-49.
5. Визначення величини розкриття вершини тріщини у пружнопластичних тілах / В. В. Панасюк, О. Є. Андрейків, М. М. Стадник, І. В. Дідух // Физ.-хим. механика материалов. – 1990. – № 6. – С. 53-61.
6. Білобран Б. С. Розрахунок однопрогонового балкового трубопроводу з , допомогою чисельних методів/ Б.С. Білобран, Й.Й. Лучко // Механіка і фізика та руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Львів: Каменяр, 2002. – Вип. 5 – С. 12-20.
7. Білобран Б. С. Особливості роботи надземних переходів магістральних нафтопроводів у гірських умовах / Б.С. Білобран, Й.Й. Лучко, Р.В. Климончук // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Львів: Каменяр, 2002. – Вип..543 С.443-454.
8. Андрусак А.В. Оцінювання межі текучості та тимчасового опору трубної сталі «Ц» за твердістю за Брінелем. / А.В. Андрусак, Б.С. Білобран // Матеріали 11-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів механіків у Львові, 25-27 травня 2011 р.-Львів : КІНПАТРІ ЛТД.-2011.- С.269-271

9. Лобанов Л.М. Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коэрцитивную силу металла кислородных баллонов / Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.А. Костин [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 4. – 2011. – С. 14 – 23.
10. Імбірочич Н.Ю. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів: навч.посібник / Н.Ю. Імбірочич, В.І. Швабюк // – Луцьк: Вежа-Друк, 2015.– 340 с.
11. СОУ 60.3-30019801-007:2004. Стандарт організації України: Магістральні газопроводи. Неруйнівний контроль при капітальному ремонті.– К.: ДК «Укртрансгаз», 2004. – 54 с.
12. Enrique Acuna C. Minimising threats and maximising safety: an integrity management system // Pipelines International.- Issue 34. - 2017. – P. 38 – 40.
13. Alexander Chris, Evaluating damage to on – and offshore pipelines using data acquired using ILL. // Journal of pipeline engineering.-Vol.8, №1 First Quarter.- 2009.- P. 35-46.
14. Банахевич Ю. В. Залишковий ресурс труб нафтопроводів з тріщинами і оптимізація параметрів їх експлуатації / Ю.В. Банахевич, О.С. Андрейків, М.Б. Кіт // У кн.: Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. – Львів, 2009. – С. 853–858.
15. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під 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, З.В. Слободян, Р.М. Джала. Під ред. Г.М. Никифорчина. – Львів: «Сполом», 2009. – 504 с.
16. СНиП-2.05.06-85. Строительные нормы и правила: Нормы проектирования магистральных трубопроводов. – М.: Стройиздат, 1985. – 62 с.
17. Обыденный А.А., Андреев А.А., Билобран Б.С., Слюсаренко М.И. Проверочные испытания на прочность трубопровода диаметром 1220мм при капитальном ремонте изоляции. – М.ВНИИОЭНГ, РНТС Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1983.–№8.– с, 8-10.
18. Білобран Б. С. Вплив внутрішнього тиску на жорсткість тонкостінної труби під час згину з розтягом (стиском) за границею пропорційності / Б. С. Білобран, О. Б. Кінаш // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. - Львів: Каменяр, – 2000. – Вип.4. – С. 553-560.
19. Білобран Б. С. Пружно-пластичний стан тонкостінної труби при згині з розтягом (стиском)/ Б. С. Білобран, О. Б. Кінаш // Науково-технічний журнал «Проблеми міцності», 1998.– №6. – С. 99-106.
20. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка: ВСН 006-89 – М.: Миннефтегазстрой. 1989.- 216 с.
21. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.-М.: Издательство стандартов, 1978.- 14 с.
22. Осадчук В. А. Оцінка допустимості дефектів типу кільцевих тріщин в зоні зварних монтажних швів магістральних трубопроводів / В.А. Осадчук, Ю.В. Банахевич // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2010. – 53, № 2. – С. 37 – 45.
23. API 579. Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579, First Edition, American Petroleum Institute. – 2000. – 625 p.
24. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. ДСТУ–НБВ.2.3–:2008. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 88 с.