

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ГАЗОПРОВОДУ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ

Є.І.Крижанівський, О.С.Тараєвський, С.Й.Тараєвський

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42464
e-mail: rector@nung.edu.ua*

Представлены результаты экспериментальных исследований и проанализированы влияния неравномерности газопотребления и концентраций напряжений на состояние газопровода, его механические свойства сварных соединений. Разработана методика, дает возможность получить достоверный прогноз остаточного ресурса работы сварных соединений газопровода и установить оптимальный режим работы КС. Рассмотрены некоторые аспекты механизма разрушения трубопроводов при действии циклических напряжений и их концентрации в сварном соединении газопроводов.

The results of experimental investigations are presented, the impact of irregularity of gas consumption, the stress concentration on the gas pipeline state and its mechanical properties of annular couplings are analyzed. The procedure was developed, which enables to get a reliable prediction of the residual resource of work of welding annular couplings in gas pipelines and thus to establish an optimal working system of annular couplings. A few aspects of reasons for pipelines destruction under the impact of cyclic stresses and their concentration in annular couplings of a gas pipelines were examined.

Основним внутрішнім навантаженням, яке сприймається стінкою трубопроводу, є навантаження робочим тиском. Залежно від характеристик і призначення газопроводу можливі стаціонарний і нестаціонарний режими руху газу. Для газопроводів строго стаціонарний рух газу є практично нереальним, оскільки турбулентність потоку передбачає пульсації параметрів у часі. Тому характер руху газу слід вважати квазістаціонарним, якщо зміна технологічних параметрів не виходить за встановлені межі. За квазістаціонарного характеру руху газу в трубах зміною тиску в часі можна знехтувати і вважати навантаження, що сприймаються стінками труб, постійними. В такому випадку матеріал труб працюватиме під сталим навантаженням, яке викличе в стінках газопроводу постійні у часі напруження.

Однак квазістаціонарний режим є характерним лише для вузького кола газопроводів, які входять до складу газотранспортної системи. Найчастіше характер руху газу в газопроводі відзначається нестаціонарністю. У таких випадках в газопроводі виникають коливання тиску, які можуть мати періодичний характер із певним декрементом затухання в часі. Природа таких коливань може бути різноманітною і залежить від причин, що їх викликали. Для кінцевих ділянок газопроводу внаслідок годинної нерівномірності газоспоживання характерні коливання тиску протягом доби від мінімального значення в час пікового газоспоживання до максимального в нічний період. Такі коливання тиску в часі призводять до циклічної зміни напружень в стінках трубопроводу з частотою, що приблизно відповідає добовому періоду циклічного навантаження. Ці навантаження можна вважати низькочастотними циклічними навантаженнями. Тривала експлуатація газотранспортних об'єктів за таких режимів не може не призвести до їх значного морального і фізично-

го старіння, тобто до невідповідності технічного рівня устаткування сучасним вимогам (наприклад, показникам експлуатаційної надійності, екологічної безпеки).

Під фізичним старінням розуміють зниження технічного стану газоперекачувального устаткування і лінійної частини газопроводів, зменшення гідравлічної ефективності газопроводів [2, 3]. Очевидно, що чинники морального і фізичного старіння обумовлюють погіршення технологічних показників транспортування газу: знижується продуктивність газопроводів і надійність газопостачання споживачам, збільшується енергоємність транспорту газу. В кінцевому результаті погіршуються основні техніко-економічні показники газопроводів: зростає собівартість транспортованого газу, знижуються фондовіддача і прибуток. Для подолання цих негативних тенденцій необхідно проводити реконструкцію і капітальний ремонт газопроводів.

У ряді випадків низькочастотний цикл накладається на високочастотний, що призводить до зміни частоти періодичних коливань напружень в стінках труб. Крім того, слід зауважити, що як низькочастотні, так і високочастотні циклічні коливання навантаження на стінку трубопроводу є змінними протягом значного проміжку часу (наприклад, року). Тому про частоту коливань навантаження можна говорити лише як про певну середньостатистичну величину. У зв'язку з цим її визначення можливе тільки на основі математичного моделювання нестаціонарних процесів трубопровідного транспорту газу.

Спрощена математична модель нестаціонарного неізотермічного руху газу в газопроводі може бути побудована на основі диференціальних рівнянь руху газу, нерозривності і енергії, які у векторній формі мають вигляд [1, 4]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda \cdot \rho \cdot w^2}{2 \cdot d} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \cdot \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial x},$$

де: P – тиск, як функція лінійної координати x та часу t ; $\rho \cdot w$ – масова швидкість газу ($\rho \cdot w = M/F$); F – площа поперечного перерізу труби; d – внутрішній діаметр газопроводу; c – швидкість розповсюдження звукової хвилі в газі; M – масова витрата газу.

Коефіцієнт лінеаризації:

$$2a = \frac{\lambda \cdot \varpi}{2 \cdot d}, \quad (2)$$

де: ϖ – середня по довжині і усереднена в часі лінійна швидкість; λ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Проведемо розрахунок задавшись наступними умовами:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + 2a \cdot (\rho \cdot w) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + 2a \cdot \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (5)$$

Аналогічне рівняння може бути записане для масової витрати:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial M}{\partial t}, \quad (6)$$

де $\chi = \frac{c^2}{2a}$.

Виходячи з умов газопостачання, визначимо початкові і граничні умови для реалізації запропонованих математичних моделей з метою визначення амплітуди і частоти коливань тиску в трубопроводі як основної складової змінних напружень у тілі труби.

Для рівняння (3) знайдемо максимальну амплітуду і циклічну частоту коливань, коли характер газоспоживання визначається синусоїдальною кривою. З цією метою за початок координат вибираємо кінцеву точку газопроводу, в якій відбувається відбір газу, а вісь лінійних координат OX спрямуємо вздовж осі трубопроводу в напрямку течії газу. Будемо відраховувати амплітудні значення коливань тиску від його стаціонарного значення в кожній точці трубопроводу. Тому за початкову умову можна прийняти:

$$P(x,0) = 0. \quad (7)$$

Характер амплітудного коливання відбору на кінцевій ділянці газопроводу ($x=0$) виразимо періодичною функцією:

$$Q(0,t) = Q_a \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (8)$$

Будемо вважати, що тиск газу зростає вздовж осі OX , але при цьому залишається об-

меженим зверху. Тому, вважаючи газопровід безмежним, другу граничну умову запишемо у вигляді:

$$P(\infty,t) < \infty. \quad (9)$$

Розв'язок (3) за початкових (7) і граничних умовах (8) і (9), знайдений за методом інтегральних перетворень Лапласа, матиме вигляд:

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} = \frac{\Psi}{\chi \cdot s}. \quad (10)$$

Загальний розв'язок цього лінійного рівняння має вигляд

$$\Psi(x,s) = C_1 \cdot e^{-\frac{sx}{\chi}} + C_2 \cdot e^{\frac{sx}{\chi}}. \quad (11)$$

З умови обмеженості функції (9) маємо $C_2 = 0$. Тоді

$$\frac{d\Psi}{dx} = -C_1 \cdot \frac{s}{\chi} \cdot e^{-\frac{sx}{\chi}}. \quad (12)$$

Використовуючи граничну умову (8), одержимо рівняння для визначення сталої інтегрування C_1 :

$$-\frac{2a}{F} \cdot \rho \cdot Q_a \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2} = -C_1 \cdot \frac{s}{\chi} \cdot e^{-\frac{sx}{\chi}} \Big|_{x=0}. \quad (13)$$

$$\text{Звідси } C_1 = \frac{2a}{F} \cdot \rho \cdot Q_a \cdot \frac{1}{s^2 + \omega^2} \cdot \chi.$$

Переходячи до оригіналу на основі таблиць, одержимо розв'язок у вигляді

$$p(x,t) = \frac{2a}{F} \rho Q_a \frac{\chi}{\omega} \sin \omega(t - \frac{x}{\chi}). \quad (14)$$

З (14) видно, що коливання тиску в газопроводі за частотою співпадають із коливаннями відбору газу (вимушуючої сили), але зміщені за фазою в залежності від лінійної координати.

З метою оцінки амплітуди і частоти коливань тиску в газопроводі при скачкоподібній зміні відбору газу в кінці газопроводу використаємо рівняння (6). При цьому будемо вважати, що до початку нестационарності процесу ($t=0$) газопровід працював у стаціонарному режимі і перекачував газ із витратою Q_{cp} .

Щоб отримати зміну тиску по довжині і в часі, використаємо друге рівняння системи (1), з якого маємо:

$$P(x,t) - P(x,0) = \frac{c^2}{F} \int_0^t \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} dt.$$

Одержимо

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} = -\frac{M_{cp} - M_1}{L} + \frac{2}{L} \cdot M_{cp} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ 2 \cdot [1 - (-1)^n] + \left(3 - \frac{M_1}{M_{cp}} \right) \right\} \times$$

$$\times \cos \frac{\pi \cdot n \cdot x}{L} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \chi \cdot t}{L^2}}.$$

Тоді

$$P(x,t) = P(0,t) + \frac{c^2}{F} \cdot \int_0^t \left(-\frac{M_{cp} - M_1}{L} + \frac{2}{L} \cdot M_{cp} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ 2 \cdot [1 - (-1)^n] + \left(3 - \frac{M_1}{M_{cp}} \right) \right\} \times \cos \frac{\pi \cdot n \cdot x}{L} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \chi \cdot t}{L^2}} \right) dt.$$

Після інтегрування отримаємо

$$P(x,t) = P(0,t) + \frac{c^2}{F} \cdot \left[-\frac{M_{cp} - M_1}{L} \cdot t + \frac{2 \cdot M_{cp} \cdot L}{\pi^2 \cdot \chi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \Phi_n \cdot \cos \frac{\pi \cdot n \cdot x}{L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \chi \cdot t}{L^2}} \right) \right\} \right]. \quad (16)$$

Для розподільчих газопроводів характерні нестационарні процеси, викликані миттєвими збуреннями газового потоку. Це можуть бути раптові збільшення величини відбору газу чи підкачування. В результаті таких збурень газопроводом рухається хвиля ущільнення, яка з часом згасає. Однак за великої кількості шляхових відборів чи підкачувань такі процеси часто повторюються, що викликає коливання тиску в газопроводі, які є практично неперервними. Частота коливального процесу в таких випадках визначається характеристиками трубопроводу та параметрами транспортування газу і може змінюватися в широкому діапазоні. Такі коливання викликають змінні циклічні напруження в стінках трубопроводу, які можна характеризувати як високочастотні.

В наведених дослідженнях розроблено методи реалізації математичних моделей, дана оцінка точності розв'язку за певних припущень і спрощень, розроблено рекомендації і критерії вибору математичної моделі у відповідності з процесом, що моделюється.

Висновок

Математичне моделювання нестационарних процесів у газопроводі, що наводиться вище, має за мету оцінити вплив частоти і амплітуди коливань тиску на втомну міцність матеріалу труб у випадку довготривалої експлуатації газопроводу у різних умовах. Тому першочерговим завданням моделювання є встановлення частоти і амплітуди коливання напружень у стінках трубопроводу при високочастотному і низькочастотному циклічному навантаженні. Слід зауважити, що залежно від вибору режиму роботи газотранспортних систем України можна зекономити або марно витратити на перекачування понад 3 млрд.м³ газу на рік. Запропоновані математичні моделі дають змогу із достатньою для інженерної практики точністю $\pm 5\%$ чисельно визначати низькочастотну пульсацію тиску, а також вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан газопроводу. Таким чином, розроблені математичні моделі уможливають прогнозування споживання газу, а також вибір раціонального режиму роботи газопроводу та КС.

Література

- 1 Обслуживание газотранспортных систем: Учеб. пособие / В.Я.Грудз, Д.Ф.Тымкив, Е.И.Яковлев. – К.: УМК ВО, 1991. – 160 с.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Галиуллин З.Т., Леонтьев Е.В. Интенсификация магистрального транспорта газа. – М.: Недра, 1991. – 272 с.