№ 2(46) 2026



НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 14.09.2026. Прорецензовано 29.10.2026. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 622.612.52 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-70-77**

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗОСЕРЕДЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ГАЗОПРОВОДУ ЗА УМОВ НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ

Грудз Я. В.*
Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу)
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3287-3036
e-mail: yaroslav.hrudz@nung.edu.ua

Терефенко Н. Р.
Аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу)
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0009-0000-2359-9958
e-mail: nazarii.terefenko-a18522@nung.edu.ua

Анотація. Розглядається енергоефективність та експлуатаційна надійність газотранспортної системи з точки зору забезпечення споживачів енергоносіями в заданих обсягах. Метою дослідження є встановлення закономірностей і оцінка впливу експлуатаційних параметрів зосереджених об'єктів лінійної частини магістрального газопроводу, зокрема повітряних переходів, на енергоефективність транспортування газу та вплив тренду технічного стану газотранспортних систем. На їх основі розроблено принципи прогнозування часу безаварійної експлуатації і термінів проведення технічного обслуговування для забезпечення заданого рівня надійності. Отримана математична модель визначення енергоефективності та надійності газотранспортної системи на основі найпростішого потоку відмов лінійної частини і систем контролю, показано і розглянуто на практичному прикладі методику розрахунку коефіцієнта корисної дії зосереджених об'єктів лінійної частини трубопровідної системи, зокрема, повітряних переходів, для забезпечення заданої енергоефективності та надійності газопостачання На основі проведених досліджень у виробничих умовах встановлено закономірності впливу зовнішніх факторів, зокрема барометричного тиску, температури і вологості атмосферного повітря, а також відносної густини паливного газу на економічність транспортування газу, що дозволить забезпечити ефективну роботу газотранспортної системи. Показано на підставі статистичних досліджень, що вплив природних факторів залежить відмов проходження траси газопроводу, збільшення продуктивності газопроводу призводить до зростання коефіцієнта корисної дії повітряного переходу незалежно від його розміщення на трасі, при цьому зростання тиску на початку переходу також призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії, оскільки в обох випадках зростає корисна робота сил опору газопроводу, спрямована на підтримання його продуктивності. Зниження температури довкілля викликає зростання теплових енерговитрат, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії повітряного переходу.

Ключові слова: газотранспортна система, зосереджені об'єкти, енергоефективність, коефіцієнт корисної дії, надійність, технічне дослідження, системи контролю.

Запропоноване посилання: Грудз, В. Я. & Терефенко, Н. Р. (2026). Прогнозування енергоефективності зосереджених об'єктів газопроводу за умов неповного завантаження. Нафтогазова енергетика, 2(46), 70-77. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-70-77.

* Відповідальний автор

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Вступ

Магістральні газонафтопроводи належать до об'єктів підвищеної небезпеки з огляду на їхній екологічний та економічний вплив на довкілля. Тому при їх експлуатації особливу увагу приділяється встановленню закономірностей процесу старіння лінійної частини магістральних газопроводів в період їх тривалої експлуатації, оцінки показників енергоефективності експлуатації окремих елементів і газотранспортної системи в цілому[1]..

Технічний стан газопроводів визначається показниками надійності та енергоефективності, які залежать від параметрів режиму роботи і особливо від їх коливання в часі. Тому неповне завантаження газотранспортної системи призводить до зниження надійності і енергоефективності внаслідок частотних коливань тиску, які викликають динамічні напруження стінок труби і втрати енергії за рахунок роботи інерційних сил в потоці. Це обумовлює можливість пришвидшення процесів внутрішньої корозії, виникнення стрес-корозії, що в кінцевому результаті призведе до зниження енергоефективності та появи малих аварійних витоків газу [2].

Для прогнозування енергоефективності системи транспорту газу в умовах зміни режимів експлуатації важливо оцінити стан трубопроводів з метою вибору оптимального енергозберігаючого режиму експлуатації [3]. Така задача вимагає проведення детального обстеження елементів газотранспортної системи для оцінки надійності газопостачання і прогнозування обслуговування системи для підтримання її на належному рівні. Тому актуальним питанням є створення методик оцінки технічного стану газотранспортної системи і оперативного прогнозування принципів і заходів підтримання його працездатним [4].

На основі проведених досліджень у виробничих умовах необхідно встановити закономірності впливу зовнішніх факторів, зокрема атмосферного тиску, температури і вологості повітря, а також відносної густини паливного газу на потужність і економічність газоперекачувальних агрегатів, що дозволить забезпечити енергоефективну роботу лінійної частини як елемента газотранспортної системи, на підставі статистичних досліджень слід встановити вплив природних чинників на залежить відмов складних елементів траси газопроводу і енергетичні її характеристики [5].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Дослідженню енергоефективності і надійності роботи газотранспортних систем в умовах експлуатації присвячено роботи Б.В. Будзуляка, В.Я. Грудза, В.Б. Запухляка, М.О. Жидкової, Я.Д. П'янила, Є.В. Харченка. О.М. Химко та багатьох інших. Ними розглянуто режими роботи газопроводів, можливості регулювання, динаміка роботи, вивчені аспекти розрахунків енергоефективності та надійності та методи їх підвищення. В [6] для оцінки енергоефективності трубопровідного транспорту газу запропоновано використати коефіцієнт корисної дії (ККД) газотранспортної системи, наведено принципи розрахунку його значення, вказано, що загальне значення ККД системи можна подати у вигляді добутку ККД кожного з її елементів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Актуальною є також задача оцінки впливу технічного стану об'єктів газотранспортної системи (зокрема аварійних витоків з трубопроводу) на її надійність та енергоефективність [7]. З огляду на це проблема оцінювання енергоефективності окремих елементів газотранспортного комплексу є актуальною [8].

Метою та завданням досліджень є оцінювання впливу експлуатаційних параметрів зосереджених об'єктів лінійної частини магістрального газопроводу, зокрема повітряних переходів, на енергоефективність транспортування газу.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Протяжність повітряних переходів газопроводу суттєво менша за загальну довжину ділянки газопроводу між КС, тому їх можна вважати зосередженими об'єктами. Особливістю повітряних переходів в порівнянні з підземними ділянками траси є порівняно швидка зміна умов енергообміну з довкіллям, що призводить до динаміки зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) переходу в часі.

Для кожного зі встановлених зосереджених об'єктів газопроводу коефіцієнт корисної дії визначався як відношення корисної роботи потоку газу, спрямованої на забезпечення пропускної здатності газопроводу, до загальних енерговитрат [9,11]. Побудова математичної моделі реалізації поставленої задачі базується на принципах системного підходу.

Товщина труби та ізоляції на повітряних переходах у порівнянні з їх діаметрами (внутрішнім d_1 і зовнішнім d_2) є малими величинами, у зв'язку з цим труба і її ізоляція можуть розглядатися як тонкі оболонки, що дає змогу отримати умову теплообміну на межі ізоляція-довкілля і значно спростити задачу теплообміну.

Задачу теплопровідності для тришарової конструкції, що нагрівається газом, який рухається в трубі, формулюють так:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}=\left[\frac{1}{a_1}+\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{1}{a_{i+1}}-\frac{1}{a_i}\right)S_-\left(r-r_i\right)\right]\frac{\partial T}{\partial \tau}-$$

$$-\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{\lambda_t^{(i+1)}}{\lambda_t^{(i)}}-1\right)\delta_-\left(r-r_i\right)\frac{\partial T}{\partial r}/_{r=r_i-0}, \qquad (1)$$

$$T(r,0)=0,\ \lambda_t^{(1)}\frac{\partial T}{\partial r}/_{r=r_0}=\alpha\left(T-T_г\right)/_{r=r_0},$$

$$T/_{r\to\infty}\neq\infty, \qquad (2)$$

де T – температура в точках тришарового тіла;

r – радіальна координата точок тіла;

$\lambda_t^{(i)}, a_i$ – коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності для матеріалу i-го шару;

τ – час;

$S_-\left(r-r_i\right)$ – асиметрична одинична функція:

$$\left(S_-\left(x\right)=\begin{cases}1, x\geq 0\\ 0, x, <0\end{cases}\right);\ \delta_-\left(r-r_i\right)=\frac{dS_-\left(r-r_i\right)}{dr};$$

α – коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки труби;

$T_{г\,в}$ – температура газу.

Користуючись рівняннями (1) і (2), записуємо задачу теплопровідності для двошарової конструкції труба-ізоляція

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T^*}{\partial r}=\left[\frac{1}{a_1}+\left(\frac{1}{a_2}-\frac{1}{a_1}\right)S_-\left(r-r_1\right)\right]\frac{\partial T^*}{\partial \tau}+$$

$$+\left(1-\frac{\lambda_t^{(2)}}{\lambda_t^{(1)}}\right)\frac{\partial T^*}{\partial r}/_{r=r_1-0}\ \delta_-\left(r-r_1\right), \qquad (3)$$

$$T^*\left(r,0\right)=0,\ \lambda_t^{(1)}\frac{\partial T}{\partial r}/_{r=r_0}=\alpha\left(T^*-T_г\right)/_{r=r_0}, \qquad (4)$$

де T^* – температурне поле у двошаровій конструкції труба-ізоляція.

До рівнянь (3) і (4) необхідно додати умови ідеального контакту між ізоляцією та довкіллям

$$T^*/_{r=r_2}=T/_{r=r_2},\ \lambda_t^{(2)}\frac{\partial T^*}{\partial r}=\lambda_t^{(3)}\frac{\partial T}{\partial r}$$

$$\text{при } r=r_2. \qquad (5)$$

При виводі умови теплообміну між двошаровою оболонкою труба-ізоляція і довкіллям використовуємо криволінійну систему координат (s, n) [10] (s – відстань вздовж границі між двошаровою оболонкою і довкіллям від певного положення $s=0$, n – відстань до будь якої точки двошарової оболонки по нормалі від границі між трубою і ізоляцією).

Тепер рівняння теплопровідності (3) набуває вигляду

$$\frac{d^2T^*}{dn^2}+p^2T^*=B\delta_-\left(n\right), \qquad (6)$$

де $B=\left(1-\frac{\lambda_t^{(2)}}{\lambda_t^{(1)}}\right)\frac{dT^*}{dn}/_{n=0}$.

Розв'язок неоднорідного рівняння (6) має вигляд

$$T^*=D_1\cos pn+D_2\sin pn+\frac{B}{p}S_-(n)\sin pn. \qquad (7)$$

Або після знаходження величини B

$$T^*=D_1\cos pn+D_2\sin pn+$$

$$+D_2\left(\frac{\lambda_t^{(1)}}{\lambda_t^{(2)}}-1\right)S_-\left(n\right)\sin pn. \qquad (8)$$

Для знаходження сталих інтегрування використовуємо умови (5) і (6). При цьому після спрощення одержуємо

$$-\alpha\left(\frac{\delta_2}{\lambda_t^{(2)}}+\frac{\delta_1}{\lambda_t^{(1)}}+\frac{1}{\alpha}\right)\lambda_t^{(3)}\frac{\partial T}{\partial n}_{/n=\delta_2}= \qquad (9)$$

$$=\left[\lambda_t^{(2)}\delta_2\left(1+\frac{\alpha\delta_1}{\lambda_t^{(1)}}\right)+\lambda_t^{(1)}\delta_1\right]p^2T/_{n=\delta_2}-\alpha\left(T_{/n=\delta_2}-T_г\right),$$

$$\lambda_t^{(3)}\frac{\partial T}{\partial n}_{/n=\delta_2}=\frac{\alpha_c}{\alpha}C_2\left[\left(1+Bi_1\right)+\frac{\Lambda_1}{\Lambda_2}\right]\frac{\partial T}{\partial \tau}/_{n=\delta_2}+$$

$$\alpha_c\left(T_{/n=\delta_2}-T_г\right). \qquad (10)$$

Рівняння (10) є умовою теплообміну на границі ізоляція - довкілля

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}_{/r=r_2}=\frac{\partial T}{\partial n}_{/n=\delta_2},\ \frac{\partial T}{\partial \tau}_{/r=r_2}=\frac{\partial T}{\partial \tau}_{/n=\delta_2},\right.$$

$$\left.T_{/r=r_2}=T_{n=\delta_2}\right).$$

Повна енергія рухомого газу як сума потенціальної, кінетичної та внутрішньої енергій визначається такими параметрами потоку як тиск, швидкість і температура. В політропічному процесі розширення газу, характерному для магістральних газопроводів, збільшення температури газу зумовлює зростання його питомого об'єму та збільшення лінійних швидкостей потоку. Зростання лінійних швидкостей газу в трубопроводі і пов'язане з ним зростання

турбулентних пульсацій викликає збільшення гідравлічних втрат енергії на виконання роботи силами внутрішнього тертя потоку і зростання дисипативних втрат енергії. Крім того, збільшення температури газу викликає зростання швидкості розповсюдження малих збурень у газовому потоці, що призводить до виникнення і зростання інерційних втрат енергії. Вкажемо також на зростання динамічної в'язкості з підвищенням температури газу. Однак, під час руху газового потоку в зоні жорстких труб турбулентного режиму вплив внутрішнього тертя між шарами газу на загальні гідравлічні втрати енергії мізерний.

Таким чином, збільшення внутрішньої енергії газу в газовому потоці призводить до зростання загальних гідравлічних втрат енергії, і при сталій витраті газу виникає необхідність підведення енергії ззовні.

Для оцінки енергетичного стану газопроводу як складної системи необхідно встановити, яка частина загальної енергії перетворюється у внутрішню в процесі транспортування і розсіюється у довкілля, що допоможе визначити коефіцієнт корисної дії газопроводу.

Температура довкілля без врахування вітрових навантажень, яка викликається постійно діючим лінійним джерелом тепла потужності q, визначається таким виразом [12]

$$u(x,y,z)=\frac{q}{4\pi\lambda}\left\{\int_0^{\tau} e^{-\frac{x^2+(y-H)^2}{4a(\tau-\tau')}}\cdot\frac{d\tau'}{\tau-\tau'}+\right. \quad (11)$$

$$\left.+\int_0^{\tau} e^{-\frac{x^2+(y+H)^2}{4a(\tau-\tau')}}\cdot\frac{d\tau'}{\tau-\tau'}-2h\int_0^{\tau}\int_0^{\infty} e^{-h\eta-\frac{x^2+(y+H+\eta)^2}{4a(\tau-\tau')}}\cdot\frac{d\tau'}{\tau-\tau'}\cdot d\eta\right\}$$

Кількість тепла, яке передається довкіллю, можна визначити як різницю між теплом, яке виділяється трубою за даний відрізок часу $Q_в$, і втратами тепла в навколишнє середовище з поверхні ґрунту за цей же час Q_n.

$$Q_{акк}=Q_в-Q_n \ . \quad (12)$$

Якщо тепловіддача з поверхні одиниці довжини труби постійно рівна q, то за час τ буде виділено довкіллю кількість тепла

$$Q_в=q\tau \ . \quad (13)$$

Втрати тепла в навколишнє середовище можна знайти за законом Фур'є, знаючи розподіл температур.

$$Q_n=\lambda\int_0^{\tau}\int_{-\infty}^{+\infty}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0}\cdot d\tau\cdot dx \ . \quad (14)$$

або

$$Q_n=\frac{qh}{4\pi a}\times$$

$$\times\int_0^{\tau}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_0^{\tau}\int_0^{\infty}\frac{H+\eta}{(\tau-\tau')^2}e^{-h\eta-\frac{x^2+(H+\eta)^2}{4a(\tau-\tau')}}\cdot d\eta\cdot d\tau'\cdot d\tau\cdot dx \quad (15)$$

Після інтегрування отримаємо кількість тепла, яка втрачається у повітря за час роботи трубопроводу

$$Q_n=q\left(\tau+\frac{H^2}{2a}+\frac{H}{ha}+\frac{1}{h^2a}\right)\cdot\left[1-\Phi\left(\frac{H}{2\sqrt{a\tau}}\right)\right]-$$

$$-q\sqrt{\frac{\tau}{\pi a}}\left(H+\frac{2}{h}\right)e^{-\frac{H}{4a\tau}}- \quad (16)$$

$$-\frac{q}{h^2a}e^{Hh+h^2a\tau}\left[1-\Phi\left(\frac{H}{2\sqrt{a\tau}}+h\sqrt{a\tau}\right)\right].$$

Використовуючи отримані вирази для $Q_в$ і Q_n відносно, знаходимо кількість тепла, яке розповсюджується в довкілля за час роботи трубопроводу

$$Q_{акк}=q\tau-q\left(\tau+\frac{H^2}{2a}+\frac{H}{ha}+\frac{1}{h^2a}\right)\left[1-\Phi\left(\frac{H}{2\sqrt{a\tau}}\right)\right]+$$

$$+q\sqrt{\frac{\tau}{\pi a}}\left(H+\frac{2}{h}\right)e^{-\frac{H}{4a\tau}}+ \quad (17)$$

$$+\frac{q}{h^2a}e^{Hh+h^2a\tau}\left[1-\Phi\left(\frac{H}{2\sqrt{a\tau}}+h\sqrt{a\tau}\right)\right].$$

Останнім членом виразу (17) можна знехтувати, враховуючи, що для широкої області значень критерію Fo та Hh цей член практично наближається до нуля. Виразивши вираз (17) без останньої складової в безрозмірному вигляді, отримаємо

$$p=1-\left(1+\frac{1}{2F_0}+\frac{1}{Hh\cdot F_0}+\frac{1}{H^2h^2\cdot F_0}\right)\times$$

$$\times\left[1-\Phi\left(\frac{1}{2\sqrt{F_0}}\right)\right]+\sqrt{\frac{1}{\pi\cdot F_0}}\left(1+\frac{2}{Hh}\right)e^{-\frac{1}{4F_0}} \ . \quad (18)$$

При виведенні формули (18) були використані такі позначення: $p=\frac{Q_{акк}}{q\tau}$; q – витрата тепла з одиниці поверхні труби; τ – час роботи трубопроводу; $Hh=H\cdot\frac{a}{\lambda}$; a – коефіцієнт тепловіддачі у повітря.

За формулою (18) будо обчислено кількість тепла, яке виділяється в довкілля для умов переходу змонтованого на ділянці Богородчани – Хуст газопроводу СОЮЗ. Результати обчислень порівнювали з експериментальними даними (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати дослідження

Діаметр труби, мм	Питома теплова інтенсивність джерела q,кДж/м·год град	Довжина переходу, м	Кількість виділеного тепла $Q_{ак}$, кДж		Час τ, год
			за формулою (2.48)	за даними вимірювань	
1420	154	146	22116	19700	144
	178		54811	49500	308
	196		77273	74S00	394
	215		182332	173600	850

Експерименти проводили на випробувальному полігоні, створеному на базі повітряного переходу балкового типу завдовжки 146 м газопроводу «СОЮЗ». Нагрівання труб здійснювали газовим потоком, температура якого в різні моменти експлуатації змінювалася залежно від температури довкілля, ступеня стиску на КС та режиму роботи АПО. Температуру поверхні труб вимірювали хромель-копелевими термопарами з електронними потенціометрами типу ЕПП-09. Термопари охоплювали сітку перерізу розміром 3×9 м. У зоні переходу було встановлено 100 термопар. Таким чином, для кожного моменту часу фіксували температурне поле, що дало змогу оцінити зону впливу теплового джерела. Вимірювання тиску на початку й у кінці переходу здійснювали за допомогою зразкових манометрів МТИ-100 (клас точності 0,5).

Результати експериментів обробляли так: за даними вимірювань побудували графіки зміни температури в часі та за радіальними напрямками (угору й вниз від труби), а також уздовж горизонтального радіуса. Таким чином, для кожного моменту часу кількість виділеного тепла на одиницю довжини труби дорівнює: $Q = \gamma c \int_{\Omega} (T - T_в) d\omega$.

Теплові втрати в довкілля вважалися втратами енергії при транспортуванні газу. Корисною роботою при цьому вважалася робота сил тертя в умовах квазістаціонарного потоку газу, спрямована на забезпечення заданої пропускної здатності. Як відомо [11], питомі енерговитрати в потоці складаються з питомих втрат потенціальної і кінетичної енергії, віднесених до одиниці масової витрати, і можуть бути знайдені з рівняння

$$\Delta E = \Delta E_{пит} M = \Delta E_{пит} Q\rho = (P_1 - P_2)Q .$$

Для повних втрат енергії на переході матимемо

$$\Delta E = \Delta E_{пит} M = \Delta E_{пит} Q\rho = $$

$$= (P_1 - P_2)Q + \left(\frac{W_1^2 - W_2^2}{2} \right) M , \qquad (19)$$

де M, Q – масова і об'ємна витрати; індекси 1 і 2 відносяться відповідно до початку і кінця переходу.

Якщо вважати енерговтрати на забезпечення пропускної здатності газопроводу на переході, а виділене тепло – енергетичними втратами, то ККД переходу

$$\eta_{гтс} = \Delta E / (\Delta E + Q) . \qquad (20)$$

За наведеною методикою виконано обчислення ККД повітряних переходів газопроводу СОЮЗ для різних умов його експлуатації, значення яких подано в таблиці 2.

Результати розрахунків у вигляді графіків відображено на рисунку 1.

Розрахунки ККД проводили для різних значень пропускної здатності. Результати відображено у вигляді графіків на рисунку 1, де лінія «ряд 1» характеризує зміну ККД переходу 1, а лінія «ряд 2» – переходу 2 залежно від продуктивності газопроводу.

Аналіз одержаних залежностей показує, що з зростанням відстані зосередженого об'єкта (переходу) від виходу компресорної станції (КС Богородчани) його ККД знижується. Причиною зниження слід вважати зменшення корисної роботи (значення енерговитрат на забезпечення заданої продуктивності газопроводу) за практично сталих енерговитрат у довкілля.

Збільшення продуктивності газопроводу призводить до зростання ККД повітряного переходу незалежно від його розміщення на трасі, при цьому зростання тиску на початку переходу також призводить до збільшення ККД, оскільки в обох випадках зростає корисна робота сил опору газопроводу, спрямована на підтримання його продуктивності.

Таблиця 2 – Характеристика повітряних переходів газопроводу СОЮЗ

Перепона	Координата початку, км	Довжина, м	Дата випробувань	Продуктивність, млн.м^3 за добу	Температура довкілля ^{0} С	Тиски поч./кін. МПа
ріка Бистриця	2433,9	272,00	24.08.2012	42,7	22	6,980/6,977
			11.09.2012	44,2	18	6,889/6,877
			12.09.2012	45,9	21	6,881/6,879
			04.11.2012	47,7	6	7,011/7,007
			22.08.2012	48,5	25	6,887/6,878
ріка Лімниця	2483,11	328,00	24.08.2012	42,7	22	6,782/6,768
			11.09.2012	44,2	18	6,575/6,559
			12.09.2012	45,9	21	6,648/6,634
			04.11.2012	47,7	6	6,765/6,756
			22.08.2012	48,5	25	6,629/6,618

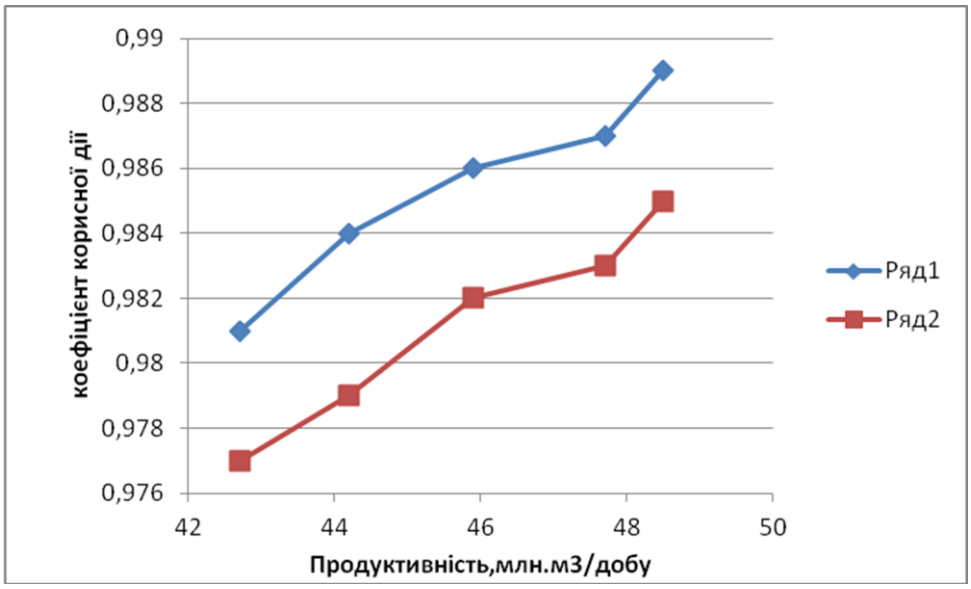


Рисунок 1 – Динаміка зміни ККД переходів залежно від продуктивності газопроводу

Зниження температури довкілля викликає зростання теплових енерговитрат, що призводить до зниження ККД повітряного переходу.

Як відомо [6], ККД газотранспортної системи $\eta_{гтс}$, що складається з компресорних станцій і лінійної частини, може бути виражений у вигляді добутку

$$\eta_{лч} = \eta_{гтс} / \eta_{кс},$$

Звідки

$$\eta_{лч} = \eta_{гтс} / \eta_{кс} . \qquad (21)$$

Визначивши для вказаних в табл. 2 моментів часу ККД системи КС «Богородчани» – ЛД «Богородчани-Хуст» за методикою [11], а також ККД КС «Богородчани» за витратою паливного газу, знайдено за (21) ККД лінійної ділянки «Богородчани-Хуст», на якій знаходяться вказані повітряні переходи. Результати розрахунків показують, що для вказаних умов ККД лінійної ділянки «Богородчани-Хуст» лежить в межах 0,97 – 0,98, що свідчить про незначний вплив повітряних переходів на загальний ККД системи, в зв'язку з чим розрахунки ККД повітряних переходів не мають суттєвого впливу на ККД лінійних ділянок.

Висновки

Аналіз результатів аналітичних досліджень енергоефективності повітряних переходів газопроводу показав, що збільшення продуктивності газопроводу призводить до зростання ККД повітряного переходу незалежно від його розміщення на трасі, при цьому зрос-

тання тиску на початку переходу також призводить до збільшення ККД, оскільки в обох випадках зростає корисна робота сил опору газопроводу, спрямована на підтримання його продуктивності. Зниження температури довкілля викликає зростання теплових енерговитрат, що призводить до зниження ККД повітряного переходу.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. Москва : Наука, 1978. 399 с.
2. Грудз В. Я., Грудз В. Я. (молодший). Удосконалення методу діагностування витоків з газопроводу на основі дослідження процесу розповсюдження збурень. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2017. № 1 (37). С. 217.
3. Оцінка точності визначення запасів газу в трубах за умов неповного завантаження газотранспортної системи / В. Я. Грудз та ін.
4. Технічна діагностика трубопровідних систем / В. Я. Грудз та ін. Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2012. 512 с.
5. Грудз Я. В. Енергоефективність газотранспортних систем. Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2012. 186 с.
6. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Костів В. В. Аналітичні дослідження витоків газу з газопроводу. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали наук.-техн. конф. (м. Івано-Франківськ, 15–18 травня 2012 р.). Івано-Франківськ, 2012. С. 66–67.
7. Жидкова М. А. Трубопроводный транспорт газа. Киев : Наукова думка, 1973. 142 с.
8. Режими газотранспортних систем / Є. І. Яковлєв та ін. Львів : Світ, 1992. 170 с.
9. Трубопровідний транспорт газу / М. П. Ковалко та ін. Київ : АренаЕКО, 2002. 600 с.
10. Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа. Москва : Наука, 1982. 206 с.
11. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading / V. Zapukhliak et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 7. Art. 1324. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.3390/en12071324.

References

1. Buslenko, N. P. (1978). *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of complex systems]. Nauka. (in Russian)
2. Hrudz, V. Ya., & Hrudz, V. Ya. (molodshyi). (2017). Udoskonalennia metodu diahnostuvannia vytokiv z hazoprovodu na osnovi doslidzhennia protsesu rozpovsiudzhennia zburhen [Improvement of the gas pipeline leak diagnosis method based on the investigation of disturbance propagation process]. *Pryka-?patskyi Visnyk NTSH. Chyslo*, (1(37)), 217. (in Ukrainian)
3. Hrudz, V. Ya., & et al. (2012). Otsinka tochnosti vyznachennia zapasiv hazu v trubakh za umov nevpovnoho zavantazhennia hazotransportnoi systemy [Estimation of accuracy in determining gas reserves in pipes under incomplete loading of the gas transmission system]. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Hazovykh Rodovyshch*, (2(43)), 45–52. (in Ukrainian)
4. Hrudz, V. Ya., & et al. (2012). *Tekhnichna diahnostyka truboprovidnykh system* [Technical diagnostics of pipeline systems]. Lileia-NV. (in Ukrainian)
5. Hrudz, Ya. V. (2012). *Enerhoefektyvnist hazotransportnykh system* [Energy efficiency of gas transmission systems]. Lileia-NV. (in Ukrainian)
6. Hrudz, V. Ya., Hrudz, Ya. V., & Kostiv, V. V. (2012). Analitychni doslidzhennia vytokiv hazu z hazoprovodu [Analytical studies of gas leaks from gas pipelines]. In *Problemy i perspektyvy transportuvannia nafti i hazu* [Problems and Prospects of Oil and Gas Transportation: Proceedings of the Scientific and Technical Conference] (pp. 66–67). IFNTUNG. (in Ukrainian)
7. Zhidkova, M. A. (1973). *Truboprovodnyy transport gaza* [Pipeline transportation of gas]. Naukova dumka. (in Russian)

8. Yakovlev, Ye. I., & et al. (1992). *Rezhymy hazotransportnykh system* [Operating modes of gas transmission systems]. Svit. (in Ukrainian)
9. Kovalko, M. P., & et al. (2002). *Truboprovidnyi transport hazu* [Pipeline transportation of gas]. ArenaEKO. (in Ukrainian)
10. Shcherbakov, S. G. (1982). *Problemy truboprovodnogo transporta nefti i gaza* [Problems of oil and gas pipeline transportation]. Nauka. (in Russian)
11. Zapukhliak, V., & et al. (2019). Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading. *Energies*, *12*(7), Article 1324.

FORECASTING ENERGY EFFICIENCY OF CENTRALIZED GAS PIPELINE FACILITIES UNDER PARTIAL LOAD CONDITIONS

Hrudz Ya. V.
Doctor of Technical Sciences, professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3287-3036
e-mail: yaroslav.hrudz@nung.edu.ua

Terefenko N. R.
Postgraduate student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0009-0000-2359-9958
e-mail: nazarii.terefenko-a18522@nung.edu.ua

Abstract. The energy efficiency and operational reliability of the gas transportation system are considered in terms of providing consumers with specified volumes of energy carriers. This study aims to identify patterns and evaluate the effect of operational parameters of specific sections of the main gas pipeline, particularly air passages, on the energy efficiency of gas transportation, as well as the impact of trends in the technical condition of gas trans-?ortation systems. Based on this, principles for predicting trouble-free operation times and technical maintenance schedules to ensure a given level of reliability were developed. A mathematical model for determining the energy efficiency and reliability of a gas transportation system was obtained based on the simplest failure flow of the linear part and control systems. A method for calculating the efficiency of concentrated objects in the linear part of the pipeline system — in particular, air transitions — to ensure a given level of energy efficiency and gas supply reliability was demonstrated using a practical example. Based on research conducted under production conditions, patterns were established for the influence of external factors, particularly barometric pressure, temperature, humidity of the air and the relative density of the fuel gas, on the efficiency of gas transportation. This will ensure the effective operation of the gas transportation system. Statistical studies show that the influence of natural factors depends on failures in the gas pipeline route. An increase in pressure at the beginning of the transition also increases efficiency, since useful work by the gas pipeline's resistance forces increases in both cases, aiming to maintain productivity. A decrease in ambient temperature leads to an increase in thermal energy consumption and a decrease in the efficiency of the air transition.

Keywords: gas transportation system, concentrated facilities, energy efficiency, efficiency, reliability, technical research, control systems.