

УДК 622.692.4

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ У ГАЗОВОМУ ПОТОЦІ І ВИБІР МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

О. С. Тараєвський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166
e-mail: tznng@nung.edu.ua

Представлены результаты экспериментальных исследований структуры нергетических потерь. Проанализировано влияние неравномерности газопотребления и наличия концентраций напряжений на состояние газопровода, а также механические свойства его сварных соединений. Разработанная методика позволяет получить достоверный прогноз остаточного ресурса работы сварных соединений газопровода и установить оптимальный режим работы КС. Рассматриваются отдельные аспекты механизма разрушения трубопроводов под воздействием циклических напряжений и их концентрации в сварных соединениях.

У ході математичного моделювання газодинамічних процесів у газопроводах задачі гідродинаміки і теплообміну, розглядаються, здебільшого, окремо. За допомогою рівнянь гідродинаміки вирішуються задачі з визначення полів швидкостей, тиску, густини газу. Задачі теплообміну розглядаються без обліку зміни тиску та витрати газу в просторі та в часі, вважаючи термодинамічні процеси стаціонарними, оскільки постійна часу перехідного процесу на декілька порядків більша за аналогічну константу гідродинамічного процесу.

Проте результати досліджень свідчать про те, що зміна швидкості потоку газу по довжині ділянки впливає на інтенсивність теплообміну з навколишнім середовищем. У свою чергу, зміна температурних напруг у навколишньому середовищі призводить не тільки до нового розподілу швидкостей у трубі, але й до повної зміни режиму руху газу. Тому задача моделювання руху газу в газопроводі повинна включати газодинамічні та термодинамічні рівняння, об'єднані в єдину систему.

Загалом нестационарний термогазодинамічний процес руху газу в трубопроводі може бути описаний системою диференціальних рівнянь, наведених у векторній формі [1, 4]:

$$\bar{g} \cdot \rho - \text{grad} \bar{P} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot \bar{W} - \rho \left(\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{W} \cdot \text{grad} \bar{W} \right) = 0 ; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \bar{W} = 0 ;$$

$$\bar{W} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \text{grad} \bar{T} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{div} \bar{q} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot (\Phi + \bar{q}); \quad (2)$$

де: ρ – густина газу як функція просторових координат і часу; \bar{P} – вектор тиску; \bar{W} – вектор швидкостей із проєкціями на просторові координати u, v, w ; \bar{T} – вектор температурного

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.

поля; \bar{g} – тепловий потік у навколишнє середовище; Φ – дисипативна функція Релея.

Для замикання системи рівнянь використовують рівняння газового стану, що в загальному випадку може бути представлено функцією $f(p, T) = 0$.

З метою опису теплообміну в стінці газопроводу необхідно доповнити систему рівнянням теплопровідності:

$$\rho_c \cdot c_c \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \text{div}(\xi_c \cdot \text{grad} + \bar{T}_c) + \bar{q}_c, \quad (3)$$

де: c_c, ρ_c – теплоємність і густина матеріалу труб; ξ_c – коефіцієнт теплопровідності сталі; $\frac{\partial \bar{T}_c}{\partial t}$ – вектор температурного поля в стінці труби; \bar{q}_c – тепловий потік крізь стінку.

Просторова модель термогазодинамічного процесу в газопроводі важко реалізується та є малоперспективною для експериментальних досліджень оскільки існує необхідність у забезпеченні подібності за значною кількістю критеріїв. Аналіз результатів досліджень дав змогу дійти висновку щодо доцільності і можливості проведення одномірного моделювання руху стисливого середовища в трубопроводі.

При цьому приймається, що температура, тиск і густина середовища (газу) залишаються незмінними, а його рух по перерізу труби – постійним за швидкістю. Зміна цих параметрів може здійснюватися тільки в одному напрямку – вздовж осі трубопроводу. Зазвичай приймають швидкість руху потоку такою, що дорівнює середньомасовій, а температуру визначають як середньокалориметричну в даному перерізі:

$$T = \frac{\int T \cdot w \cdot c_p dF}{\int w \cdot c_p dF}.$$

Тоді математична модель одномірного руху газу в трубопроводі з урахуванням теплообміну може бути представлена у вигляді системи рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \alpha \cdot W \frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial t} + \rho \cdot g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial t} + \frac{\lambda \cdot \rho \cdot W^2}{2d} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -W \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{T \cdot \rho \frac{\partial c_p}{\partial T} + \rho \cdot c_p} \times \\ \times \left[\rho \frac{\partial W}{\partial x} \left(c_p \cdot T + \rho \cdot T \frac{\partial c_p}{\partial \rho} \right) + \xi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \xi}{\partial P} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \right. \\ \left. + \frac{\pi \cdot D \cdot \alpha_1}{c_c \cdot r_c \cdot F_c} (T_c - T) - \frac{g \cdot W}{c_p} \frac{dh}{dx} \frac{\partial T_c}{\partial t} \right] = \\ = -\frac{\xi_c}{\rho_c \cdot c_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\pi \cdot D \cdot \alpha_2}{c_c \cdot \rho_c \cdot F_c} (T_{нав} - T_c) + \\ + \frac{\pi \cdot D \cdot \alpha_2}{c_c \cdot \rho_c \cdot F_c} (T - T_c). \end{aligned} \quad (4)$$

Тут, крім зазначених вище позначень, прийнято: c_p, c_c – ізобарна теплоємність газу та теплоємного матеріалу труб; $T_{нав}, T_c$ – температура навколишнього середовища і стінки трубопроводу; α_1, α_2 – коефіцієнти теплопередачі від газу до стінки і від стінки в навколишнє середовище; D, d – зовнішній та внутрішній діаметри труби; ξ, ξ_c – коефіцієнти теплопровідності газу і стінки труби; F, F_c – площа перерізу трубопроводу та стінки; $\chi = \frac{\xi}{\rho \cdot c_p}$ –

геодезична позначка траси газопроводу.

Перше рівняння системи (4) – рівняння руху, побудоване на основі принципу Даламбера шляхом суперпозиції сил, що діють на елемент суцільного рухомого середовища розташованого на осі трубопроводу.

Перший член рівняння, який називається градієнтом тиску, є дією сил тиску на потік середовища, що рухається. Другим членом рівняння враховується вплив на потік Кориолісової сили, викликаной нерівномірністю розподілу швидкостей по перерізу труби. Враховуючи одновимірність потоку та припущення рівномірності розподілу параметрів по перерізу труби цим зазвичай нехтують. Третій член рівняння характеризує вплив гравітаційних сил на потік газу, що рухається вздовж похилої ділянки, четвертий визначає вплив сил інерції на потік газу, а п'ятий визначає вплив сил тертя на потік неперервного середовища.

Без урахування впливу на потік газу Кориолісової сили рівняння руху може бути представлено у вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \cdot g \frac{dh}{dx} + \frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial t} + \frac{\lambda \cdot \rho \cdot W^2}{2d} = 0. \quad (5)$$

З метою визначення структури гідравлічних втрат під час руху реального газу в газопроводі здійснено аналіз технологічних режимів роботи газопроводів “Союз”, “Братерство” і “Уренгой–Помари–Ужгород” на гірських ділянках експлуатації.

При цьому було розглянуто понад 5 тис. різних режимів експлуатації зазначених газопроводів, із них 137 найбільш характерних поділено на 22 групи, кожна з яких об'єднувалася за характером технологічного режиму. З використанням параметрів технологічних режимів експлуатації газопроводів для кожної групи режимів визначалися всі види гідравлічних втрат, що входять у структуру рівняння (5). Слід зазначити, що з чотирьох складових сил у (5) три (крім першої) визначаються зовсім незалежно від будь-яких даних щодо властивостей поля тиску. Але якщо з чотирьох складових три задалегідь відомі, то четверта знаходиться цілком однозначно. Отже, рівняння (5) визначає взаємозв'язок поля швидкостей і поля тиску.

Кожна зі складових рівняння (5) визначається за усередненими в часі показниками.

Усереднене значення градієнта тиску визначалося з виразу:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{сеп} = \frac{P_{i0} - P_{iL}}{L};$$

$$P_{i0} = \frac{1}{T} \int_0^T P(0, t) dt, P_{iL} = \frac{1}{T} \int_0^T P(L, t) dt,$$

де T – проміжок часу, впродовж якого здійснювалася реєстрація тисків.

Гравітаційні гідравлічні втрати визначалися з формули

$$\left(\rho \cdot g \frac{dh}{dx} \right)_{сеп} = \rho_{сеп} \cdot g \cdot i_{сеп}.$$

Усереднена величина інерційних гідравлічних втрат визначалася із залежності

$$\left(\frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial t} \right)_{сеп} = \frac{1}{F \cdot T} \int |M_i - M_{i+1}| dt,$$

де M_i, M_{i+1} – масові витрати газу газопроводом на кінцях кожного проміжку дискретності за часом.

На основі виконаних розрахунків середня усереднена величина гідравлічних втрат на трасі визначалася як така різниця:

$$\left(\frac{\lambda \cdot \rho \cdot W^2}{2d} \right)_{сеп} = \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{сеп} - \left(\frac{dh}{dx} \right)_{сеп} + \left(\frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial t} \right)_{сеп}.$$

Як відомо [1, 4], саме інерційні втрати спричиняють нестационарний характер руху газу в трубопроводі. Найбільш суттєвим гальмом нестационарності вважаються гідравлічні втрати на тертя. Слід зауважити, що до них необхідно віднести не тільки втрати на в'язкісне тертя в потоці, а й всі інші види гідравлічних втрат, які загалом можуть бути оцінені величи-

ною фактичного коефіцієнта гідравлічного опору. Тоді, користуючись рівнянням (5), можна для оцінки міри нестационарності газового потоку використати відношення члена, що виражає інерційні втрати, до члена, що виражає гідравлічні втрати на тертя, тобто

$$N_t = \frac{\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}}{\lambda_f \rho w^2} \cdot \frac{2d}{2d}$$

Використавши операцію приведення диференціальних операторів і переходячи від лінійної та масової швидкості до витрати газу одержимо вираз для критерію нестационарності у вигляді

$$N_t = \frac{\delta Q d}{\lambda_f W \tau} \quad (6)$$

де: δQ – зміна витрати в період нестационарного процесу за характерний час;

W – середня по довжині й усереднена в часі лінійна швидкість газу в газопроводі:

$$W = \frac{4\bar{Q}_{CP} T_{CP} Z_{CP} P_{CT}}{\pi \cdot d^2 \bar{P}_{CP} T_{CT}};$$

$$\bar{Q}_{CP} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} Q(t) dt;$$

$$\bar{P}_{CP} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_{CP}(t) dt,$$

де: P_{CT}, T_{CT} – стандартні умови;

P_{CP}, T_{CP} – середні значення тиску і температури в газопроводі;

Z_{CP} – коефіцієнт стисливості газу при P_{CP} і T_{CP} .

У результаті аналізу розрахункових параметрів на фактичних режимах роботи газопроводів встановлено критичне значення критерію нестационарності $N_{Ikk} = 1,4 \cdot 10^{-6}$.

Якщо в результаті розрахунків $N_t < 1,4 \cdot 10^{-6}$, то для цих режимів можна нехтувати інерційними втратами в математичній моделі і при цьому похибка у визначенні параметрів режиму не перевищить 5%, що припустимо.

Якщо ця умова ($N_t < 1,4 \cdot 10^{-6}$) не виконується, то похибка різко зростає, тому при математичному моделюванні режиму слід врахувати величину інерційних втрат енергії.

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що найбільшу питому вагу в загальній структурі гідравлічних втрат мають гідравлічні втрати на тертя. Середня величина цих втрат складає 94,71%. Дисперсія цього виду втрат навколо середнього складає 13,28%, а коефіцієнт варіації (17,8%) найменший у загальній структурі гідравлічних втрат.

Гідравлічні втрати, пов'язані з впливом сил гравітації в загальній структурі втрат, мають найменшу частку (у середньому 5,77%). Залеж-

но від режиму експлуатації і характеру профілю траси, питома величина цього виду втрат коливається в межах від 4,08% до 8,14%, при цьому дисперсія навколо середнього мінімальна (1,3 Па/м), а коефіцієнт варіації складає 22,5%. Очевидно, що ці втрати зумовлені як профілем траси газопроводу, так і параметрами режиму. При цьому для одного конкретного газопроводу межі зміни цього виду гідравлічних втрат істотно звужуються.

Найнестабільнішими в загальній структурі втрат є гідравлічні інерційні втрати. В середньому у загальній структурі втрат їхня величина складає 19,57%. Залежно від режиму роботи газопроводу питома величина інерційних втрат коливається в межах від 1,09% до 43,9% із дисперсією навколо середнього – 12,66 Па/м і найбільшим коефіцієнтом варіації – 64,7%. Це свідчить про непередбачуваність величини інерційних втрат.

Висновок

Із проведеного аналізу випливає, що у ході моделювання режимів роботи магістральних газопроводів неприпустимо зневажати гідравлічними втратами на тертя в рівнянні руху за будь-яких режимів. Нехтування членом, що враховує гравітаційні втрати, призведе до деякої похибки, яка залежить від профілю траси газопроводу та буде близькою до постійної в різних варіантах розрахунків. Нехтування інерційними втратами припустимо лише після попередньої оцінки режиму, що моделюється. При цьому зауважимо, що для квазістационарного турбулентного режиму величина інерційних втрат мізерна, а з розвитком нестационарності швидко зростає. Тому виникає необхідність певним чином оцінити ступінь нестационарності потоку з метою прогнозування величини інерційних втрат.

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.