

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТУРБОДЕТАНДЕРІВ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ПРУЖНОЇ ЕНЕРГІЇ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Л.Ю.Козак, Б.В. Долишній

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42351  
e-mail: kozakl@ifdtung.if.ua

*Рассматриваются вопросы энергосбережения в газотранспортной системе. При использовании турбодетандерных установок для утилизации упругой энергии сжатого природного газа необходим дополнительно источник низкопотенциальной теплоты. Предлагается в отсутствие такого использовать газовые двигатели, которые, сжигая природный газ, будут вырабатывать дополнительную электроэнергию, а их выхлопные газы и телота системы охлаждения одновременно будут служить источником низкопотенциальной теплоты.*

*In the article are considered questions energy saving when natural gas are transported by pipeline. When using the expander machine installation for salvaging a springy energy of compressed natural gas it is necessary addition source of low potential heat. When addition source of low potential heat absences is offered to use gas engines. The gas engines will burn natural gas and will produce an additional electric power and will simultaneously of source of low potential heat.*

Одним із заходів з енергозаощадження є використання пружної енергії стиснутого природного газу, що транспортується магістральними газопроводами. З цією метою на газорозподільних станціях (ГРС) і газорозподільних пунктах (ГРП) установлюють турбодетандерні установки (ТДУ), які перетворюють пружну енергію газу у механічну з подальшим перетворенням її у електричну енергію. Це дає можливість одержувати екологічно чисту електроенергію без спалювання палива практично з нічого, оскільки пружна енергія стиснутого природного газу сьогодні розсіюється у навколишнє середовище при пониженні тиску газу дроселюючими клапанами-регуляторами прямої дії [1,2].

Ідея використання практично дармової енергії тиску газу відома давно, але її реалізація є обмеженою, що пов'язано з низкою проблем. Однією з таких проблем є значне зниження температури природного газу через зменшення його внутрішньої енергії при виконанні механічної роботи. Зниження температури природного газу спричинює виділення гідратів у вигляді твердої фази, зовнішнє і внутрішнє обмерзання труб і арматури, що ускладнює експлуатацію газопроводів. Тому при використанні ТДУ для усунення цієї проблеми необхідне підігрівання газу.

Метою нашого дослідження є термодинамічний аналіз енергетичного балансу роботи ТДУ за умови забезпечення експлуатаційних показників. Для цього нами розраховані і співставлені показники вироблюваної ТДУ потужності електроенергії і необхідного теплового потоку для підігрівання природного газу до нормальної експлуатаційної температури. Розрахунок потужності пружної енергії при витраті природного газу = 1 кг/с (5 тис. м<sup>3</sup> за год) виконаний на основі термодинамічного аналізу політропного процесу розширення газу, близького до адиабатного (показник політропи  $n = 1.25$ ), з використанням ПК і стандартної програми

MathCAD. Вихідні дані були вибрані такі: початковий тиск природного газу  $P_1 = 1.5$  МПа, кінцевий тиск  $P_2 = 0.3$  МПа, початкова температура  $T_n = 300$  К (27 °С), кінцева  $T_k = 280$  °С.

Для початку визначимо температуру, яку буде мати природний газ за умови розширення адиабатно у турбодетандері (ТД). Для цього використаємо співвідношення параметрів газу у адиабатному процесі

$$T_2 = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left( \frac{1.5}{0.3} \right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 207 \text{ К}. \quad (1)$$

У реальності температура газу буде дещо вища, оскільки газ буде підігріватись частково за рахунок тепла, що поступає від стінок ТД і трубопроводу. Вважаючи процес політропним з показником політропи  $n = 1.25$ , температура газу на виході становитиме близько 220 К (-50°С). Очевидно, що ця температура є значно нижчою за допустиму за умовами експлуатації (5-10°С).

Механічну енергію, яку можна виробити при розширенні 1 кг природного газу, що розширюється в турбодетандері за заданих перепадів тиску і температури, можна визначити за формулою

$$A = l \times \eta, \quad (2)$$

де:  $l$  – теоретично можлива робота адиабатного розширення 1 кг газу;

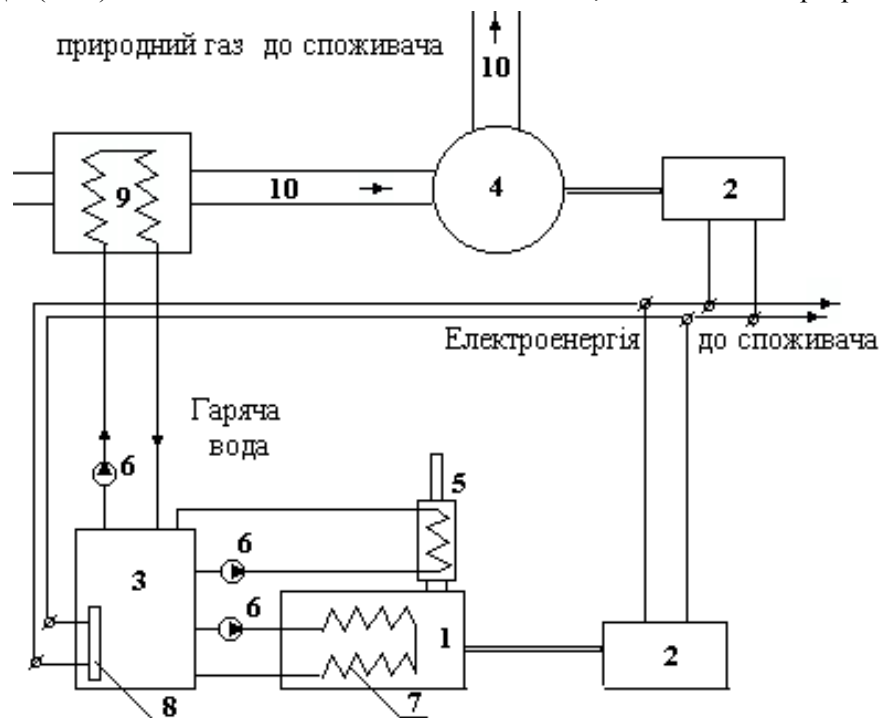
$\eta = 0.8$  – коефіцієнт корисної дії турбодетандера.

Теоретично можлива робота адиабатного розширення 1 кг газу становить

$$l = R \cdot \frac{T_1}{(k-1)} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \right] = \\ = 520 \cdot \frac{300}{1.3-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1.5}{0.3} \right)^{(k-1)/k} \right] = 172 \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

де  $R = 520 \text{ Дж/(кг К)}$  – питома газова стала.

Отже, відповідно до розрахунків кількість



1 – двигун; 2 – генератор; 3 – сміть з гарячою водою; 4 – турбодетандер;  
5 – система підігріву води відпрацьованими газами двигуна; 6 – насоси;  
7 – система охолодження двигуна; 8 – електротени; 9 – підігрівач газу

**Рисунок 1 – Схема генерції електроенергії турбодетандерною установкою і газовим двигуном на ГРС**

Враховуючи ККД турбодетандера ( $\eta=0,8$ ), потужність, яку виробляє ТДУ при витраті газу  $1 \text{ кг/с}$ , становить

$$N = l \cdot \eta \cdot \frac{1}{c} = 172 \cdot 0,8 \cdot \frac{1}{c} = 137,4 \text{ кВт.}$$

Таким чином, при заданих термодинамічних параметрах природного газу і витраті природно газу  $1 \text{ кг/с}$  можна генерувати понад  $100 \text{ кВт}$  електроенергії, але за умовами експлуатації температура газу на виході є низькою (близько  $-60^\circ\text{C}$ ), тому необхідно газ підігрівати до температури  $10^\circ\text{C}$ . Для цього величину теплового потоку визначимо з рівняння

$$Q = m \cdot C \cdot (T_1 - T_2) = 1 \cdot 1,650 \cdot [10 - (-60)] = 115,5 \text{ кВт,} \quad (4)$$

де  $C = 1650 \text{ Дж/(кг К)}$  – питома середня ізобарна теплоємність природного газу.

Для забезпечення такого теплового потоку необхідно спалювати природний газ, кількість якого визначається за формулою

$$Q = \frac{Q}{C_u \cdot \mu} = \frac{115,5}{34000 \cdot 0,8} = 0,00425 \text{ м}^3/\text{с,} \quad (5)$$

де  $C_u = 34 \text{ МДж/м}^3$  – теплотворна здатність природного газу;

$\mu = 0,8$  – ККД теплогенератора.

Протягом року необхідна кількість природного газу для спалювання буде становити  $134 \text{ тис. м}^3$ .

теплоти, яка необхідна для підігріву газу до відповідної температури, є близькою до кількості електроенергії, яку можна одержати внаслідок використання пружної енергії газу. Відповідно до одержаних результатів при витраті газу  $120 \text{ тис. м}^3$  за добу і п'ятикратному перепаді тисків турбодетандерна установка, коефіцієнт корисної дії якої рівний  $0,8$ , може виробляти електроенергію потужністю  $137 \text{ кВт}$ . При розширенні газу у турбодетандері його температура знижується від  $T = 300 \text{ К}$  до  $217 \text{ К}$ . Для відновлення початкової температури природного газу, що проходить через турбодетандер, необхідно забезпечити тепловий потік потужністю  $116 \text{ кВт}$ . Тому для роботи турбодетандера чи дроселюванні газу зі значним перепадом тисків необхідним є джерело теплоти з температурою  $30-50^\circ\text{C}$ . У випадку установлення на ГРС чи ГРП турбодетандерних установок використовують низькопотенціальну теплоту, наприклад, оборотної води, яка використовується для технологічних потреб виробництва або на теплоелектростанціях. Без вторинної теплоти використання турбодетандерних установок є неефективним, оскільки для їх нормальної роботи і генерування електроенергії необхідно буде спалювати природний газ для забезпечення необхідної робочої температури газу після його розширення в ТДУ. Оскільки більшість ГРС відсутні джерела вторинної теплоти, то забезпечення ефективної роботи турбодетандерних установок проблематичне.

З другого боку, зниження температури природного газу також має місце і при його дроселюванні, що викликано різким зниженням тиску газу. Тому на багатьох ГРС, де тиск газу знижується дроселюючими клапанами-регуляторами, встановлюють спеціальні пристрої для підігрівання природного газу, в яких частина цього газу спалюється. Тому на таких ГРС пропонується встановлювати турбодетандерні установки за відсутності вторинних джерел теплоти. А ефективність використання пружної енергії природного газу для виробництва електроенергії за відсутності джерел вторинної теплоти можна підвищити шляхом додаткового виробництва електроенергії за допомогою газових двигунів з генераторами. При цьому тепло, яке викидатимуть газові двигуни (близько 60-70%), можна використати як вторинне для підігріву природного газу, який проходить через установку. На рис. 1 наведена схема такої системи. Газовий двигун 1 і турбодетандер 4 з генераторами 2 виробляють електроенергію, яка подається споживачеві. Природний газ по трубопроводах 10 подається на підігрівач 9 і на турбодетандер 4. Після падіння тиску газу в турбодетандері він подається до споживача.

Електроенергія, яку виробляє турбодетандер 4 і газовий двигун 1, подається споживачеві. При частковому її використанні надлишок споживається для нагрівання води теном 8. Крім електроенергії, газовий двигун є джерелом вторинної теплоти. Вода з системи охолодження 7 двигуна передається в ємність 3. Частина її потрапляє в систему підігріву 5, де за рахунок високотемпературної (170-190°C) теплоти відпрацьованих газів одержує додаткову теплоту. З ємності 3 гаряча вода подається в підігрівач газу 9.

Спалюючи газ у газових двигунах, можна одержувати додаткову механічну енергію для виробництва електроенергії. Для заданих вище умов з даної кількості газу, що буде спалюватись, можна буде виробляти механічну енергію потужністю, яку визначимо за формулою

$$N = V \cdot C_u \cdot \eta = 4.25 \cdot 10^3 \cdot 32 \cdot 10^6 \cdot 0.3 = 50.6 \text{ кВт}, \quad (6)$$

де:  $V$  – секундна витрата газу;

$C_u$  – теплотворна здатність газу;

$\eta$  – середній ККД газового двигуна.

Таким чином, затративши на 30% більше природного газу, що спалюється з метою підігріву газу, можна додатково виробляти електроенергію потужністю близько 50 кВт.

Особливістю запропонованої схеми є також те, що природний газ підігривається на вході ТДУ, що сприяє збільшенню механічної енергії на робочому валі турбодетандера. У цьому випадку температура, до якої необхідно підігрівати газ для того, щоб після його розширення в ТД він охолоджувався не нижче 10°C, буде

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-n}{n}} = 283 \cdot \left( \frac{1.5}{0.3} \right)^{1.2} = 370.1 \text{ K} \quad (6)$$

Тоді потужність, яку вироблятиме ТДУ враховується за формулами (2) і (3) становитиме близько 180 кВт. Враховуючи потужність, яку вироблятимуть газові двигуни, сумарна потужність комплексної ТДУ з газовим двигуном дасть змогу виробляти близько 230 кВт електроенергії при дроселюванні 1 кг/с природного газу.

Запропонована схема є високоєфективною для ГРС, віддалених від джерел вторинної теплоти, на яких при дроселюванні природного газу доводиться додатково спалювати газ для підігріву.

Встановлення турбодетандерної установки і газового двигуна дасть змогу одержати значну кількість дешевої електроенергії і забезпечить ефективне використання природного газу, що спалюється. На сьогодні у масштабах газотранспортної системи України величезна кількість пружної енергії природного газу при дроселюванні розсіюється в атмосферу, і при цьому додатково втрачається природний газ для відновлення його експлуатаційних параметрів після дроселювання.

### Література

1. Козак Л.Ю., Слободян В.І. Застосування турбодетандерних установок з струменевореактивною турбіною для утилізації пружної енергії стиснутого природного газу // Матеріали 6-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Нафта і газ України – 2000» 31 жовтня – 3 листопада 2000 року. – Івано-Франківськ, 2000. – С.124-126.

2. Грудз В.Я., Козак Л.Ю., Лютак З.П., Слободян В.І. Рекуперація енергії при транспортуванні газу магістральними трубопроводами // Матеріали науково-практичної конференції факультету нафтогазопроводів 7-8 травня 1998 року. – Івано-Франківськ, 1998. – С.48-49

3. Долішній Б.В., Козак Ф.В. Про утилізацію теплоти відхідних газів двигуна внутрішнього згоряння // Вісник державного університету «Львівська політехніка». – Львів, 1998. – С. 92-94.