

УДК 622.276.06

DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14493

*I. О. МАКАРЕНКО¹, I. О. КУЛЬЧІЙ², Н. Г. ЦАРУК³, Д. I. ЧЕБОТАР⁴*¹*Чернігівський інститут ім. Героїв Крут Міжрегіональної Академії Управління Персоналом, м. Чернігів*²*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава*³*ВП НУБіПУ «Ніжинський агротехнічний Інститут», м. Ніжин*⁴*Приватне підприємство «МЕТКОН», м. Київ*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ БЕЗАВАРІЙНИХ РОБІТ НА ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

В процесі досліджень було встановлено, що задача виконання безаварійних робіт на газорозподільних мережах зводиться до порівняння витрат на засоби резервування в системах газопостачання з витратами на резерви в галузях, споживаючих газ. Із підвищенням надійності газопостачання витрати на резерви газопостачальних систем збільшуються, а витрати на резерви в галузях, споживаючих газ, зменшуються. Мінімум сумарних витрат на засоби резервування дає економічно виправданий рівень надійності газоспоживання. Цей метод дозволяє у багатьох випадках уникнути недоліків першого шляху і забезпечує більш детерміновані результати. Метод обліку резервів у галузях, споживаючих газ, ефективний там, де ці резерви є або можуть бути забезпечені, наприклад, в нових системах газоспоживання або на повторно газифікуємих підприємствах. Між тим, багато років газифікація міст, промислових підприємств, котельних і інших систем розвивалася в умовах практично повного забезпечення газом, коли в організації резервного паливопостачання не було необхідності. Тому в багатьох споживачів газу передбачити резервне паливопостачання неможливо або це зв'язано з великими труднощами (переробка генплану підприємства, розширення території, знос близько розміщених будівель, перенос внутрішньоплощадних комунікацій, реконструкція енергетичного господарства, спорудження нових під'їздних шляхів, облаштування додаткових пристроїв по очистці газів, що виходять тощо. При цьому витрати на створення таких резервів можуть досягати великих розмірів, і тоді забезпечення надійності паливопостачання буде проходити виключно за рахунок резервів у системі газопостачання (зокрема, в газорозподільній системі). В роботі наведені відомості про техніко-економічний метод визначення оптимального рівня безаварійних робіт газорозподільних систем.

Ключові слова: *метод, газ, надійність, корозія, ресурс.*

Аналіз літератури. Із робіт [1-5; 7; 8] випливає, що запропоновані методи визначення оптимального рівня забезпечення безаварійної роботи газорозподільчих систем пов'язані з побудовою цільової функції. Згідно загальному правилу, ця функція в даному випадку повинна відображати взаємодію двох різноспрямованих тенденцій: збільшення вартості системи з підвищенням її надійності і зменшення розмірів шкоди у споживачів від перебоїв газопостачання за рахунок зменшення випуску продукції, погіршення її якості тощо. Склад цільової функції, де всі вказані компоненти, в свою чергу, є функцією надійності системи, про диференціювавши її визначення і прирівнявши нулю, можна отримати шуканий оптимальний рівень.

Не дивлячись на зовнішню простоту описаного способу, реалізація його зв'язана з великими труднощами, в першу чергу, в частині визначення розмірів

шкоди. Ці труднощі, загальні для усіх енергетичних систем, перш за все, зв'язані з математичним моделюванням [9; 10]. Концепція, яка покладена в основу запропонованого нового техніко-економічного методу визначення оптимального рівня безаварійних робіт в системі газопостачання, полягає в наступному.

1. Показник шкоди не може бути визначений більш-менш точно для усіх опалювально-вентиляційних споживачів, побутових потреб населення, пасажирського транспорту.

2. Розмір шкоди у промислових споживачів, як правило, суттєво залежить від величини і тривалості аварійного не до постачання енергетичної продукції, а також від можливості передчасного попередження споживачів про такі випадки. Отже, шкода від переривів у подачі енергії або палива є нелінійною функцією (а також дискретною або рівною нулю в певному інтервалі недопоставки газу) від часу цих переривів, причому ця не лінійність може бути вельми значною.

3. Має місце ряд невизначеностей в трактовці поняття «шкода», причинами якої можуть бути:

- недопоставка виробленої продукції;
- псування сировини, обладнання, напівфабрикатів, готової продукції;
- шкода від неповного використання обладнання та інше.

4. Закон розподілення ймовірностей можливих майбутніх значень заданої шкоди можна отримати тільки на основі надійних масових узагальнень стосовно до конкретних споживачів, досвіду минулого і обґрунтованій екстраполяції на майбутнє. Заміна відсутніх точних даних окремими випадковими значеннями заподіяної шкоди неминуче дасть тільки випадкові результати реалізації методів забезпечення безаварійної роботи.

5. Відсутня повнота інформації про ймовірних відмов окремих елементів системи, і, крім того, швидко старіюча наявна інформація.

6. Локальна оцінка шкоди на даному підприємстві, без урахування господарських і інших зв'язків з другими підприємствами, може виявитися недоказаною.

Постановка задачі. Вірогідне визначення шкоди може бути отримано на основі аналізу багатокомпонентної динамічної моделі з багаточисленими прямими і зворотними зв'язками, причому ціною суттєвих спрощень і припущень. Крім того, це рішення може мати тільки ймовірностно-невизначений характер, що витікає із того, що і шкоди, і визиваючи їх відмови є випадковими подіями, причому закони і числові характеристики їх відомі далеко не завжди. Це значить, що функція $Y = Y_1(H)$, яка зв'язує шкоду і надійність, може мати в принципі любий вид ($Y = Y_1(H)$, $Y = Y_2(H)$ тощо), що потягне за собою зміну цільової функції ($\Phi = \Phi_1(H)$, $\Phi = \Phi_2(H)$ і т. д.) і витікаючи звідси коливання оптимального значення надійності всередині деякого важко передбачуваного інтервалу. Вибір шуканого значення H_0 може суттєво вплинути на прийняті інженерні рішення по його забезпеченню (конструкція системи, розмір резервів тощо).

Із всього сказаного стає зрозумілим сумнівне відношення до можливості використання значень шкоди для оптимізації надійності. Тому в ряді робіт розвинута ідея заміни в цільовій функції залежності $Y = Y(H)$ на принципіальне інше $P = P(H)$, яка характеризує витрати на організацію резервного паливопостачання (мазут, вугілля, торф тощо). При цьому потрібно мати на увазі, що підвищення надійності газопостачання дозволяє знизити розміри резервів у споживачів газу і навпаки.

Метою роботи є розробка і обґрунтування методу визначення оптимального рівня безаварійних робіт в системі газопостачання споживачів.

Результати дослідження та їх обговорення. В процесі досліджень було встановлено, що задача зводиться до порівняння витрат на засоби резервування в системах газопостачання з витратами на резерви в галузях, споживаючих газ. Із підвищенням надійності газопостачання витрати на резерви газопостачальних систем збільшуються, а витрати на резерви в галузях, споживаючих газ, зменшуються. Мінімум сумарних витрат на засоби резервування дає економічно виправданий рівень надійності газоспоживання. Цей метод дозволяє у багатьох випадках уникнути недоліків і забезпечує більш детерміновані результати. Однак в ряді випадків й тут виникають проблеми, які важко подолати. Метод обліку резервів у галузях, споживаючих газ, ефективний там, де ці резерви є або можуть бути забезпечені, наприклад, в нових системах газоспоживання або на повторно газифікованих підприємствах. Між тим, багато років газифікація міст, промислових підприємств, котельних, розвивалася в умовах практично повного забезпечення газом, коли в організації резервного паливопостачання не було необхідності. Тому в багатьох споживачів газу передбачити резервне паливопостачання неможливо або це зв'язано з великими труднощами (переробка генплану підприємства, розширення території, знос близько розміщених будівель, перенос комунікацій, реконструкція енергетичного господарства, спорудження нових під'їздних шляхів, облаштування додаткових пристроїв по очистці газів, що виходять тощо. При цьому витрати на створення таких резервів можуть досягати великих розмірів, і тоді забезпечення надійності паливопостачання буде проходити виключно за рахунок резервів у системі газопостачання (зокрема, в газорозподільній системі).

Далі виникає питання: чи повинен всім споживачам встановлюватися однаковий рівень надійності паливопостачання або цей рівень слід диференціювати? Коли рівень виявиться єдиним, то надійність газопостачання буде визначатися умовами організації резервного паливопостачання. У випадках, коли організувати резервне паливопостачання неможливо, надійність газопостачання повинна бути максимальною (без врахування народногосподарської і соціальної оцінки діяльності цього підприємства). Коли ж шуканий рівень слід диференціювати, то що покласти в основу цієї диференціації? І тут ми неминуче повернемося до експертних або вартісних оцінок ефективності газопостачання.

Аналіз особливостей визначення безаварійної роботи газорозподільних мереж низького тиску. Методи визначення і оцінки безаварійної роботи газорозподільних мереж низького тиску різняться від розглянутих вище, так як до мереж підключаються житлові будинки, комунально-побутові, дитячі, навчальні і лікувальні установи, а також обслуговуючі їх невеликі котельні, для яких характерні наступні особливості:

1. Більшість вказаних споживачів знаходиться поза сферою товарного виробництва. Тому поняття «шкода», «собівартість», «ефективність» в строгому розумінні цих термінів застосовувати тут не можна. Так же можна сказати щодо окупності. Стосовно описаних в літературі [1-3, 7] спробах штучно визначити шкоду комунально-побутових споживачів від перерв в поставках слід відноситися в достатній мірі критично (див, наприклад, [10,11]).

2. Головне значення газопостачання цих споживачів полягає в забезпеченні соціального ефекту, вартісна оцінка якого навряд чи можлива.

3. Підвищення надійності паливопостачання цих споживачів за рахунок резервних видів палива недопустимо або небажано, оскільки використання твердого або рідкого палива в житлових будинках і комунально-побутових установах пов'язано із збільшенням пожежної небезпеки (зберігання дров, вугілля, керосину тощо) і не забезпечує всіх потреб абонентів, головним чином, в частині гарячого водопостачання. Переобладнання на резервне паливо котельних, підключених до мереж низького тиску, приводить до забруднення атмосферних басейнів територій і другим небажаним наслідкам. Отже, застосувати техніко-економічні методи для визначення оптимального варіанту забезпечення безаварійної роботи газорозподільних мереж низького тиску без суттєвих обмежень неможливо.

Більш перспективним представляється використання нормативного значення рівня надійності. Таке значення можна прийняти на основі рекомендацій, приведених в роботі [10]: при проектуванні крупних міських газорозподільних систем слід забезпечити їх надійність, рівну 0,999, а для малих міст і селищ – 0,99-0,95. Ці показники, мабуть, отримані, виходячи з наступних міркувань. Встановлено, що необхідну надійність магістральних газопроводів можна допустити шляхом ієрархічної підпорядкованості розподільних мереж по відношенню до магістральних газопроводів, при цьому можна допустити зниження надійності перших на 1-2 порядки. Коли продовжити ці розмірковування стосовно до ієрархії самих газорозподільних мереж (високий, середній, низький тиск), то логічно прийняти рівень надійності мереж низького тиску, рівний приблизно 0,99–0,9.

Населення і комунально-побутові об'єкти складають групу споживачів, забезпечення газом яких слід здійснювати безперебійно і, по можливості, в необхідному обсязі протягом круглого року. Обмеження в поставках можуть торкнутися їх в останню чергу, коли усі резерви системи вже вичерпані. Тому зовнішні відмови не представляють тут практичної загрози. Отже, надійність мереж низького тиску ϵ , в основному, функцією внутрішніх відмов. До порушень діяльності газорозподільних систем низького тиску можуть призвести відмови газових мереж, газорозподільних пунктів (ГРП), арматури, встановленої в колодязях.

Найбільший інтерес представляє надійність газорозподільних мереж. Це пояснюється тим, що їх ремонтпридатність набагато нижче, чим у ГРП і арматури, де все обладнання відкрито для оглядів, ревізій і профілактичних ремонтів. Виявлення несправного елемента тут не представляє труднощів, особливо в телемеханізованих ГРП. Крім того, відмова ГРП в переважній більшості випадків не представляє безпеки для життя людей. При відмовах мережею виникає небезпека насичення газом житлових будинків і інших споруд. Багаточисленними спостереженнями встановлено, що відмови на підземних мережах зустрічаються рідко. Це пояснюється їх природньою захищеністю шаром ґрунту, сучасним рівнем будівництва і експлуатації, застосовуваними мірами щодо захисту від корозії і тощо, а також відносно простотою конструкції, відсутністю рухомих деталей і фізико-хімічними властивостями середовища, що транспортується. Тому ймовірність виникнення відмов характеризується законом рідких подій Пуасона. На користь цього свідчать як формальні ознаки (мала ймовірність при великому об'ємі вибірки), так і експериментальна перевірка, яка полягає у встановленні співпадіння прогнозованої фактичної кількості суток на рік з різним числом відмов на 440 обстежених кілометрів газопроводів середнього тиску [5].

Ймовірність безвідмовної роботи в цьому випадку визначиться за формулою

$$P=e^{-\omega t}, \quad (1)$$

де ω – параметр потоку відмов, l – довжина газопроводу, t – час.

Розкладаючи експоненціальну функцію (1) в ряд і обмежуючись першими двома членами, отримуємо

$$P = l - \omega l. \quad (2)$$

Виникає питання, від чого залежить параметр потоку відмов у формулі (1).

Відомо, що надійність транспортних мереж може підвищуватися за рахунок збільшення надійності окремих її елементів (ділянок) або за рахунок конструкції самої мережі. Останній захід обмежується застосуванням кільцевих мереж того або іншого виду, оскільки паралельна прокладка газопроводів і організація дублюючих підводів в умовах сучасних міст, для яких характерна насиченість підземними комунікаціями, практично виключена.

Що стосується надійності самих ділянок мережі (однакової довжини), то тут має місце дві точки зору:

1 – параметр потоку відмов не залежить від діаметра ділянки ($\omega = const$) і надійність в даному випадку буде визначатися тільки схемою самої мережі і не буде залежати від діаметра ділянок[9];

2 – параметр потоку відмов залежить від діаметра ділянки – $\omega = f(D)$, а надійність мережі залежить як від конструкції мережі, так і від набору діаметрів ділянок, представлених у них.

Від того, яка із цих точок зору правильна, залежить багато рішень, які приймаються при проектуванні газорозподільних мереж.

Не дивлячись на наявність певного статистичного матеріалу щодо відмов газопроводів, не можна вважати, що експериментально доказана та або інша точка зору. Збір і аналіз даних про пошкодження газових мереж супроводжуються значними труднощами, і в цьому напрямку перед дослідницькими, проектними і експлуатаційними організаціями стоїть велика робота. Тому розглянемо, наскільки переконлива аргументація на захист стверджень про залежності або незалежності ω від діаметра газопроводу. Не викликає сумнівів, що рішення поставленої задачі може бути отримано тільки на основі аналізу причин відмов газопроводів.

Згідно даним, надрукованим в спеціальній літературі [6; 8; 9], відмови газопроводів виникають при порушенні їх герметичності по наступним причинам:

1) механічні ушкодження при виробництві різних дорожніх, будівельних або земляних робіт (розкопка траншей, планування місцевості, розчистка території, пересічення трас газопроводів при прокладці других підземних комунікацій тощо);

2) корозійні ушкодження;

3) ушкодження стиків із-за температурних напружень;

4) ушкодження із-за оповзнів, просадки ґрунтів, сейсмічних явищ тощо.

Абсолютна маса відмов визначається двома першими групами причин. Легко переконатися, що механічним ушкодженням і корозії, в першу чергу, в значній мірі схильні газопроводи з меншою товщиною стінки, а отже, і меншого діаметра.

Кореляційний зв'язок між цими величинами для сортаменту розподільчих газопроводів 57×3, 70×3, 89×3, 108×4, 133×4, 159×4,5, 168×5, 219×6, 273×7, 325×7, 377×8, 426×9 має вигляд $D_{cp} \cdot \delta = 0.1088D_{вн}^{1.56}$, де D_{cp} і $D_{вн}$ – середній і внутрішній діаметри труби, δ – товщина стінки труби.

Коли прийняти, що середній і внутрішній діаметри приблизно рівні, то $\delta \approx 0.11D_{cp}^{1.56}$.

Із роботи [9] випливає, що найбільша кількість витоків газу припадає на ці ділянки або вузли газопроводів, які є самими слабкими, неміцними, менш захищеними від зовнішнього впливу, а також побудованими із труб невеликого діаметра. Той факт, що товстостінні труби великого діаметра менш схильні механічним ушкодженням ймовірний. Крім більш високої механічної міцності газопроводи великих діаметрів звичайно розміщені близько до ГРП, де контроль за проведенням будівельних і інших робіт здійснюється більш ретельно.

Відмова газопроводу внаслідок корозії настає, коли глибина каверни становиться рівною товщині стінки труби. Коли врахувати аперіодичний характер наростання глибини каверни з часом, то не викликає сумнівів, що газопроводи з великою товщиною стінки (великого діаметра) будуть мати велике напрацювання на відмову. Так, із збільшенням товщини стінки з δ_1 до δ_2 напрацювання на відмову збільшується з t_1 до t_2 . Причому збільшення напрацювання з деякого часу стає нелінійним по відношенню до зміни товщини, тобто напрацювання буде зростати швидше, ніж товщина стінки.

Більше того, відповідно роботі [8], для кожної конкретної обстановки існує встановлена глибина каверни. Коли вона менше, ніж товщина стінки, наскрізний отвір і втрати трубою герметичності можуть взагалі не виникнути. Власне кажучи, проти зв'язку w і діаметра газопроводу не суперечать прихильники першої точки зору. Наприклад, наведена в роботі [8] залежність питоме корозійне пошкодження газопроводу від його діаметра відповідає на поставлене питання повністю. Але механічні ушкодження виникають при неправильному або недбайливому виконанні будівельно-монтажних робіт близько до газопроводів, їх кількість із року в рік зменшується і вони можуть бути усунуті покращенням роботи служби нагляду; тому механічні ушкодження не слід розглядати як відмови елементів газових мереж. І ще, при виявленні отворів в газопроводі його тимчасово заварюють або накладають на трубу бандаж. Капітальний ремонт проводять в плановому порядку. Отже, при ефективному захисті газопроводів від корозії і правильній організації ремонтних робіт можна виключити відмови ділянок із-за корозійних ушкоджень. В подальшому корозійні ушкодження не будуть враховуватися при визначенні інтенсивності відмов газопроводів.

Заради об'єктивності слід відмітити, що є ще одна точка зору, згідно якої інтенсивність відмов визначається за формулою $\gamma = \frac{aDl}{\Delta}$, де Δ – товщина стінки трубопроводу, a – невідомий коефіцієнт якості прокладки, який залежить від сукупності закономірних, передбачуваних факторів.

Труби – головний конструктивний елемент любых трубопроводів. Їх якість, властивості металу і зварювальних з'єднань в значній мірі визначають можливі відмови, зупинки і аварії на газонафтопроводах, а також розміри і наслідки відмов і аварій. Тому необхідно знати вимоги до сталі і зварювальних з'єднань труб в залежності від робочих параметрів трубопроводів з метою попередження їх руйнування. Специфіка роботи газонафтопроводів обумовлена принципово відмінними вимогами до сталі труб великого діаметру на високий робочий тиск в порівнянні з любыми іншими сталевими конструкціями.

Особливу складність і найбільшу практичну цінність представляють дані про природу і механізм гальмування протяжних в'язких розривів. Фізична суть таких руйнувань полягає в наступному. При розриві трубопроводу стиснутий газ спрямовується в утворену не суцільність (тріщину), при цьому прагне розвернути трубу в лист, при цьому сприяє руйнуванню її крайки з високими швидкостями

ми. Одночасно унаслідок декомпресії газу з трубопроводу, по мірі розповсюдження руйнування, відбувається зниження тиску, діючого на борти труб у верхині утвореної тріщини. Дія цих двох факторів і властивості металу труб визначають характер і масштаби руйнування. Особливістю в'язкого руйнування газопроводів є утворення широкої зони пластично деформованого матеріалу уздовж крайки розриву. Отже, розповсюдженню швидкісного протяжного в'язкого руйнування в трубі чинить опір великий об'єм металу, працюючого в пружно-пластичній області. Відомо, що фізична сутність опору сталі труб в'язкому руйнуванню визначається міцністю її на розрив при швидкісному навантаженні і об'ємом деформованого металу в зоні розриву. Однак відсутність швидкісних випробувальних машин із швидкостями навантаження 100-300 м/с досі перешкоджає фізично правильному визначенню опірності сталі труб газопроводу руйнуванню, внаслідок чого приходиться користуватися наближеним побічним методом оцінки властивості сталі на зразках, які випробуються на ударний згин, або проводити контрольні дорого вартісні випробування повно розмірних труб до руйнування, включаючи випробування секцій труб повітрям чи газом. В процесі проектування і спорудження трубопроводів необхідно детально розглядати питання опору металу труб і зварювальних з'єднань руйнуванню в умовах експлуатації нафтогазопроводів.

Складність обліку роботи нафтопроводів при циклічному навантаженні складається в тому, що опірності металу труб і зварювальних з'єднань оцінюють по результатах випробувань зразків на осьове розтягування, в той же час як метал в трубопроводах працює в умовах двовісного напруженого стану при наявності конструктивних і технологічних концентраторів, що може істотно знизити циклічну міцність трубопроводу. Тому важливо, нарівні з правильним вибором труб, прийняти при проектуванні міри по зменшенню амплітуди коливань і крутизни хвиль тиску, виникаючих при повній зупинці насосних станцій. Практика експлуатації нафтопроводів свідчить, що циклічні навантаження, спричинені динамічним (турбулентним) процесом перекачки, в окремих випадках приводять до утворення втомних тріщин в концентраторах, які викликають руйнування трубопроводів.

Відомо [2], що існуючі гідравлічні методи випробування під високим тиском, які викликають в нижніх точках трубопроводів кільцеві напруження, рівні номінальній межі текучості металу труб чи декілька вище її, дозволяють достатньо повно виявити дефектні ділянки трубопроводів і тим самим забезпечити надійну і практично безвідмовну експлуатацію спорудження.

Вважається, що трубопровідний транспорт є одним із самих економічних способів передачі рідких і газоподібних продуктів на дальні відстані з мінімальними втратами продукту в процесі поставки його споживачам. Сучасні магістральні трубопроводи – виключно протяжні металеві спорудження, довжина яких перевищує тисячі кілометрів.

Відомо [3; 4], що руйнування магістральних газонафтопроводів занадто небезпечні. Зона враження навколишнього середовища від осередку руйнування складає від декількох сот метрів до декількох кілометрів. Особлива небезпека при руйнуваннях пов'язана з можливістю загазованості територій і населених пунктів, утворення вибухонебезпечної суміші газу і повітря, загоранням транспортуємих продуктів, їх можливим попаданням в крупні водойми. Відомо [2,3], наприклад, що тільки 1 т розлитої нафти створює на поверхні водойм масляну

плівку площею 18 км². В таких випадках відновлення екологічної рівноваги вимагає проведення цілого комплексу рекультиваційних робіт, що пов'язано з великими матеріальними витратами.

Умови роботи металу труб в газонафтопроводах високого тиску специфічні, різко відрізняються від умов роботи металу в інших металевих конструкціях, що обумовлено наступними факторами.

1. Експлуатація металу труб одного і того ж трубопроводу внаслідок його великої протяжності здійснюється в різко відмінних природно-кліматичних умовах – від мінусових температур в північних регіонах країни до плюсових в південних. Цими ж умовами визначається широкий діапазон типів і механічних характеристик ґрунтів, в яких прокладений трубопровід; можливість виникнення в металі труб пластичних деформацій при перетину різноманітних природних перешкод – водних перешкод, боліт, гір, озер тощо.

В підземних газопроводах метал працює при температурі ґрунту. Затиснення труб діаметром до 1020 мм ґрунтом здійснюється на ділянці довжиною декілька десятків метрів. Як показали результати експериментальних вимірювань пружних осьових переміщень і напружень, знятих при розрізання аварійного підземного газопроводу діаметром 425 мм, затиснення труб ґрунтом здійснюється на довжині 25-50 м. Переміщення кінців труб в місці розрізу досягали ≈ 29 мм, а поздовжні напруження ≈ 200 МПа. В газопроводах діаметром 1020 мм і більше затиснення трубопроводу ґрунтом не завжди буває достатнім; температурний режим і величина поздовжніх деформацій в значній мірі визначаються умовами роботи апаратів повітряного охолодження (АПО) і їх кількістю. При відсутності АПО температура трубопроводу може зростати по його довжині, так як ґрунт вже не здатний відбирати тепло, отримане газом при транспортуванні з високим тиском. Тому забезпечення затиску потужних газопроводів в ґрунтах, попередження їх підйому або вигинання в болотистих і обводнених місцях є складною технічною задачею, яку не завжди можна надійно вирішити, внаслідок чого стійкість трубопроводу не завжди буває надійно забезпечена.

2. В залежності від природно-кліматичних умов метал труб працює в широкому діапазоні температур – від 30...40°C в літній період до -15...-20°C в зимній, а в північних кліматичних зонах на ділянках надземної прокладки мінімальна температура експлуатації може бути значно нижча. Будівельно-монтажні роботи на трубопроводах виконуються в деяких випадках тільки зимою при температурі до -40°C.

3. Метал труб протягом амортизаційного циклу (більше 30 років) практично постійно працює в умовах двохвісного напруженого стану з різним, залежним від багатьох факторів, відношенням напружень в кільцевому й поздовжньому напрямках. Крім того, метал нафтопроводів піддається малоцикловим навантаженням, які в окремих випадках можуть спричинити напруження, які досягають межі текучості.

Вплив схеми напруженого стану трубопроводів на пластичні властивості металу труб наглядно прослідковується по зміні відносного подовження. Так, коли на плоских зразках при одновісному розтягуванні подовження складає 20-30%, то в умовах плоского напруженого стану при гідравлічних випробуваннях до руйнування повнорозмірних труб пластичне подовження периметра досягає тільки 3-7%, а в трубах з високов'язких пластичних сталей контрольованої прокатки – 8-12%.

4. В металі трубопроводів, як правило, неминуча наявність концентраторів – задирів, подряпин, орієнтованих уздовж утворюючої труби. Вони можуть бути заводського, транспортного і будівельного походження. Дія концентраторів напружень посилюється в місцях відхилення труби циліндричної форми із-за овальності перерізів і наявності вм'ятин.

Експериментальні дослідження дозволили встановити зміну кільцевих деформацій зовнішньої поверхні від внутрішнього тиску в трубах з різною овальністю (в перерізі по малій осі овала). Зокрема, по мірі зменшення овальності, за рахунок збільшення внутрішнього тиску, значення деформацій у вказаному перерізі росте тим швидше, чим більше овальність у вихідному стані. При тиску 1 МПа локальні деформації можуть досягати значень, відповідних межі текучості, при більш-менш низькому значенні середніх напружень в металі труби. Максимальне значення локальної деформації складає близько 0.6% за тиску 5.5 МПа, потім приріст деформацій закінчується, що відповідає моменту прийняття трубою циліндричної форми.

Найбільш небезпечним для роботи труб є сполучення в одному перерізі вм'ятини і задирів або наявність задирів на малій осі овального перерізу труб. Аналіз обставин багатьох руйнувань труб на трасі показує, що переважне число руйнувань відбувалося по верхній чи нижній твірній, тобто по малому діаметру овального перерізу труб, укладених в ґрунті, оскільки тільки так орієнтовано переріз труб газопроводу, укладеного в траншею і засипаного ґрунтом.

5. Газопроводи акумулюють велику кількість пружної енергії стиснутого газу, внаслідок чого у них можуть виникати протяжні в'язкі і крихкі руйнування, які відбуваються в умовах високих динамічних навантажень. При високій енергоємності процесу руйнування і швидкості навантаження можлива зміна характеристик металу труб.

6. Велика енергетична потужність магістральних трубопроводів, які забезпечують сировиною чи енергією крупні підприємства і цілі промислові райони, вимагають стабільної поставки продуктів споживачу. Метал газонафтопроводів практично неможливо піддати профілактичному огляду і провести попереджувальний ремонт. Можливий тільки капітальний ремонт трубопроводів із зупинкою їх на довготривалий термін в обставинах, які виправдовують таку зупинку. Все це обумовлює необхідність прийняття широкого комплексу заходів з метою попередження руйнувань трубопроводів, а у випадку виникнення – їх максимальної локалізації, забезпечення безпеки близько розташованих об'єктів і обслуговуючого персоналу, створення умов для швидкого виконання ремонтно-відновлювальних робіт. Тому, не дивлячись на уявну простоту конструкції і розрахункової схеми, трубопровід є складним, дорого вартісним, виключно металоемним і відповідальним спорудженням. Цим пояснюється велика увага, яка приділяється розробці питань експлуатаційної надійності магістральних трубопроводів як у нашій країні, так і в інших країнах світу.

Міцність магістрального трубопроводу, його експлуатаційна надійність визначається, в першу чергу, силовими факторами, властивостями і якістю труб. Для магістральних трубопроводів основними навантаженнями є: внутрішній тиск і поздовжні зусилля, спричинені температурним перепадом в лінійній частині трубопроводу унаслідок різниці температурних умов будівництва і експлуатації. Норми і правила розрахунку, необхідні формули і значення коефіцієнтів приймаються відповідно БНІП 2.05.06-85.

Достатньо точному розрахунку піддаються тільки кільцеві напруження, а поздовжні напруження і стійкість трубопроводу визначаються не тільки впливом температури, але і умовами взаємодії трубопроводу з ґрунтом. Наявні руйнування трубопроводів не були пов'язані з недостатнім запасом міцності, тобто не викликані перевищенням діючих кільцевих напружень над розрахунковими. Більшість руйнувань була обумовлена недостатнім опором сталі труб зародженню тріщин, втратою поздовжньої стійкості при температурних діях, поперечним зломом труб при просіданні ґрунту, корозійними пошкодженнями, відхиленням дійсних умов навантаження від розрахункових в конструкціях підводних переходів в умовах весінних паводків.

Тому експлуатаційну надійність трубопроводів забезпечують шляхом попередження руйнувань. Так, руйнування, які пов'язані з недостатнім опором зародженню і розповсюдженню тріщин, попереджають металургійними методами – підвищенням механічних властивостей, якості сталі і зварювальних з'єднань труб, а руйнування, пов'язані з втратою місцевої чи загальної стійкості трубопроводів, – удосконаленням методів розрахунку і проектування, а також підвищенням якості виконання будівельно-монтажних робіт; крім того, розробляються і удосконалюються заходи протикорозійного захисту.

Починаючи з 1990 років, в зв'язку з використанням холодостійких труб, стало можливим підвищувати робочий тиск у газопроводах до 7.5-8.8 МПа, а також знижувати температуру прокачування газу до -25°C без збільшення максимального діаметру використаних труб. З технологічних міркувань і для підвищення пропускної здатності газопроводів, стали використовувати апарати повітряного охолодження (АПО). При цьому було почато виробництво унікальних холодильних установок для газових промислів. Переміщення місць добування газу у віддалені північні райони Сибіру, наявність холодильних установок для газопроводів обумовило щорічне зростання потреби в сталях, труби з яких здатні працювати при температурах $-5\dots-15^{\circ}\text{C}$, з можливим зниженням температури експлуатації до -25°C .

Коли властивості труб не дозволяють знижувати температуру газу до -5°C в середній кліматичній полосі і до -15°C в північній, то це потребує відключення АПО при температурі повітря зимою нижче відповідно -15 і -25°C , які у вказаних кліматичних зонах спостерігаються на протязі 2-4 місяців на рік. Наявність труб з холодостійких сталей дозволяє за рахунок більш повного використання природного холоду додатково, без капітальних вкладень в будівництво, перекачувати до 1 млрд m^3 газу на рік по кожному газопроводу діаметром 1020 мм.

Слід відмітити, що в даній роботі автори не розглядали вибір сталі і труб для трубопроводів, транспортуючих кислі гази – тобто гази, які утримують в своєму складі сірководень і вуглекислоту, а також корозійно-активні сірчаті нафти. Це спеціальне питання і вирішується воно комплексно як шляхом зниження корозійної активності технологічного продукту (наприклад, нагнітання в свердловини чи трубопроводи інгібіторів корозії), вибору в'язких і чистих по складу сталей, так і шляхом зниження робочих напружень в металі труб з ціллю попередження чи зниження швидкості протікання корозії під напруженнями.

Однак, на думку авторів, визначення і уточнення коефіцієнта якості неможливо не стільки із-за відсутності статистики, скільки із-за неможливості урахування таких факторів, як умови і ступінь механізації будівельно-монтажних робіт, виду теплоізоляції і протикорозійного покриття, режиму зміни температури і тиску, характеристики ґрунту (pH , питомий опір, ущільненість), рівнів ґрунто-

вих вод і облаштування дренажу, топографічних особливостей траси тощо. Тому величина X принципіально не піддається розрахунку як по приведеній формулі, так і по формулах (1) і (2). Для розрахунку надійності лінійних систем необхідно використовувати умовно-ймовірнісну методіку параметричних розрахунків, яка ґрунтується на апріорних (експертних) оцінках.

Висновок

На базі проведених досліджень розроблений метод та алгоритм визначення оптимального рівня безаварійних робіт в газопостачанні, який адекватно відображає і враховує технологічні особливості транспорту газу по розподільним мережам. Зокрема, в процесі досліджень встановлено, що задача зводиться до порівняння витрат на засоби резервування в системах газопостачання з витратами на резерви в галузях, споживаючих газ. Із підвищенням надійності газопостачання витрати на резерви газопостачаючих систем збільшуються, а витрати на резерви в галузях, споживаючих газ, зменшуються. Мінімум сумарних витрат на засоби резервування дає економічно виправданий рівень надійності газоспоживання.

Список літератури

1. Костин В.И., Клопов Б.Н. и др. Качество реактивного топлива при его последовательной перекачке по нефтепродуктопроводу прямым контактированием с другими нефтепродуктами. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеродного сырья. 1984. №2. С.5-9.
2. Шарафиев Р.Г., Крюков Н.И., Кускильдин Р.А. и др. Промышленная безопасность: опыт, проблемы и перспективы эксплуатации нефтегазопроводов. Челябинск: ЦНТИ, 2005. 448 с.
3. Бычков В.Е., Данильченко И.Г., Баклагин И.М. Результаты исследований переток газа через разделители ДЗК. Транспорт и хранения нефтепродуктов и углеродного сырья. 1986. №6. С.3-6.
4. Бычков В.Е., Данильченко И.Г., Пирогов Ю.Н. Газопроводы для транспорта и хранения нефтепродуктов. Москва: Недра, 1992. 154 с.
5. Бычков В.Е., Данильченко И.Г., Баклагин И.М. Последовательная перекачка различных сортов нефтепродуктов с газовым разделителем. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеродного сырья. 1988. №4. С. 13-16.
6. Макаренко В.Д. Надежность нефтегазопромысловых систем. Челябинск: изд-во ЦНТИ, 2004. 826с.
7. Макаренко В.Д., Чаусов Н.Г., Бондарь М.Н. Безопасный ресурс технических систем. Ніжин: ООО Видавництво "Аспект-Поліграф", 2013. 388 с.
8. Макаренко В.Д., Чаусов Н.Г., Криворотько В.М. Надежность инженерных металлоконструкций. Ніжин: ООО Видавництво "Аспект-Поліграф", 2013. 392 с.
9. Березин И.В., Репинский В.С. Оперативное управление системами газоснабжения. Москва: Недра, 1985. 357 с.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2019.

Макаренко Ірина Олегівна – асистент МАУП, кандидат наук з державного управління.

Кульчій Інна Олексіївна – доцент, кандидат наук з державного управління; nafusail@gmail.com.

Чеботар Дмитро Іванович – інженер-економіст; metkon2@gmail.com.

Царук Наталія Георгіївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри "Обліку і оподаткування", ВП НУБІП України "Ніжинський агротехнічний інститут".

I. O. MAKARENKO, I. O. KULCHIY, N. G. ZARUK, D. I. CHEBOTAR

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE SUBSTANTIATION METHOD OF OPTIMAL TROUBLEPROOF WORKS ON GAS DISTRIBUTION NETWORKS

It is known that the techno-economic methods of determining the optimal level of safety-free operation of gas-distributing systems are connected with the construction of the target function. According to the general rule, this function in this case should reflect the interaction of two different trends: increasing the value of the system with increasing its reliability and reducing the size of damage to consumers from gas supply disruptions due to reduced output, deterioration of its quality, etc. The composition of the target function where all of these components, in turn, are a function of system reliability, differentiated its definition and equated to zero, one can obtain the desired optimal level. Despite the external simplicity of the described method, its implementation is associated with great difficulty, in the first place, in determining the size of the damage. These difficulties, common to all power systems, are primarily related to mathematical modeling. The concept, which is the basis of the proposed new technical and economic method for determining the optimal level of trouble-free work in the gas supply system, consists in solving the problem, which is reduced to the comparison of costs for the means of reserve in gas supply systems with the cost of reserves in the industries consuming gas. With increasing reliability of gas supply costs of gas supply systems are increasing, and the cost of reserves in industries consuming gas is decreasing. The minimum total cost of the redundancy facility provides an economically justifiable level of reliability of gas consumption. On the basis of the conducted research the technical and economic method of determining the optimal level of trouble-free works in gas supply is developed, which adequately reflects and takes into account the technological features of gas transport by the distribution networks.

Key words: method, gas, reliability, corrosion, resource

Reference

1. Kostin V.I., Klopov B.N. i dr. Kachestvo reaktivnogo topliva pri ego posledovatel'noj perekachke po nefteproduktoprovodu prjamym kontaktirovanijem s drugimi nefteproduktami. Transport i hranenie nefteproduktov i uglerodnogo syr'ja. 1984. №2. S.5-9.
2. Sharafiev R.G., Krjukov N.I., Kuskil'din R.A. i dr. Promyshlennaja bezopasnost': opyt, problemy i perspektivy jekspluatatsii neftegazoprovodov. Cheljabinsk: CNTI, 2005. 448 s.
3. Bychkov V.E., Danil'chenko I.G., Baklagin I.M. Rezul'taty issledovanij pereto-kov gaza cherez razdeliteli DZK. Transport i hranenija nefteproduktov i uglerodnogo syr'ja. 1986. №6. S.3-6.
4. Bychkov V.E., Danil'chenko I.G., Pirogov Ju.N. Gazoprovody dlja transporta i hranenija nefteproduktov. Moskva: Nedra, 1992. 154 s.
5. Bychkov V.E., Danil'chenko I.G., Baklagin I.M. Posledovatel'naja perekachka razlichnyh sortov nefteproduktov s gazovym razdelitelem. Transport i hranenie nefteproduktov i uglerodnogo syr'ja. 1988. №4. S. 13-16.
6. Makarenko V.D. Nadezhnost' neftegazopromyslovyh sistem. Cheljabinsk: izd-vo CNTI, 2004. 826s.
7. Makarenko V.D., Chausov N.G., Bondar' M.N. Bezopasnyj resurs tehniceskijh sistem. Nizhin: OOO Vidavnictvo "Aspekt-Poligraf", 2013. 388 s.
8. Makarenko V.D., Chausov N.G., Krivorot'ko V.M. Nadezhnost' inzhenernyh metallokonstrukcij. Nizhin: OOO Vidavnictvo "Aspekt-Poligraf", 2013. 392 s.
9. Berezin I.V., Repinskij V.S. Operativnoe upravlenie sistemami gazosnabzhenija. Moskva: Nedra, 1985. 357 c.