

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ПРОЦЕСІ ТРУБОПРОВІДНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ

¹ В.Я.Грудз, ¹ Я.В.Грудз, ² А.В.Дацюк

¹ ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157
e-mail: public@nuing.edu.ua

² ДК "Укртрансгаз", 04053, м. Київ, Кловський узвіз, 9/1, тел. (044)4612111
e-mail: adatsuk.utg@naftogaz.net

Предложена методика расчета коэффициента полезного действия магистрального газопровода, проведены расчеты, выполнен их анализ

The method of calculation of output-input ratio of main gas pipeline is offered, conducted calculations, executed their analysis

Магістральний газопровід як складна технічна система характеризується значною протяжністю і великою енергоємністю. Тому навіть невеликий відсоток заощадження чи перевитрати енергоресурсів призводить до значної економії чи збитків. У зв'язку з цим для контролю за витратою енергії необхідно передбачити показник чи критерій, величина якого розрахована за фактичними параметрами режиму роботи газотранспортної системи, давала б підстави судити про міру корисного використання енергоресурсів і вказувала б на шляхи скорочення непродуктивних енерговитрат.

Як відомо, для машин, які (як і газопроводи) є складними технічними системами, мірою корисного використання енергії є коефіцієнт корисної дії (ККД), який визначається відношенням корисної виконаної роботи до загального обсягу затраченої енергії. Від часів Карно і до сьогодні досконалішою машиною вважається та, ККД якої найбільш наближений до його ідеального циклу.

Виходячи зі сказаного, не викликає сумніву необхідність введення поняття ККД газопроводу чи газотранспортної системи. Такий підхід дасть змогу аналізувати шляхи використання енергоресурсів в трубопровідному транспорті газу, оцінити ефективність використання енергоресурсів та намітити напрямки їх економії.

Слід зауважити, що для оцінки ефективності використання двигунів на компресорних станціях (як газотурбінних, так і електричних) здавна прийнято використовувати ККД машини. Це дало змогу ранжувати двигуни в ряд за принципом корисного використання енергії, що, в свою чергу, дало підстави створити конкурентноздатний ряд газоперекачувальних агрегатів, яким користуються під час проектування компресорних станцій, зокрема в процесі вибору їх обладнання. Однак такий підхід вирішує лише часткове завдання економії енергоресурсів в процесі транспортування газу, оскільки кінцевою метою є не процес компримування газу, а більш загальний процес — його транспортування. Тому підхід до оптимізації компримування газу ще не вирішує більш загального підходу до оптимізації процесу його

транспортування. Більше того, ККД системи повинен бути основним (або одним із основних) критерієм оптимальності процесу обслуговування чи керування режимами газотранспортної системи, оскільки стратегія оптимізації технологічного процесу чи технічного рішення не може вважатися задовільною, якщо вона призводить до зниження ККД системи.

Виходячи з класичного визначення коефіцієнта корисної дії, для розрахунку його величини в умовах газотранспортної системи необхідно встановити величину корисної роботи і загальної затрати енергії. Газотранспортна система призначена для перекачування газу на певну відстань із заданою продуктивністю і за заданих умов (теоретичних) режиму роботи. Іншими словами, корисною може вважатися робота виконана для переміщення заданої кількості газу на певну відстань за зумовлених величин тисків і температур. Якщо перекачувану кількість газу віднести до одиниці часу, то корисна робота розглядатиметься як витрата потужності, яка для потоку середовища в трубах виражається залежністю [1]

$$N_k = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H, \quad (1)$$

де: Q – витрата середовища густиною ρ ;

H – втрати напору, пов'язані з роботою сил опору для забезпечення заданої витрати.

Очевидно, що для газопроводу, який транспортує стискуване середовище, втрати напору слід замінити перепадом робочих тисків на початку і в кінці газопроводу

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H = P_n - P_k. \quad (2)$$

Об'ємна витрата газопроводу за робочих умов є змінною по довжині траси величиною навіть за стаціонарного характеру руху газу. Тому

$$\begin{aligned} Q &= \frac{M}{\rho_{cp}} = \frac{Q_{cm} \cdot \rho_{cm}}{P_{cp}} \cdot z_{cp} \cdot R \cdot T_{cp} = \\ &= Q_{cm} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp}, \end{aligned} \quad (3)$$

де: M – масова витрата газу в газопроводі;

Q_{cm} – об’ємна витрата газу в газопроводі, приведена до стандартних умов (P_{cm}, T_{cm});

$P_{cp}, T_{cp}, \rho_{cp}$ – середні тиск і температура в газопроводі та густина газу за цих умов відповідно.

Використавши (2) і (3), одержимо рівняння для визначення корисної роботи, віднесеної до одиниці часу:

$$N_k = Q_{cm} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp} \cdot (P_n - P_k). \quad (4)$$

Загальна підведена енергія до потоку газу дорівнюватиме сумарній енергоємності паливного газу, використаного для привода нагнітачів (у випадку ГПА з газотурбінним приводом), або загальній потужності електродвигунів (у випадку ГПА з електроприводом). В принципі, розрахунок потужності, яку споживає компресор для перекачування газу за заданих умов, не викликає труднощів. Якщо приводом відцентрових нагнітачів на КС є газотурбінні установки, то за відомої потужності, яку споживають ГПА, витрата паливного газу

$$q_{nz} = n \cdot N_{ГПА}, \quad (5)$$

де: n – питома витрата паливного газу на одиницю потужності ГПА, яка залежить від типу агрегату і його технічного стану;

$N_{ГПА}$ – потужність, яку споживає ГПА для перекачування газу.

Тоді підведена енергія для забезпечення перекачування газу за заданих умов і з заданою продуктивністю Q_{cm} виражатиметься рівнянням

$$N_n = q_{nz} \cdot Q_P^H, \quad (6)$$

де Q_P^H – нижча розрахункова теплотворна здатність паливного газу.

Слід зауважити, що у випадку експлуатації ГПА на КС величина паливного газу q_{nz} може бути визначена за показами витратоміра, а теплотворна здатність пального – за даними хімії-лабораторії.

Тоді ККД газотранспортної системи, яка складається з однієї компресорної станції і однієї лінійної ділянки, може бути визначений із залежності

$$\eta = \frac{Q_{cm}}{q_{nz}} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp} \cdot \frac{(P_n - P_k)}{Q_P^H}. \quad (6)$$

У випадку експлуатації газопроводу початковий P_n і кінцевий тиски P_k можуть бути безпосередньо виміряні, і тоді застосування (6) для визначення ККД системи не викликає труднощів. В процесі виконання розрахунків ККД газопроводу на стадії його проектування переважно відомий тиск в кінці ділянки P_k (на вході в наступну КС чи ГРС). Тоді початковий тиск P_n може бути знайдений (за відомої продуктивності) із основного рівняння газопроводів

$$P_n = \sqrt{P_k^2 + \frac{\lambda \cdot \Delta \cdot z_{cp} \cdot T_{cp} \cdot L \cdot Q_{cm}^2}{c^2 \cdot d^5}}, \quad (7)$$

де: λ – коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу;

Δ – відносна густина газу;

L, d – довжина і внутрішній діаметр газопроводу;

c – коефіцієнт, що залежить від вибору системи одиниць.

Тоді потужність ГПА на КС може бути визначена за характеристиками нагнітачів або за умови політропічного стиску газу

$$N_{ГПА} = \frac{m}{(m-1) \cdot \eta_{пол}} \cdot P_{ex} \cdot Q_{ex} \left[\varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (8)$$

де: m – показник політропи стиску;

$\eta_{пол}$ – політропічний ККД;

P_{ex}, Q_{ex} – тиск на вході в нагнітач (як правило відомий) і продуктивність КС за умов входу;

$$\varepsilon = \frac{P_k}{P_n} - \text{ступінь стиснення газу в нагнітачі.}$$

таті.

Якщо газопровід складається k лінійних ділянок і k компресорних станцій та при цьому забезпечується перекачування газу з витратою Q , однаковою на всіх ділянках, то для ККД системи матимемо:

$$\eta = \frac{Q_{cm} \cdot P_{cp}}{T_{cp} \cdot q_{nz} \cdot Q_P^H} \sum_{i=1}^k \frac{T_{cp_i}}{P_{cp_i}} \cdot z_{cp_i} \cdot (P_{n_i} - P_{k_i}). \quad (9)$$

Для кожної з лінійних ділянок в (9) середній тиск, середня температура і коефіцієнт стисливості виражається із залежності

$$\left\{ \begin{aligned} P_{cp_i} &= \frac{2}{3} \cdot \left(P_{n_i} + \frac{P_{k_i}^2}{P_{n_i} + P_{k_i}} \right), \\ T_{cp_i} &= T_{cp} + (T_{n_i} - T_{cp}) \cdot e^{-a_i} - \\ &\quad - D_j \frac{P_{n_i}^2 - P_{k_i}^2}{2 \cdot a \cdot L_i \cdot P_{cp_i}} (1 - e^{-a_i}), \\ z_i &= 1 - 5,5 \cdot \frac{P_{cp_i} \cdot \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\text{де: } a_i = \frac{k_m \cdot \pi \cdot D_3}{Q_{cm} \cdot \rho_{нов} \cdot \Delta \cdot C_p},$$

k_m – коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту;

D_3 – зовнішній діаметр труб;

$\rho_{нов}$ – густина повітря за стандартних умов;

C_p – ізохорна теплоємність газу;

D_j – коефіцієнт ефекту Джоуля–Томпсона.

Якщо по трасі газопроводу здійснюються шляхові відбори або підкачування газу, то розрахункова формула зводиться до вигляду

$$\eta = \frac{P_{cm}}{T_{cm}} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{Q_{cm_i}}{q_{n_{z_i}}} \cdot \frac{T_{cp_i}}{P_{cp_i}} \cdot z_{cp_i} \cdot \frac{P_{n_i} - P_{k_i}}{Q_{P_i}^H} \quad (11)$$

В (11) передбачається, що теплотворна здатність паливного газу $Q_{P_i}^H$ внаслідок шляхових підкачувань може змінюватися.

Для апробації запропонованої методики розрахунку ККД газопроводу, оцінки його величини та аналізу залежностей від параметрів режиму перекачування виконано розрахунки для гіпотетичного газопроводу, за якого перекачується метан і який складається з однієї лінійної ділянки діаметром 1420x20 мм і довжиною 127 км та компресорної станції, обладнаної газоперекачувальними агрегатами ГТН-25І з нагнітачем 650-24-11. Розрахунки проводилися для різних умов роботи газопроводу. За результатами розрахунків побудовано графічні залежності, зображені на рис.1.

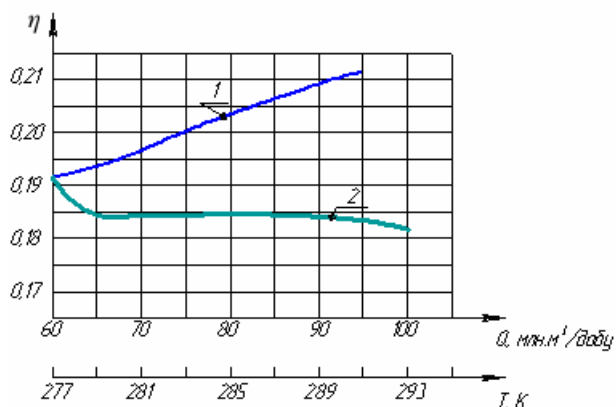


Рисунок 1 – Залежність ККД газопроводу від кінцевої температури (1) та від витрати газу (2)

Як видно з графіків, збільшення витрати газу по газопроводу призводить до зменшення ККД газотранспортної системи. Цей висновок, на перший погляд, парадоксальний. Адже відповідно до (6) у разі збільшення витрати Q_{cm} , яка знаходиться в чисельнику, величина ККД повинна зростати. Крім того, у випадку збільшення витрати (за інших ідентичних умов) зростатиме перепад тисків на початку і в кінці лінійної ділянки $(P_n - P_k)$, що також повинно призвести до зростання ККД. Однак, величина витрати паливного газу q_{n_z} зростає стрімкіше, що в кінцевому підсумку викликає зниження ККД. Таке співвідношення між витратою газу по газопроводу і витратою паливного газу спостерігається завдяки низьким значенням ККД газотурбінних установок, тобто завдяки мало-ефективному використанню енергії паливного газу. Якщо умовно припустити, що ККД ГТУ збільшився з 28,8% до 60%, то крива залежності ККД газопроводу від витрати газу матиме максимум, який за подальшого збільшення

ККД ГТУ буде змішуватися в бік вищих значень витрати газу по газопроводу.

Під час руху газового потоку в трубопроводі потенціальна енергія тиску перетворюється в кінетичну енергію, яка завдяки роботі сил тертя, в свою чергу, перетворюється у внутрішню енергію, дисипація якої в навколишнє середовище спостерігається у вигляді теплового потоку. Отже, величина теплового потоку від газу в довкілля визначає міру розсіювання внутрішньої енергії газу і повинна впливати на ККД газопроводу. В наведеному прикладі експлуатації гіпотетичного газопроводу зміна теплового потоку в довкілля може моделюватися зміною температури газу в кінці газопроводу: чим більша кінцева температура газу, тим менший тепловий потік в навколишнє середовище. Як видно з графіка (рис. 1), зростання кінцевої температури газу призводить до збільшення ККД газопроводу, що відповідає уявленням про збереження і перетворення енергії газового потоку.

Якщо припустити (як це загальноприйнято під час енергетичного аналізу технічних систем [2]), що загальний ККД газопроводу η може бути представлений у вигляді добутку послідовно з'єднаних ланок (ГТУ-нагнітач-лінійна ділянка), то одержимо

$$\eta = \eta_{ГТУ} \eta_{ВН} \eta_{ЛД}$$

Звідки

$$\eta_{ЛД} = \frac{\eta}{\eta_{ГТУ} \eta_{ВН}} \quad (12)$$

де: $\eta_{ГТУ}, \eta_{ВН}, \eta_{ЛД}$ – ККД відповідно газотурбінної установки, відцентрового нагнітача та лінійної ділянки газопроводу.

Якщо прийняти в рамках аналізу роботи гіпотетичного газопроводу величину ККД ГТУ рівною 0,288, величину ККД відцентрового нагнітача рівній величині його політропічного ККД [3], який визначався в процесі проведення розрахунків, і числове значення котрого лежить в межах 0,76–0,81, то отримаємо у відповідності до (12) діапазон зміни ККД лінійної ділянки газопроводу 0,98–0,92. Зауважимо, що відношення величини втрат внутрішньої енергії з тепловим потоком в довкілля до загальної енергії, підведеної до газового потоку, лежить саме в такому діапазоні.

Таким чином, запропонована методика визначення коефіцієнта корисної дії магістрального газопроводу дає змогу проводити енергетичний аналіз його експлуатації як складної технічної системи і оптимізувати технологічні параметри роботи.

Література

- 1 Рауз Х. Механика жидкости. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. – 410 с.
- 2 Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 139 с.
- 3 Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. 4-е изд. / Пер. с нем. – М.: Машгиз, 1960. – 683 с.