

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ТРУБОПРОВІДНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ

Я.В. Грудз

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

Проведено аналіз рівняння енергії газового потоку в трубопроводі, на основі якого встановлено основні напрямки енергетичних втрат на транспортування газу. Виконано розрахунки для реальних режимів трансукраїнської газотранспортної систем, які дозволили встановити структуру енерговитрат. Показано, що основну частку енергетичних втрат на транспортування газу складають енерговитрати на подолання гідравлічного опору трубопровідної системи в умовах стаціонарного руху газового потоку. Значна енергія витрачається на підтримання трубопроводу в напруженому стані від дії внутрішнього тиску. Енерговитрати, пов'язані з нестационарним процесом газового потоку і викликані роботою інерційних сил, за величиною залежать від ступеня нестационарності газового потоку.

Ключові слова: газопровід, нестационарний режим, енерговитрати.

Проведен анализ уравнения энергии газового потока в трубопроводе, на основе которого установлены основные направления энергетических потерь при транспорте газа. Выполнены расчеты для реальных режимов трансукраинской газотранспортной систем, которые позволили установить структуру энергозатрат. Показано, что основную часть энергетических потерь на транспортировку газа составляют энергозатраты на преодоление гидравлического сопротивления трубопроводной системы в условиях стационарного движения газового потока. Значительная энергия тратится на поддержание трубопровода в напряженном состоянии от действия внутреннего давления. Энергозатраты, связанные с нестационарным процессом газового потока и вызванные работой инерционных сил за величиной зависят от степени нестационарности газового потока.

Ключевые слова: газопровод, нестационарный режим, расход энергии.

The analysis of energy equation of gas flow in the pipeline was conducted on the basis of which the main directions of energy costs in gas transit were determined. Calculations for the real-time mode trans-Ukrainian gas transport system were carried out that allowed to set up the structure of energy expenditures. It is shown that the major part of the energy costs for gas transportation constitutes the energy costs penetration of hydraulic resistance of the pipeline system in the stationary motion conditions of gas flow. Considerable part of energy is spent on the maintenance of the pipeline in stress conditions from the influence of the interior pressure. Energy expenditures associated with the non-stationary processes of gas flow, conditioned by the inertial forces depend, in terms of the magnitude, on the degree of non-stationary.

Keywords: gas pipeline, non-stationary mode, expense of energy.

Загальні енерговитрати на трубопровідне транспортування газу можна розділити на корисне використання енергії та енергетичні втрати. До корисного використання енергії слід віднести енергозатрати, спрямовані на забезпечення заданої пропускної здатності газопроводу в умовах стаціонарного руху газу. Таке твердження базується на основному призначенні газопроводу. До енергетичних втрат при транспортуванні слід віднести всі інші види енергозатрат.

Слід зауважити, що енергія газу в газовому потоці складається з потенціальної, кінетичної та внутрішньої. При русі газу відбуваються перетворення енергії з одного виду в інший та виникають дисипаційні процеси. З точки зору гідрогазодинаміки, при русі газу в трубах мають місце гідравлічні втрати енергії, суть яких зводиться до перетворення потенціальної енергії в кінетичну, а відтак у внутрішню, яка криїть стінки трубопроводу розсіюється в довкілля.

Енергетичний підхід до аналізу режимів роботи магістральних газопроводів застосовано в роботах Бобровського С.А.[1], Грудза В.Я. [2], Жидкової М.О. [3], Щербакова С.Г. [4], Яковлева Є.І. [5]. В цих роботах проведено

аналіз витрат енергії на транспортування газу в залежності від гідравлічних втрат у трубопроводі, наведено структуру енерговитрат в газовому потоці, запропоновано методику розрахунку енергоємності. Однак, низка проблем, пов'язаних з дисипацією енергії та загальним енергетичним балансом газопроводу, не знайшли відображення в літературі.

Зміна механічної енергії газу в газовому потоці може бути виражена залежністю

$$dE = d(pQ) \quad (1)$$

або

$$dE = dpQ + p dQ,$$

де E – механічна енергія газового потоку при тиску p і витраті Q .

Розглядаючи корисне використання енергії, зауважимо, що в такому випадку рух газу повинен відбуватися в умовах стаціонарного режиму, тому $Q = \text{const}$ і $dQ = 0$. Тому

$$dE = dpQ. \quad (2)$$

Диференціал тиску в умовах одновимірного стаціонарного руху газу

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx. \quad (3)$$

Використаємо диференціальне рівняння руху газу в формі

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \rho g \frac{dh}{dx} + \lambda \frac{\rho W^2}{2d} = 0. \quad (4)$$

Зауважимо, що перший член рівняння є градієнтом тиску в умовах одномірного руху газу, другий відображає інерційні втрати енергії, третій – гравітаційні втрати енергії, четвертий – гідравлічні втрати енергії на тертя потоку. Для стаціонарного руху газу в рівнинному трубопроводі отримаємо

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \lambda \frac{\rho W^2}{2d} = 0. \quad (5)$$

Тепер на основі (2), (3) та (5) отримаємо вираз для корисних енергозатрат

$$E_{\text{кор}} = \int_0^L Q \frac{\partial p}{\partial x} dx = \int_0^L \lambda Q \frac{\rho W^2}{2d} dx. \quad (6)$$

Виконавши лінеаризацію рівняння руху з коефіцієнтом $2a = \frac{\lambda W}{2d}$, після нескладних перетворень одержимо

$$E_{\text{кор}} = \frac{2aL}{F} M^2 \frac{zRT_{cp}}{p_{cp}}, \quad (7)$$

де F, L – площа поперечного перерізу і довжина ділянки газопроводу відповідно;

M – масова витрата газу;

z – коефіцієнт стисливості газу з газовою сталою R за середнього тиску p_{cp} та середньої температури T_{cp} .

До енергетичних втрат при транспортуванні газу з точки зору фізичних уявлень про процес слід віднести втрати механічної енергії, пов'язані з роботою сил тертя і перетворенням у внутрішню енергію з подальшим розсіюванням в довкілля, енергетичні втрати, пов'язані з дією сил інерції в потоці, та затрати енергії на підтримання напруженого стану трубопроводу.

Для визначення першого виду енерговтрат скористаємося рівнянням енергії газового потоку

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -W \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{T\rho \frac{\partial c_p}{\partial T} + \rho c_p} \times \quad (8)$$

$$\times \left(\rho \frac{\partial W}{\partial x} \left(c_p T + \rho T \frac{\partial c_p}{\partial p} \right) + \xi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial \xi}{\partial p} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\pi D \alpha_1}{c_p r_c F_c} (T_c - T) - \frac{g W}{c_p} \frac{dh}{dx} \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) =$$

$$= \frac{\xi_c}{\rho c_p c_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\pi D \alpha_2}{c_p \rho c F_c} (T_{\text{нав}} - T_c) + \frac{\pi D \alpha_2}{c_p \rho c F_c} (T - T_c)$$

Тут, крім зазначених вище позначень, прийнято: c_p, c_c – ізобарна теплоємність газу та теплоємного матеріалу труб; $T_{\text{нав}}, T_c$ – темпера-

тура навколишнього середовища і стінки трубопроводу; α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від газу до стінки і від стінки в навколишнє середовище; D, d – зовнішній і внутрішній діаметри труби; ξ, ξ_c – коефіцієнти теплопровідності газу і стінки труби; F, F_c – площа перерізу трубопроводу і стінки; $\chi = \frac{\xi}{\rho c_p}$; h – геодезична

позначка траси газопроводу.

Останні два члени рівняння характеризують теплообмін між газом та навколишнім середовищем, причому останній член характеризує тепловіддачу від газу до стінки трубопроводу, а передостанній – від стінки в довкілля.

Зауважимо, що рівняння (8) характеризує неізотермічний нестационарний процес у найбільш загальному вигляді. Через надзвичайну складність рівняння неможливо отримати точний розв'язок для обчислення величини дисипації енергії газового потоку. Тому можливі два шляхи практичного використання результатів аналізу рівняння енергії. Перший полягає у встановленні критеріїв подібності для проведення фізичного моделювання неізотермічних процесів.

Ліва частина рівняння містить члени, що враховують характер перетворення механічної енергії газового потоку у внутрішню енергію газу, а права частина відповідає розсіюванню внутрішньої енергії за рахунок теплообміну з довкіллям. Відношення останнього члена рівняння, який характеризує теплообмін з довкіллям, до першого члена, що характеризує процес перетворення механічної енергії в теплову, можна розглядати як основну характеристику термогазодинамічного процесу. Тому таке відношення може вважатися критерієм подібності процесів дисипації енергії. Запишемо вказане співвідношення у вигляді

$$\Lambda = \frac{\frac{\pi D \alpha_2}{c_p F} (T_{\text{нав}} - T)}{\rho \frac{\partial W}{\partial x} (c_p T + \rho T \frac{\partial c_p}{\partial p})}. \quad (9)$$

Очевидно, що повний теплообмін з довкіллям повинен характеризуватися повним коефіцієнтом теплопередачі від газу до ґрунту, тому в (9) доцільно замінити коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки труби α_2 на коефіцієнт теплопередачі k .

Використовуючи правила приведення диференціальних операторів, одержимо

$$\frac{\partial W}{\partial x} \Rightarrow \frac{W}{x}; \frac{\partial c_p}{\partial p} \Rightarrow \frac{c_p}{p}.$$

Тоді, з урахуванням рівняння газового стану на основі (9), матимемо

$$\Lambda = \frac{Dk(T_{cp} - T)}{\rho W c_p T x} = \frac{Dk(T_{cp} - T) \gamma R T}{p W c_p T x},$$

де γ – показник політропи термогазодинамічного процесу; R – газова стала.

Приймаючи характерний розмір системи x рівним зовнішньому діаметру газопроводу, лінійну швидкість газу – середньозваженій лінійній швидкості по перерізу труби, тиск і температуру – середнім значенням по довжині, одержимо

$$\Lambda = \frac{k(T_{cp} - T)W}{p_{cp}c_pT_{cp}}. \quad (10)$$

В отриманій залежності швидкість розповсюдження хвилі тиску $c = \sqrt{\gamma RT}$ замінено характерною швидкістю газового потоку W .

Легко помітити, що отриманий комплекс є безрозмірним, отриманим на основі класичного рівняння, яке відображає закон збереження і перетворення енергії, тому він може вважатися критерієм подібності дисипації енергії в газових потоках.

Наближена оцінка втрат внутрішньої енергії газу у вигляді теплопередачі від газу в довкільля можлива шляхом об'єднання двох останніх членів та використання поняття повного коефіцієнта теплопередачі від газу до навколишнього середовища на основі закону теплопередачі Ньютона. Тому дисипативні втрати енергії можна наближено оцінити залежністю

$$E_{дис} = \pi k D L (T_{cp} - T_{дов}), \quad (11)$$

де D, L – зовнішній діаметр і довжина газопроводу відповідно;

$T_{cp}, T_{дов}$ – середня температура газу в газопроводі та температура довкільля відповідно; k – повний коефіцієнт теплопередачі від газу в довкільля

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\xi_c} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (12)$$

З іншого боку, виходячи з рівняння балансу тепла, зміна внутрішньої енергії газового потоку на ділянці газопроводу визначається різницею початкової T_H та кінцевої T_K температур:

$$\Delta E_{вн} = M c_p (T_H - T_K). \quad (13)$$

Використовуючи (11), (12), (13) та формулу середньої температури газу в газопроводі, можна визначити з певним наближенням дисипативні втрати енергії під час транспортування газу.

При транспортуванні газу магістральним газопроводом внаслідок високого тиску в порожнині труб метал стінки постійно перебуває в напруженому стані, на що витрачається певна частина енергії газового потоку. Напружений стан трубопроводу можна вважати плоским [1], що характеризується кільцевими σ_K та поздовжніми σ_N напруженнями, які визначаються величиною внутрішнього тиску

$$\sigma_K = \frac{p d}{2\delta}; \quad \sigma_N = 0,25 \frac{p d}{\delta}. \quad (14)$$

Питома потенціальна енергія формозміни в умовах напружено-деформованого стану стінок трубопроводу в загальному вигляді трохвимірної моделі може бути визначена з залежності

$$u_\phi = \frac{1+\mu}{3E} \times \quad (15)$$

$$\times [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\varpi_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3)],$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль Юнга.

Для плоского напруженого стану матимемо

$$u_\phi = \frac{1+\mu}{3E} [\sigma_K^2 + \sigma_N^2 - \varpi_K \sigma_N]. \quad (16)$$

Повна витрата енергії на підтримання напружено-деформованого стану газопроводу складає

$$U = \int_V u_\phi dV, \quad (17)$$

де V – загальний об'єм металу стінок трубопроводу товщиною δ ,

$$V = \pi D \delta L.$$

Скориставшись (16) і (17), можна розрахувати витрату енергії, що витрачається на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу.

Слід також зауважити, що в загальному випадку руху газу можуть мати місце втрати енергії, пов'язані з дією сил інерції в газовому потоці $\Delta E_{ин}$ (для умов нестационарного руху газу). Питомі інерційні втрати енергії наближено можна оцінити на основі рівняння руху газу в вигляді (4)

$$\left(\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} \right)_{cp} = \frac{1}{FT} \int_0^T |M_{t=0} - M_{t=T}| dt, \quad (18)$$

де T – тривалість нестационарного процесу.

Отже енергетичний баланс для потоку газу в газопроводі може бути поданий як сума усіх втрат енергії

$$E = E_{кор} + \Delta E_{вн} + U + \Delta E_{ин}. \quad (19)$$

Якщо виключити з цього балансу інерційні втрати, характерні для нестационарних процесів у газопроводі, то можна чисельно оцінити у відсотковому співвідношенні максимально можливу частку корисних затрат енергії при транспортуванні газу.

Як приклад розглянемо розрахунки гіпотетичного газопроводу довжиною 127 км і діаметром 1420x20 мм, що за параметрами наближається до ділянки Гусятин-Богородчани газопроводу Уренгой-Помари-Ужгород. В розрахунках було прийнято початковий тиск 7,6 МПа, кінцевий – 5,1 МПа, початкову температуру – 313К, температуру ґрунту – 281К, транспортований газ – метан. Розрахункова масова витрата газу склала 625,7 кг/с, середній тиск – 6,43 МПа, середня температура – 307К. За таких умов розрахункові витрати корисної енергії склали 2,496 МВт, дисипативні втрати енергії – 6,259 МВт, витрати енергії на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу 0,234 МВт. Загальні витрати енергії як сума вказаних становлять 8,989 МВт. Таким чином, максимальне значення корисних витрат енергії

Таблиця 1 – Енергетичний баланс газопроводу

№ з/п	P_H / P_K	t_H / t_K	E	$E_{кор}$		$E_{дис}$		E_{IH}		U	
	МПа	°C	МВт	МВт	%	МВт	%	МВт	%	МВт	%
1	7,60/5,10	40/32	8,989	2,496	27,76	6,259	69,63	0	0	0,234	2,61
2	6,68/4,91	38/30	9,943	2,355	23,68	6,447	64,84	0,932	9,37	0,209	2,10
3	6,47/4,78	40/26	10,301	2,396	23,26	6,474	62,84	1,229	11,93	0,202	1,96
4	7,11/4,95	39/30	9,477	2,372	25,03	5,727	60,43	1,167	12,31	0,211	2,23
5	6,64/4,82	40/31	10,515	2,411	22,93	6,743	64,13	1,156	10,99	0,205	1,95
6	6,65/4,83	39/32	9,998	2,284	22,84	6,311	63,12	1,197	11,97	0,206	2,06
7	6,66/4,81	40/30	9,417	2,269	24,09	6,111	64,89	0,831	8,82	0,206	2,19
8	6,67/4,82	40/22	9,904	2,091	21,11	6,939	70,06	0,677	6,73	0,207	2,09
9	6,69/4,92	40/31	10,193	2,062	20,23	6,795	66,66	1,126	11,05	0,210	2,06
10	6,70/4,91	40/29	10,557	2,311	21,89	7,308	69,22	0,727	6,89	0,211	1,99
11	6,67/4,90	40/27	10,030	2,289	22,82	6,947	69,26	0,586	5,84	0,208	2,07
12	6,68/4,81	38/26	10,678	2,219	20,78	7,109	66,58	1,142	10,69	0,207	1,95
13	6,69/4,85	39/27	9,524	2,208	23,18	6,316	66,32	0,788	8,27	0,212	2,22
14	6,76/4,92	40/30	10,448	2,331	22,31	7,179	68,71	0,723	6,92	0,215	2,06
15	6,63/4,81	40/29	10,805	2,233	20,57	7,174	66,39	1,204	11,14	0,204	1,89
16	6,68/4,91	40/28	10,624	2,236	21,05	7,051	66,37	1,128	11,75	0,209	1,97
17	6,71/4,89	40/34	9,944	2,191	22,03	6,243	62,78	1,299	13,06	0,211	2,12

в даному випадку складає 27,76%, дисипативні втрати складають 69,63%, а затрати на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу – 2,61%.

З метою оцінки впливу інерційних втрат на загальний енергобаланс було розглянуто 17 реальних режимів газопроводу Уренгой-Помари-Ужгород на ділянці Гусятин-Богородчани. Результати розрахунків подано в табл. 1. Як свідчать результати розрахунків, відносна величина корисних витрат енергії на транспортування газу реальним газопроводом в залежності від режиму коливається в межах 21,05–24,09%, причому для ідеального режиму гіпотетичного газопроводу ця величина становить 27,76%. Витрати енергії на підтримання напружено-деформованого стану реального газопроводу коливаються в межах 2,23–1,89% й зі збільшенням середнього тиску зростають. Найбільшу частку у загальному балансі енерговитрат займають дисипативні втрати енергії, пов'язані з теплообміном між газовим потоком у трубах та навколишнім середовищем. Величина цих втрат енергії для реального газопроводу залежно від температурного режиму коливається в межах 62,78–70,06%. Зауважимо, що для ідеального стаціонарного режиму газопроводу ці втрати склали 69,63%.

Отже, в реальних випадках при квазістаціонарних і нестационарних режимах величина дисипативних втрат енергії може як зростати, так і зменшуватися.

Інерційні втрати енергії виникають при нестационарних режимах. Однак, проведені дослідження показали, що в газопроводах великого діаметру вони мають місце і при квазістаціонарній течії газу. За даними розрахунків величини інерційних втрат енергії коливаються в межах 5,84–13,06%.

Результати проведених досліджень довели, що частка витрат енергії на забезпечення заданої пропускної здатності газопроводу незначна в порівнянні з енергетичними втратами на транспортування газу. Енергозатрати на підтримання напружено-деформованого стану трубопроводу незначні, і їх скоротити практично неможливо. Найбільш вагомими є дисипативні та інерційні втрати енергії, скорочення яких дасть змогу підвищити енергоефективність трубопроводного транспорту газу.

Література

- 1 Бобровский С.А. Трубопроводный транспорт газа / С.А.Бобровский, С.Г.Щербаков, Е.И.Яковлев и др. – М.: Наука, 1976. – 491 с.
- 2 Ковалко М.П. Трубопроводный транспорт газа / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. – Київ: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
- 3 Жидкова М. А. Трубопроводный транспорт газа. – Киев: Наукова думка, 1973. – 142 с.
- 4 Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С.Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 206 с.
- 5 Яковлев Е.И. Анализ неуставившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1968. – № 2. – С.72–76.
- 6 Роуз Х. Механика жидкости. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. – 410 с.
- 7 Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 139 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
27.08.12
Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.