

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОПРОВІДІВ

В. Я. Грудз¹, М. М. Якимів²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (3422) 4-23-42; e-mail: public@nung.edu.ua

²Товариство з обмеженою відповідальністю «ДІПРОГАЗ»
04050, м. Київ, вул. Артема, 74; тел. +380 (044) 206-53-12;
e-mail: dihrogaz@post.com.ua

Запропоновано методику визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів з урахуванням всіх видів енергетичних витрат на транспортування газу. Показано вплив різних видів енергетичних ресурсів газового потоку на оцінку гідравлічної ефективності. Встановлено, що неврахування витрат внутрішньої енергії призводить не тільки до підвищення похибки обчислення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу, а й до спотворення картини його часового тренду.

Ключові слова: гідравлічна ефективність, енерговитрати, внутрішня енергія, газовий потік.

Визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів як діагностичної ознаки технічного стану лінійної частини магістрального газопроводу має вирішальне значення при прийнятті рішення про профілактичне відновлення технічного стану трубопроводу. При суттєвому пониженні значення коефіцієнта гідравлічної ефективності приймається рішення про проведення очистки порожнини газопроводу, чи інше адекватне рішення, спрямоване на підвищення коефіцієнта гідравлічної ефективності. Якщо ж інформація про стан газопроводу була хибною, то заплановані і проведені заходи з підвищення коефіцієнта гідравлічної ефективності не принесуть бажаного ефекту. Якщо ж знехтувати інформацією про зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності, то газотранспортна система певний час (до прийняття рішення про відновлення технічного стану газопроводу) буде працювати з підвищеними втратами енергії за рахунок зростання коефіцієнта гідравлічного опору, що призведе до перевитрати паливного газу. Тому в кожному випадку неточна інформація про технічний стан газопроводу, діагностичною ознакою якого є значення коефіцієнта гідравлічної ефективності, призведе до перевитрати коштів на експлуатацію газотранспортного комплексу.

Неврахування втрат внутрішньої енергії газу спотворює інформацію про технічних стан газопроводу. Як показують залежності коефіцієнта гідравлічної ефективності від часу експлуатації, в весняно-Олітній період значення коефіцієнта гідравлічної ефективності зростають, що в принципі неможливе без стороннього впливу. Тому методика визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності повинна враховувати втрати внутрішньої енергії при транспортуванні газу.

Як відомо, за класичним визначенням внутрішня енергія газового середовища є функцією температури

$$dU=C_v dT,$$

де C_v – ізохорна теплоємність газу; T – абсолютна температура.

Таким чином, для врахування зміни внутрішньої енергії в потоці газу необхідно взяти до уваги фізичні властивості газу і температурний режим газопроводу.

Ізохорна та ізобарна теплоємності зв'язані між собою залежністю Майєра

$$C_p - C_v = R; \quad C_p / C_v = k,$$

де R – газова стала; k – показник адіабати.

Важливою характеристикою стану реального газу є рівняння газового стану, яке для ідеального газу записується у формі рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$pv = RT.$$

Нехтування власним об'ємом молекул і силами взаємодії між ними призводить до відхилення параметрів стану реального газу від законів ідеального, тому для реальних газів побудоване рівняння Ван-дер-Вальса, у якому введені поправки на об'єм молекул і сили взаємодії між ними. Воно має вигляд [1]

$$(P + P')(v - b) = RT,$$

де b – поправка на власний об'єм молекул (заборонений об'єм);

$P' = \frac{a}{v^2}$ – внутрішній тиск (поправка на взаємодію між молекулами).

Внутрішня енергія реального газу складається з кінетичної енергії теплового руху його молекул і потенційної енергії міжмолекулярної взаємодії. Потенційна енергія реального газу обумовлена тільки силами притягання між молекулами. Наявність сил притягання призводить до виникнення внутрішнього тиску

$$p' = \alpha / v^2.$$

Робота, що витрачається на подолання сил притягання, що діють між молекулами газу, як відомо з механіки, йде на збільшення потенційної енергії системи, тобто

$$\delta A = p' d v_T = \delta \Pi,$$

чи

$$\delta \Pi = \alpha / v^2 d v_T,$$

звідки $\Pi = -\alpha / v_T$.

Знак мінус означає, що молекулярні сили, що утворюють внутрішній тиск p' , є силами притягання.

Враховуючи обидві складові, отримуємо, що внутрішня енергія моля реального газу [1]

$$U_T = C_v - \alpha/v$$

зростає з підвищенням температури і збільшенням об'єму.

Якщо газ розширюється без теплообміну з навколишнім середовищем (адіабатичний процес, тобто $Q=0$ і не виконує зовнішньої роботи (розширення газу у вакуум, тобто $A=0$), то на основі першого закону термодинаміки $Q = (U_2 - U_1) + A$ отримуємо $U_1 = U_2$.

Отже, при адіабатичному розширенні без здійснення зовнішньої роботи внутрішня енергія газу не змінюється.

Рівність формально справедлива як для ідеального, так і для реального газу, але фізично для обох випадків суттєво відрізняється. Для ідеального газу рівність $U_1 = U_2$ означає рівність температур ($T_1 = T_2$), тобто при адіабатичному розширенні ідеального газу у вакуум його температура не змінюється. Для реального газу маємо

$$U_1 = C_v T_1 - \frac{a}{v_1}, \quad U_2 = C_v T_2 - \frac{a}{v_2},$$

звідки одержимо

$$T_1 - T_2 = \frac{a}{C_v} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right).$$

Якщо $v_1 > v_2$, то $T_1 > T_2$, тобто реальний газ при адіабатичному розширенні у вакуум охолоджується. При адіабатичному стисканні реальний газ нагрівається.

Оскільки розширення газу відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем (адіабатично), то на основі першого закону термодинаміки [2]

$$\delta Q = (U_2 - U_1) + \delta A = 0.$$

Зовнішня робота, що виконується газом, може бути позитивною ($A_2 = p_2 v_2$) чи негативною ($A_1 = p_1 v_1$). Підставляючи вираз для роботи, одержимо:

$$U_1 + p_1 v_1 = U_2 + p_2 v_2.$$

Постійна $U + p$ представляє ентальпію газу.

З урахуванням рівняння Ван-дер-Вальса маємо

$$T_1 - T_2 = \frac{a}{C_v + R} \left[2 \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) - \frac{b}{a} (p_2 - p_1) - b \left(\frac{1}{v_2^2} - \frac{1}{v_1^2} \right) \right].$$

Звідси витікає, що знак різниці ($T_2 - T_1$) залежить від того, яка з поправок Ван-дер-Вальса відіграє більшу роль. Проаналізуємо цей вираз, зробивши припущення, що $p_2 \ll p_1$ і $v_2 \gg v_1$:

1) $\alpha \approx 0$ – не враховуємо сили притягання між молекулами, а лише розміри самих молекул. Тоді

$$T_1 - T_2 = \frac{b}{C_U + R} [-(p_2 - p_1)] > 0,$$

тобто газ у цьому випадку нагрівається;

2) $b \approx 0$ – не враховуємо розмірів молекул, а лише сили притягання між ними. Тоді

$$T_1 - T_2 = \frac{2a}{C_U + R} \left[\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \right] \leq 0,$$

тобто газ у цьому випадку охолоджується;

3) враховуємо обидві поправки. З урахуванням рівняння Ван-дер-Вальса одержимо

$$T_1 - T_2 = \frac{a}{C_U + R} \left[2 \left(\frac{\frac{b}{a} R T_1}{v_1 - b} - \frac{1}{v_1} \right) + b \left(\frac{1}{v_2^2} - \frac{1}{v_1^2} \right) \right] = \frac{\frac{b R T_1}{v_1 - b} - \frac{2a}{v_1}}{C_U + R},$$

тобто знак різниці температур залежить від значень початкового об'єму v_1 і початкової температури T_1 .

Зміна температури реального газу в результаті його адіабатичного розширення, або так званого адіабатичного дроселювання, називається ефектом Джоуля-Томсона. Ефект Джоуля-Томсона прийнято називати позитивним, якщо газ у процесі дроселювання охолоджується ($\Delta T < 0$), і негативним, якщо газ нагрівається ($\Delta T > 0$).

Залежно від умов дроселювання для того самого газу ефект Джоуля-Томсона може бути як позитивним, так і негативним. Температура, при якій (для даного тиску) відбувається зміна знака ефекту Джоуля-Томсона, називається температурою інверсії. Її залежність від об'єму одержимо, прийнявши $T_2 - T_1 = 0$:

$$T = \frac{2a}{Rb} \left(1 - \frac{b}{v} \right).$$

Крива, що визначається цим рівнянням називається кривою інверсії. Область, вища за цю криву, відповідає негативному ефекту Джоуля-Томсона, нижча – позитивному.

На практиці дросель-ефект характеризується коефіцієнтом ефекту Джоуля-Томпсона:

$$D_j = \frac{dT}{dP}.$$

Величина зазначеного коефіцієнта залежить в основному від температури.

Ця залежність може бути представлена у вигляді

$$D_j = \frac{1}{C_p} \left(\frac{0,986 \cdot 10^6}{T^2} - 1,5 \right).$$

У середньому при робочих параметрах у газопроводах $D_j \approx 0,33$ град/атм.

Рівняння Ван-дер-Валяса незручне для практичного використання, оскільки виникають труднощі у визначенні поправок a і b , особливо для газових сумішей. Тому використовується рівняння стану ідеального газу, в який вносяться поправки на реальність, що називається коефіцієнтом стисливості газу і характеризує явище надстисливості газів, що полягає в тому, що для реального газу ліва частина рівняння закону Бойля-Маріотта значно менша за праву.

Таким чином, рівняння стану реального газу має вигляд [3]

$$\frac{P}{\rho} = zRT,$$

де z – коефіцієнт стисливості газу. Його величина залежить від тиску, температури і властивостей газу. Визначається за графіками чи емпіричними формулами, одна з яких має вигляд

$$z = 1 - 5,5 \cdot 10^5 \frac{P\Delta^{1,3}}{T_{\text{сер}}^{3,3}},$$

де P – тиск, атм; T – температура, °К; $\Delta = \frac{\rho_{\text{газ}}}{\rho_{\text{пов}}}$ – відносна густина газу.

Вихідним рівнянням для дослідження температурного режиму газопроводу є рівняння першого начала (закону) термодинаміки

$$dQ = dU + dL,$$

де d – підвід тепла; dU – зміна внутрішньої енергії; dL – робота, виконувана газом.

Запишемо рівняння енергії в диференційній формі:

$$U_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{\omega_1^2}{2} = U_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{\omega_2^2}{2} - q \pm L,$$

$$U_2 - U_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} - dq \pm dL = 0,$$

$$dU + \frac{dP}{\rho} + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - dq \pm dL = 0,$$

$$\frac{dP}{\rho} + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) \pm dL = 0.$$

Зміна внутрішньої енергії dU здійснюється за рахунок підведення тепла dq , тому обидва члени можна опустити.

Підставимо результат у вихідне рівняння першого початку термодинаміки:

$$dQ_{\text{зовн}} + dQ_{\text{внут}} = dU + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + dL_{\text{тер}}.$$

Робота сил тертя перетворюється в тепло, тому

$$dQ_{\text{внут}} = dL_{\text{тер}},$$

$$dQ_{\text{зовн}} = dU + d\left(\frac{P}{\rho}\right).$$

Для оцінки процесу теплообміну з навколишнім середовищем розглянемо елемент трубопроводу зовнішнім діаметром D і довжиною dx , усередині якого температура газу T , а температура навколишнього середовища – T_0 .

Теплообмін може бути записаний на підставі закону теплопередачі Ньютона:

$$Q = kF(t - t_{\text{зовн}})t,$$

де $F = \pi d_{\text{зовн}} dx$ - площа поверхні теплопередачі,

$$dQ_{\text{внут}} = \frac{k\pi D}{M}(T - T_0)dx,$$

де M – масова витрата.

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_P \cdot \left(\frac{dT}{dP}\right)_i,$$

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T = -c_p \cdot \left(\frac{dT}{dP}\right)_i = C_p \cdot D_i,$$

де D_i – коефіцієнт ефекту Джоуля-Томсона.

$$\frac{k\pi D}{M}(T - T_0)dx = C_p dT - C_p D_i dP.$$

Позначимо $\frac{k\pi D}{MC_p} = a$, тоді:

$$\frac{dT}{dx} - D_i \frac{dP}{dx} = a(T - T_0).$$

Щоб розв'язати це рівняння, необхідно знати похідну $\frac{dP}{dx}$. Знайдемо її, використовуючи рівняння депресії тиску:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\sqrt{P_{\text{н}}^2 - (P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2) \frac{x}{L}} \right) = \frac{1}{2L} \frac{P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2}{\sqrt{P_{\text{н}}^2 - (P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2) \frac{x}{L}}}.$$

Тоді

$$\frac{dT}{dx} = \frac{D_i}{2L} \frac{P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2}{\sqrt{P_{\text{н}}^2 - (P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2) \frac{x}{L}}} = a(T - T_0).$$

Одержати рішення даного рівняння в аналітичному вигляді неможливо, тому на практиці використовують наближені рішення.

Рівняння Шухова не враховує впливу ефекту Джоуля-Томпсона

$$T_x = T_0 + (T_{\text{н}} - T_0)e^{-ax}.$$

Для врахування ефекту Джоуля-Томпсона представимо вираз у вигляді

$$\frac{dT}{dx} = a \left[T - \left(T_0 - D_i \frac{P_n^2 - P_k^2}{2aLP_{\text{сеп}}} \right) \right].$$

Позначимо комплекс $\left(T_0 - D_i \frac{P_n^2 - P_k^2}{2aLP_{\text{сеп}}} \right) = \bar{T}_0$ і назвемо його приведеною температурою навколишнього середовища. Тоді:

$$\frac{dT}{dx} = a(T - \bar{T}_0).$$

В результаті отримаємо рівняння схоже за формою з рівнянням Шухова, тільки замість T_0 містить приведену температуру \bar{T}_0 .

$$T_x = \bar{T}_0 + (T_n - \bar{T}_0)e^{-ax}.$$

З урахуванням ефекту Джоуля-Томсона температура в трубопроводі може знижуватися нижче температури навколишнього середовища.

Повний коефіцієнт теплопередачі k від газу в навколишнє середовище може бути знайдений зі співвідношення

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_2},$$

де α_1 – коефіцієнт теплопровідності від газу до стінки; α_2 – коефіцієнт теплопровідності від стінки в ґрунт; λ – коефіцієнт теплопровідності стінки; δ – товщина стінки

Ґрунти по трасі трубопроводу різні (супісок, глина і т. д.), і до того ж вони свої теплофізичні властивості змінюють за часом:

$$k = \frac{k_1L_1 + k_2L_2 + k_3L_3 + \dots}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots},$$

k – дуже сильно залежить від вологості і, наприклад, після дощу зростає.

У процесі експлуатації коефіцієнт теплопередачі визначають на основі вимірів зміни температур газу в газопроводі по довжині і в часі. Шляхом обробки даних про температури ґрунту в непорушеному стані (шляхом вимірів) була отримана така формула:

$$t_0 = 6,91 - 3,6 \sin \frac{\pi}{180} (\tau + 165), \text{ } ^\circ\text{C},$$

τ – число діб, починаючи з 1-го січня.

Тоді для температури наприкінці газопроводу, використовуючи формулу Шухова, одержимо:

$$T_k = T_0 + (T_n - T_0)e^{-aL}.$$

Звідки

$$a = \frac{1}{L} \ln \frac{T_n - T_0}{T_k - T_0}.$$

Знаючи величину a , можна розрахувати температурний режим, не використовуючи величини коефіцієнта теплопередачі.

Визначення середньої температури. Для визначення середньої температури як вихідну формулу використовуємо формулу Шухова). Ефект Джоуля-Томсона при необхідності можна враховувати заміняючи T_0 на \bar{T}_0 .

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \int_0^L T_x dx = \frac{1}{L} \left[\int_0^L T_0 dx + \int_0^L (T_n - T_0) e^{-ax} dx \right] = T_0 + \frac{1}{L} \left[\frac{T_n - T_0}{a} e^{-ax} \Big|_0^L \right],$$

$$T_{\text{ср}} = T_0 + (T_n - T_0) \frac{1 - e^{-aL}}{aL}.$$

На етапі експлуатації є можливість визначити кінцеву температуру. Тому параметр a може бути знайдений з формули Шухова, якщо відома кінцева температура газу. Тоді

$$T_{\text{ср}} = T_0 + \frac{T_n - T_k}{\ln \frac{T_n - T_0}{T_k - T_0}}.$$

Визначивши таким чином параметри температурного режиму і фізичні властивості газу можна перейти до розрахунку теоретичного значення пропускної здатності газопроводу з урахуванням зміни внутрішньої енергії. З цією метою використаємо рівняння руху газу у вигляді [3]

$$\frac{(gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T) P_K^2 + \frac{\lambda}{d} \left(\frac{MzRT}{F} \right)^2}{(gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T) P_H^2 + \frac{\lambda}{d} \left(\frac{MzRT}{F} \right)^2} =$$

$$= \exp \left(- \frac{2(k-1)}{zRT} (gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T) \frac{L + \frac{d}{\lambda} \ln \frac{P_x^2}{P_H^2}}{1 + \frac{2(k-1)}{zRT} (gi - \frac{\pi D k_m}{M} \Delta T) \frac{d}{\lambda}} \right).$$

Початкові і кінцеві значення тиску і температури, а також значення температури навколишнього середовища беруться на основі відповідних вимірювань. В результаті розв'язання представленого рівняння отримуємо теоретичне значення пропускної здатності газопроводу. Якщо відоме значення фактичної пропускної здатності газопроводу, то коефіцієнт гідравлічної ефективності

$$E = Q_\phi / Q_T.$$

Складність процедури визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності з урахуванням всіх видів втрат енергії (особливо складних вимірювань вхідної інформації) не дозволяє рекомендувати дану методику для погодинного розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності. Для стеження за технічним станом газопроводу можна використати

загальноприйняту методику. Однак, перед прийняттям відповідальних рішень про переведення ділянок газопроводу в сферу обслуговування для виконання відновлювальних робіт рекомендується внести корективи у визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності на основі запропонованої методики.

Висновки:

1. Проведений аналіз енерговтрат в газовому потоці показав, що неврахування дисипації енергії може вносити суттєві неточності в результати визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності і спотворювати його часовий тренд, що неадекватно відображатиме технічний стан газопроводу.

2. Розв'язана задача теплогідравлічного розрахунку газопроводу дозволила отримати розрахункову формулу і запропонувати методику визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності з урахуванням усіх видів енерговитрат на транспорт газу.

3. Проведений аналіз температурного режиму і теплофізичних властивостей газу дозволить провести підготовку інформації для обчислення коефіцієнта гідравлічної ефективності

Література

1. Загоруйченко В.А. Метод составления уравнений состояния многокомпонентных смесей / В.А.Загоруйченко // Теплофизика высоких температур. – 1965. – Т.3, №3. – С. 244-249.
2. Загоруйченко В.А. Уравнение состояния и термодинамические свойства газовых смесей водорода, азота и метана / В.А.Загоруйченко // Теплофизические свойства газов. – М.: Наука, 1970. – С. 95-97.
3. Грудз Я.В. Энергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.
4. Грудз В.Я. Енергетичний підхід до питання про гідравлічну ефективність газопроводів / В.Я. Грудз Я.В. Грудз, М.М. Якимів // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2014. - №6/8(72). – С. 56-62.

Стаття надійшла до редакційної колегії 02.06.2015 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Тимківим Д.Ф., д.т.н., професором Говдяком Р.М. (м. Київ)

METHOD OF PROGNOSTICATION OF HYDRAULIC EFFICIENCY OF GAS PIPELINES

V. Y. Grudz¹, M. M. Yakymiv²

¹Ivano-Frankivs'k national technical university of oil and gas;

76019, Ivano-Frankivs'k, Carpathians str., 15;

ph. +380 (3422) 4-23-42; e-mail: public@nung.edu.ua

²Limited liability Company «DIPROGAZ»

04050, Kiev, Artem str., 74; ph. +380 (044) 206-53-12;
e-mail: dihrogaz@post.com.ua

Method of determination of coefficient of hydraulic efficiency of gas pipelines is offered taking into account all types of power charges on transporting of gas. Poказano influence of different types of power resources of gas stream on estimation of hydraulic efficiency. It is set, that no account of losses of internal energy brings errors over of calculation of coefficient of hydraulic efficiency of gas pipeline not only to the increase but also to distortion of picture of his sentinel of trendou.

Key words: *hydraulic efficiency, energy charges, internal energy, gas stream.*