

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІСЬКИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

Я. В. Грудз*, Р. Б. Стасюк, М. Я. Криль

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: snp@nimg.edu.ua

Розв'язано задачу про вибір критерію енергоефективності експлуатації міських газових мереж високого і середнього тисків за умови переходу до системи індивідуального енергопостачання. Показано, що в умовах суттєвого підвищення цін на природний газ і поглиблення його дефіциту міська газова мережа часто не може забезпечити споживачів енергоносієм в заданому обсязі, тому підхід до прогнозування її експлуатаційних режимів повинен принципово змінитися. В першу чергу це стосується області допустимих режимів, яка в таких умовах значно розширюється. За умов перезавантаження газорозподільчої мережі внаслідок зміни характеру газоспоживання велику роль надається критеріям енерговитратності транспортування газу і забезпеченню максимальної експлуатаційної надійності, що входить в сферу оптимального обслуговування. Для оцінювання енергоефективності транспортування газу газопроводами розподільчої мережі запропоновано використати поняття коефіцієнта корисної дії мережі, який визначається відношенням корисної роботи, виконаної при забезпеченні заданого обсягу транспортування газу трубопроводами, до загальних витрат енергії. Показано, що коефіцієнт корисної дії розподільчої мережі чи її окремих елементів відрізняється принципово від коефіцієнта її гідравлічної ефективності, який є характеристикою технічного стану системи. На основі аналітичних досліджень встановлено взаємозв'язок між ними. Запропоновано розрахункові залежності для визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності розгалуженого газопроводу як елемента міської газорозподільчої мережі. Проведено аналіз впливу різноманітних факторів на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності міської газорозподільчої мережі. Наведено приклади розрахунку коефіцієнта корисної дії мережі, зроблено висновки щодо підвищення ефективності експлуатації.

Ключові слова: газорозподільча мережа, перезавантаження, енергоефективність, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт гідравлічної ефективності.

Поставлена и решена задача о выборе критерия энергоэффективности эксплуатации городских газовых сетей высокого и среднего давлений при условии перехода к системе индивидуального энергоснабжения. Показано, что в условиях существенного повышения цен на природный газ и углубления его дефицита городская газовая сеть часто не в состоянии обеспечить потребителей энергоносителем в заданном объеме, поэтому подход к прогнозированию ее эксплуатационных режимов должен принципиально измениться. В первую очередь это касается области допустимых режимов, которая в таких условиях значительно расширяется. В условиях перезагрузки газораспределительной сети в результате изменения характера газопотребления значительная роль отводится критериям энергозатратности транспортировки газа и обеспечения максимальной эксплуатационной надежности, что входит в сферу оптимального обслуживания. Для оценки энергоэффективности транспортировки газа по газопроводам распределительной сети предложено использовать понятие коэффициента полезного действия сети, определяется отношением полезной работы, проделанной при обеспечении заданного объема транспортировки газа по трубопроводам, к общим затратам энергии. Показано, что коэффициент полезного действия распределительной сети или ее отдельных элементов принципиально отличается от коэффициента ее гидравлической эффективности, который является характеристикой технического состояния системы. По результатам аналитических исследований установлена взаимосвязь между ними. Предложены расчетные зависимости для определения коэффициента гидравлической эффективности разветвленного газопровода как элемента городской газораспределительной сети. Проведен анализ влияния различных факторов на величину коэффициента гидравлической эффективности городской газораспределительной сети. Приведены примеры расчета коэффициента полезного действия сети, сделаны выводы относительно эффективности эксплуатации.

Ключевые слова: газораспределительная сеть, перезагрузка, энергоэффективность, коэффициент полезного действия, коэффициент гидравлической эффективности.

The task of choosing the criterion of energy efficiency of operation of city gas networks of high and medium pressure, under the condition of transition to the system of individual energy supply is set and solved. It is shown that in conditions of substantial increase of prices for natural gas and deepening of its deficit, the city gas network is often not able to provide consumers with energy in a given volume, so the approach to forecasting its operating

modes should fundamentally change. First of all it concerns the field of permissible modes, which in such conditions considerably expands. Given the reloading of the gas distribution network as a result of changing the nature of gas consumption, a large role is given to the criteria for energy efficiency of gas transportation and to ensure maximum operational reliability while being within the scope of optimal maintenance. In order to assess the energy efficiency of gas transportation by gas pipelines of a distribution network, it is suggested to use the notion of the net efficiency coefficient, which is determined by the ratio of useful work performed when providing a given volume of gas transportation by pipelines to total energy consumption. It is shown that the efficiency of the distribution network or its individual elements differs fundamentally from the coefficient of its hydraulic efficiency, which is a characteristic of the technical state of the system. On the basis of analytical studies, the correlation between them is established. Calculated dependencies are proposed for determining the coefficient of hydraulic efficiency of a branched gas pipeline as an element of an urban gas distribution network. The influence of various factors on the value of the coefficient of hydraulic efficiency of the urban gas distribution network has been analyzed. The examples of calculating the efficiency of the network are given, conclusions on improving the efficiency of operation are made.

Keywords: gas distribution network, reboot, energy efficiency, efficiency, hydraulic efficiency, gas transmission system, incomplete loading, non-stationary process, pressure fluctuations, amplitude, frequency.

Вступ

Сучасна міська газова мережа є невід'ємною частиною газотранспортної системи і служить для безпосереднього забезпечення споживача енергоносієм. На сучасному етапі широкого впровадження системи індивідуального енергозабезпечення споживачів відбувається скорочення і часткова ліквідація групових пунктів забезпечення споживачів тепловою енергією в опалювальний період, що призводить до перерозподілу газових потоків у міській мережі. В зв'язку з цим виникають переважені ділянки мережі, на яких внаслідок перевищення витрати газу спостерігається понаднормоване падіння тиску. В таких випадках виникає необхідність оцінити енергоефективність транспортування газу з метою прийняття відповідних технічних чи технологічних рішень для забезпечення надійності газопостачання.

Огляд літературних джерел

Як відомо [1, 2], для оцінки енергоефективності технічної системи, в якій відбувається перетворення енергії і виконання роботи, загальноприйнято користуватися поняттям коефіцієнта корисної дії (ККД) системи, який визначається відношенням корисно виконаної роботи до загальних витрат енергії.

Початково коефіцієнт корисної дії було запроваджено для оцінки енергоефективності теплових двигунів, однак згодом поняття ККД було перенесене на всі технічні системи, діяльність яких пов'язана з перетворенням енергії та виконанням роботи. До таких систем, окрім двигунів, відносяться всі види передач, кінематичні пари з наявністю тертя, системи передач крутного моменту та інш. Загальне значення величини ККД для технічної системи загалом може бути знайдене через значення величин ККД складових елементів за принципом

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n = \prod_1^n \eta_i. \quad (1)$$

Виходячи з класичного визначення коефіцієнта корисної дії, для розрахунку його величини в умовах газотранспортної системи та газової мережі як її елемента необхідно встановити величину корисної роботи і загальну витрату енергії. Корисною може вважатися робота, виконана для переміщення заданої кількості газу на певну віддаль при зумовлених величинах тисків і температур. Якщо транспортовану кількість газу віднести до одиниці часу, то корисна робота розглядатиметься як витрата потужності, яка для потоку середовища в трубах виражається залежністю [3]:

$$N_k = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H, \quad (2)$$

де Q – витрата середовища густиною ρ ;

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

Метою дослідження є оцінка енергоефективності газових мереж та їх елементів та встановлення факторів, що мають вплив на скорочення витрат енергії на транспортування газу.

Виклад основного матеріалу

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

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H = P_n - P_k. \quad (3)$$

Об'ємна витрата газопроводу при робочих умовах є змінною по довжині траси величиною, навіть при стаціонарному характері руху газу. Тому

$$Q = \frac{M}{\rho_{cp}} = \frac{Q_{cm} \cdot \rho_{cm}}{P_{cp}} \cdot z_{cp} \cdot R \cdot T_{cp} =$$

$$= Q_{cm} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp}, \quad (4)$$

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 при цих умовах.

Використавши (3) і (4), одержимо для корисної роботи, віднесеної до одиниці часу

$$N_k = Q_{cm} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp} \cdot (P_n - P_k). \quad (5)$$

Загальні витрати енергії до потоку газу за одиницю часу будуть дещо більшими через втрату в місцевих опорах, які виникають в мережі у вигляді рідинних скупчень, та погіршення технічного стану трубопроводів самої мережі. Тому, враховуючи, що гідравлічні втрати пропорційні коефіцієнту гідравлічного опору відповідно нової мережі λ_m та в її фактичному технічному стані λ_ϕ , ККД газової мережі можна записати у вигляді

$$\eta = \frac{N_k}{N_k + N_{втр}} = \frac{\lambda_m}{\lambda_\phi}, \quad (6)$$

де $N_{втр}$ – незворотні втрати енергії за одиницю часу.

Як відомо [4, 5], технічний і гідравлічний стани газопроводів оцінюються коефіцієнтом гідравлічної ефективності, який показує міру зниження пропускної здатності за рахунок зростання гідравлічного опору і визначається співвідношеннями

$$E = \frac{Q_\phi}{Q_m} = \sqrt{\frac{\lambda_m}{\lambda_\phi}}. \quad (7)$$

Зіставлення (6) і (7) дозволяє отримати зв'язок між ККД газопроводу мережі і коефіцієнтом його гідравлічної ефективності у вигляді

$$\eta = E^2. \quad (8)$$

Залежність (8) має важливе значення, оскільки вона показує різницю між коефіцієнтом корисної дії та коефіцієнтом гідравлічної ефективності.

В роботах [6,7] ототожнюються поняття коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта гідравлічної ефективності, що, як бачимо, є хибним твердженням, оскільки коефіцієнт гідравлічної ефективності є характеристикою технічного

стану газопроводу (його діагностичною ознакою), а коефіцієнт корисної дії характеризує газу мережу з енергетичної точки зору.

З іншого боку, використання залежності (8) дозволяє охарактеризувати газу мережу, з точки зору енергоспоживання, і пов'язує енергоефективність з характеристиками технічного стану. Якщо, наприклад, коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу мережі знизився до 0,9, то це означає погіршення технічного стану на 10%. При цьому характеристика мережі, з енергетичної точки зору, погіршилася на 19%. Тому для визначення ККД газової мережі чи її елементів важливо оцінити технічний стан з допомогою коефіцієнта гідравлічної ефективності.

Газова мережа представляє собою складну систему газопроводів з шляховими відборами, паралельним і послідовним з'єднанням елементів. Тому актуальною є задача визначення загального коефіцієнта гідравлічної ефективності газової мережі, якщо відомі коефіцієнти гідравлічної ефективності її елементів, а також встановлення впливу коефіцієнтів гідравлічної ефективності елементів мережі на величину загального коефіцієнта гідравлічної ефективності.

Миська газова мережа може розглядатися як складна газотранспортна система, що характеризуються багатонитковими трубопроводами з міжнитковими перемичками та наявністю шляхових відборів газу, які можуть бути постійнодіючими або буферними, сталими за величиною або змінними в часі.

Для газопроводів без шляхових відборів і аварійних витоків газу величина коефіцієнта гідравлічної ефективності входить в основне рівняння газопроводів і може бути визначена [8]

$$E = \frac{Q}{cd^{2.5} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda \Delta Z T L}}}, \quad (9)$$

де Q – фактична витрата газу в газопроводі;
 c – коефіцієнт, що залежить від вибору системи одиниць;

d – внутрішній діаметр газопроводу;

P_H, P_K – тиски на початку і в кінці газопроводу;

λ – теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору;

Δ – відносна густина газу;

Z – коефіцієнт стисливості;

T – середня температура газу;

L – довжина лінійної ділянки.

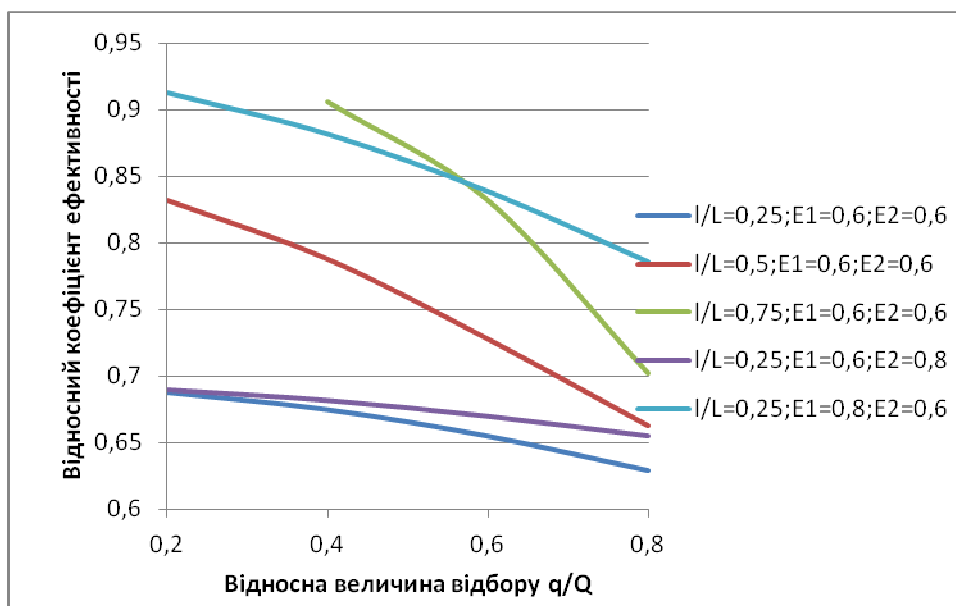


Рисунок 1 – Вплив відбору на гідравлічну ефективність газопроводу ділянки мережі

Якщо на віддалі l_q від початку знаходиться зосереджений відбір газу або аварійний витік з витратою q , то на основі (9) одержимо систему рівнянь

$$P_H^2 - P_q^2 = \frac{\lambda \Delta Z T L Q^2}{c^2 d^5 E_q^2};$$

$$P_q^2 - P_K^2 = \frac{\lambda \Delta Z T (L - l_q)(Q - q)^2}{c^2 d^5 E_q^2},$$

де P_q – тиск в точці витoku газу.

Очевидно, що коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу з відбором газу E_q до певної міри відрізнятиметься від коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу без відбору газу E , оскільки дані величини отримані на основі різних математичних моделей. Якщо прийняти, що коефіцієнт гідравлічної ефективності на ділянці до відбору газу складає E_1 , а на ділянці після відбору – E_2 , то загальний коефіцієнт гідравлічної ефективності ділянки газопроводу з відбором газу E_q може бути знайдений як сумісний розв'язок системи (10) і рівняння (9), що дає залежність для співвідношення вказаних коефіцієнтів у вигляді

$$E_q = \frac{Q}{cd^{2,5} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda \Delta Z T L [1 + (1 - l/L)(1 - q/Q)^2]}}}; \quad (10)$$

$$E_q = \left(\frac{1 - l/L}{E_1^2} + \frac{l/L(1 - q/Q)^2}{E_2^2} \right)^{-0,5}. \quad (11)$$

На основі (11) встановлено вплив відносної відстані до відбору l/L та відносної величини відбору q/Q на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності ділянки мережі з відбором E_q . Результати розрахунків у вигляді графіків наведено на рисунку 1.

Аналіз результатів досліджень показує, що величина і розміщення шляхового відбору на ділянці газової мережі має суттєвий вплив на її коефіцієнт гідравлічної ефективності. Зокрема, при збільшенні відстані від початку ділянки до точки шляхового відбору призводить до зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності ділянки мережі. Так, при відносній величині шляхового відбору $q/Q = 0,6$ збільшення віддалі до нього з $l/L = 0,25$ до $l/L = 0,5$ призводить до зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності ділянки мережі на 10,03%, а при збільшенні відстані до $l/L = 0,75$ коефіцієнт гідравлічної ефективності зростає на 21,3%. Підвищення гідравлічної ефективності на початковій частині ділянки (до шляхового відбору) більшою мірою впливає на зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності ділянки мережі, ніж на кінцевій (після шляхового відбору). Так, зі збільшенням коефіцієнта гідравлічної ефективності ділянки до шляхового відбору з 60% до 80% коефіцієнт гідравлічної ефективності мережі зростає на 21,93%, в той час, як аналогічне збільшення коефіцієнта гідравлічної ефективності на кінцевій ділянці призводить до його зростання на 2,24%.

Збільшення величини зосередженого шляхового відбору призводить до зниження коефі-

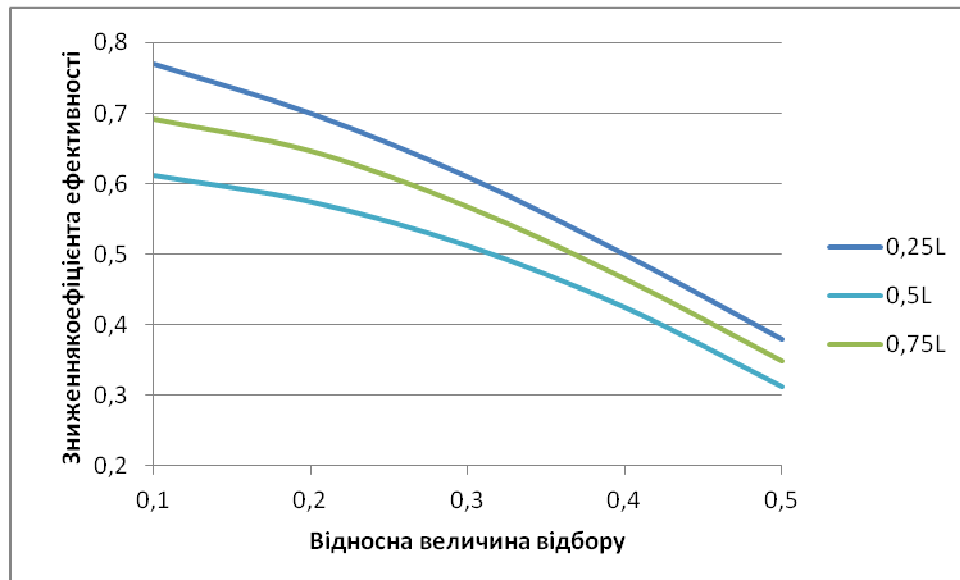


Рисунок 2 – Оцінка впливу шляхового відбору на коефіцієнт гідравлічної ефективності

цієнта гідравлічної ефективності мережі, причому зі зростанням відстані до відбору інтенсивність падіння коефіцієнта гідравлічної ефективності мережі збільшується.

Важливим аспектом дослідження є встановлення співвідношення між коефіцієнтами гідравлічної ефективності газопроводу з шляховими відборами та простого газопроводу [9]. Іншими словами, виникає необхідність у встановленні впливу шляхових відборів на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності. Для вирішення цієї задачі порівнюємо результати визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності для простого газопроводу за (9) і для газопроводу з шляховими відборами – за (10). В результаті одержимо поправку на зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності, викликану шляховим відбором

$$\delta = \frac{E_q}{E} = \left(1 - \frac{q}{Q}\right) \sqrt{1 - \frac{l_q}{L}}. \quad (12)$$

Тепер на основі (12) можна виконати дослідження зі встановлення залежності величини δ та від величини відбору і його координати.

На рисунку 2 наведено графічні залежності вказаного відношення від величини відбору газу і його розміщення на газопроводі. Аналіз графіків показує, що при величині витoku газу 0,1% від витрати в газопроводі коефіцієнт гідравлічної ефективності знижується на 13,4%. Зі збільшенням величини витoku газу і його відстані від початку газопроводу вказане відхилення збільшується. Тому виникає необхідність певною мірою компенсувати вказане відхилення. Для цього необхідно знати величину і координату аварійного витoku, якщо такий існує.

Пропонується аналізувати нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою аварійного витoku газу.

Аналіз графіків показує, що збільшення величини шляхового відбору газу і його відстані від початку газопроводу призводить до зменшення коефіцієнта гідравлічної ефективності системи.

Якщо на розгалуженому газопроводі газорозподільної мережі знаходиться $k-1$ зосереджених шляхових відборів, відстані між якими складають l_i , а коефіцієнти гідравлічної ефективності на кожному складають E_i , то загальний коефіцієнт гідравлічної ефективності ділянки з відборами може бути знайдений з формули

$$E_q = \left(\frac{1 - l_0 / L}{E_0^2} + \sum_{i=1}^k \frac{l_i / L (1 - q_i / Q)^2}{E_i^2} \right)^{-0,5}, \quad (13)$$

де l_0, E_0 – довжина ділянки від початку розгалуженого газопроводу до першого відбору і її коефіцієнт гідравлічної ефективності.

Якщо розглядати газорозподільчу мережу як систему послідовно під'єднаних розгалужених газопроводів [10], для кожного з яких можна визначити коефіцієнт гідравлічної ефективності за (13), а відтак ККД за (8), то загальний ККД мережі можна визначити за (1), що дозволить оцінити енергетичну ефективність газорозподільної мережі загалом.

Висновки

Запропоновано для оцінки енергетичної ефективності експлуатації газорозподільчої мережі використати поняття її коефіцієнта корисної дії, встановлено його залежність від коефі-

цієнта гідравлічної ефективності мережі та її ділянок. Показано принцип і запропоновано розрахункові формули для визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності мережі. Аналіз отриманих залежностей показав, що для підвищення значення коефіцієнта гідравлічної ефективності мережі слід забезпечити високу гідравлічну ефективність початкових ділянок газопроводів газорозподільчої мережі.

Література

1. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем. Івано-Франківськ.: Лілея-НВ, 2012. 208 с.
2. Oleksandr Filipchuk, Vladimir Grudz, Victor Marushchenko, Valentyn Myndiuk, Myroslav Savchuk. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol 2, No 8 (92). ISSN 1729-3774.
3. Грудз В. Я., Костів Я. В., Процюк В. Р., Тимків Д. Ф. Математичне моделювання складних газотранспортних систем при різних режимах загрузки. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2016. № 4/2(21). С.44-49.
4. Грудз В.Я. Тимків Д.Ф., Михалків В.Б., Костів В.В. Обслуговування і ремонт газопроводів. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. 711 с.
5. Грудз Я.В., Костів В.В. та ін. Технічна діагностика газотранспортних систем. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. 511 с.
6. Energy Charter Secretariat. Gas Transit Tariffs in selected Energy Charter Treaty Countries. URL: www.encharter.org. – January 2016. 86 p.
7. Francis K. Gip. New operation strategies in heavy crycle pipeline will increase profit margin. *Oil S Gas journal*. 2013. No 10. P. 60-64.
8. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Якимів М.М. Енергетичний підхід до питання про гідравлічну ефективність газопроводів. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 6/(72). С.56-62.
9. Грудз Я.В. Оптимальне планування режимів роботи газотранспортних систем в умовах багатокритеріальності. *Прикарпатський вісник НТШ*. Число. 2016. 1(33). С. 272-291.
10. Якимів М.М. Оцінка ефективності газопроводів з шляховими відборами та витоками газу. *Ефективна економіка*. 2015. № 5. [електронне видання].

References

1. Hrudz Ya.V. Enerhoefektyvnist hazotransportnykh system. Ivano-Frankivsk.: Lileia-NV, 2012. 208 p.
2. Oleksandr Filipchuk, Vladimir Grudz, Victor Marushchenko, Valentyn Myndiuk, Myroslav Savchuk. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol 2, No 8 (92). ISSN 1729-3774. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126590>, <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/126590>
3. Hrudz V.Ya., Kostiv Ya.V., Protsiuk V. R., Tymkiv D. F. Mathematical simulation of complex gas transportation systems with underground gas storage. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2016. No 4/2(21). P.44-49. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.67695 https://www.researchgate.net/publication/303317565_Mathematical_simulation_of_complex_gas_transportation_systems_with_underground_gas_storage
4. Hrudz V.Ia., Tymkiv D.F., Mykhalkiv V.B., Kostiv V.V. Obsluhovuvannya i remont hazoprovodiv. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2009. 711 p.
5. Hrudz Ya.V., Kostiv V.V. ta in. Tekhnichna diahnostryka hazotransportnykh system. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2012. 511 p.
6. Energy Charter Secretariat. Gas Transit Tariffs in selected Energy Charter Treaty Countries. URL: www.encharter.org. – January 2016. 86 p.
7. Francis K. Gip. New operation strategies in heavy crycle pipeline will increase profit margin. *Oil S Gas journal*. 2013. No 10. P. 60-64.
8. Hrudz V.Ia., Hrudz Ya.V., Yakymiv M.M. Enerhetychnyi pidkhid do pytannia pro hidravlichnu efektyvnist hazoprovodiv. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. No 6/(72). P.56-62.
9. Hrudz Ya.V. Optimal planning of operational modes of gas pipeline transportation systems under multicriterion conditions. *Prekarpathian bulletin of SSS. Number* . 2016. 1(33). P. 272-291. <http://pvntsh.nung.edu.ua/index.php/number/article/view/125>
10. Iakymiv M.M. The gas pipelines track extraction and minor gas leaks economic efficiency evaluation. *Efektyvna ekonomika*. 2015. No 5. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4064>