

13. Шалин, А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем [Текст] / А. И. Шалин. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 384 с.
14. Abbarin, A. An extended component-based reliability model for protective systems to determine routine test schedule [Text] / A. Abbarin, M. Fotuhi Firuzabad, A. Özdemir // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science. – 2011. – Vol. 19, Issue 2. – P. 303–315.
15. Ridwan, M. I. Application of Life Data Analysis for the Reliability Assessment of Numerical Overcurrent Relays [Text] / M. I. Ridwan, K. L. Yen, A. Musa, B. Yunus // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 48. – P. 969–975.
16. Litvinov, V. V. Fuzzy-Statistical Modeling of Hydrogenerator for Its Reliability Appreciation [Text] / V. V. Litvinov, K. A. Manukian // The IJES. – 2014. – Vol. 3, Issue 1. – P. 85–95.
17. Костерев, М. В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем [Текст] / М. В. Костерев, Є. І. Бардик. – К.: НТУУ «КПІ», 2011 – 148 с.
18. Костерев, М. В. Нечітке моделювання ЛЕП для оцінки ризику зниження надійності електропостачання [Текст] / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, Р. В. Вожаков // Вісник ВПІ. – 2011. – № 6. – С. 159–163.
19. Окин, А. А. Противоаварийная автоматика энергосистем [Текст] / А. А. Окин. – М.: МЭИ, 1995. – 212 с.
20. Ванин, Б. В. Вопрос повышения надежности работы блочных трансформаторов [Текст] / Б. В. Ванин, Ю. Н. Львов, Б. Н. Неклепаев // Электрические станции. – 2003. – № 7. – С. 38–42.
21. Неклепаев, Б. Н. Вероятностные характеристики коротких замыканий в энергосистемах [Текст] / Б. Н. Неклепаев, А. А. Востросаблин // Электричество. – 1999. – № 8. – С. 15–23.
22. Абдурахманов, А. М. Влияние продолжительности эксплуатации на отказы выключателей в высоковольтных электрических сетях [Текст] / А. М. Абдурахманов, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов // Электрические станции. – 2007. – № 7. – С. 59–63.

*Розглядається задача про дисипацію енергії під час магістрального транспорту газу та її подальший вплив в газопроводі на зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності. Подано результати аналітичних досліджень процесу перетворення потенціальної та кінетичної енергії у внутрішню. Показано принцип реалізації задачі і використання її результатів*

*Ключові слова: гідравлічна ефективність та її зміна в часі, дисипація енергії, внутрішня енергія, коефіцієнт ефективності*

*Рассматривается задача о диссипации энергии при магистральном транспорте газа и ее последующее влияние в газопроводе на снижение коэффициента гидравлической эффективности. Представлены результаты аналитических исследований процесса преобразования потенциальной и кинетической энергии во внутреннюю энергию. Показан принцип реализации задачи и использования ее результатов*

*Ключевые слова: гидравлическая эффективность и ее изменение во времени, диссипация энергии, внутренняя энергия, коэффициент эффективности*

УДК 621.64.029

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31878

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОПРОВОДІВ

В. Я. Грудз

Доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, завідувач кафедри \*

Я. В. Грудз

Доктор технічних наук, доцент\*

E-mail: public@nung.edu.ua

М. М. Якимів

Заступник директора з зовнішньоекономічної та комерційної діяльності

ТОВ «ДІПРОГАЗ»

вул. Нагірна, 19, м. Київ, Україна, 04107

E-mail: m.iakymiv@diprogaz.com.ua

\*Кафедра спорудження та ремонту

газонафтопроводів і газонафтоховищ

Івано-Франківський національний

технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

### 1. Вступ

Гідравлічна ефективність газопроводів виражає характер старіння їх в часі, що супроводжується зниженням пропускної здатності. Зниження пропускної

здатності системи трансукраїнських газопроводів лише на 1 % призведе до недоплати газу споживачам в обсязі понад 1 млрд.куб.м за рік.

Тому до точності і коректності оцінки коефіцієнта гідравлічної ефективності ставляться особливі вимо-

ги. Однак, розрахункові математичні моделі базуються на спрощених закономірностях течії газу в трубах, тому в самій постановці задачі прихована певна похибка, яка в кінцевому рахунку спотворює результат.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Вперше поняття гідравлічної ефективності було введено Ходановичем Є. І. [1] і трактувалося як зниження пропускної здатності газопроводу внаслідок зростання гідравлічного опору, викликане процесами старіння. Для числової оцінки введено коефіцієнт гідравлічної ефективності як відношення фактичної пропускної здатності (вимірної) до її теоретичного значення, визначеного шляхом реалізації певних математичних моделей. В подальшому розрахунки [2, 3] показали, що величина коефіцієнта гідравлічної ефективності може суттєво змінюватися на протязі коротких проміжків часу (добы, години) що суперечить уявленням про зміну технічного стану газопроводу, викликану процесами старіння. Результати подальших досліджень [4–6] показали, що причиною неадекватності слід вважати спрощення математичних моделей. Зокрема, в [4] доведено, що неврахування нестаціонарності режиму роботи газопроводу при виборі параметрів для розрахунку теоретичного значення пропускної здатності може призвести до суттєвої похибки, яка може перевищувати 50 %. З метою зменшення похибки в [5] введено поняття критерію не стаціонарності, за величиною якого вибирають режим відповідно до застосованої математичної моделі.

В [7] запропоновано статистичні методи визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності, застосування яких дозволяє отримати результати, що показують неадекватність вихідної математичної моделі. Занижені значення коефіцієнта гідравлічної ефективності на 4–6 % для нових газопроводів дають підстави стверджувати, що вихідна система рівнянь, які описують рух газу в трубах, не замкнута в плані закону збереження і перетворення енергії, оскільки з розгляду виключено внутрішню енергію газу, нехтування якою призводить до похибки в кінцевому результаті [12]. Енергетичний підхід до питання про гідравлічну ефективність газопроводів дозволить вдосконалити методику прогнозування гідравлічної ефективності.

## 3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є вдосконалення методики прогнозування гідравлічної ефективності газопроводів на основі встановлення закономірностей енергетичних втрат в процесі руху реального газу в трубах.

Вказана мета досягається шляхом реалізації наступних задач:

- аналіз впливу енерговитрат на транспортування газу по газопроводах на величину коефіцієнта гідравлічної ефективності;
- аналітичні дослідження газових потоків в трубах з врахуванням закону збереження і перетворення енергії та теплообміну з довкіллям та розробка методу

розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності на цій основі;

- співставлення результатів розрахунків коефіцієнта гідравлічної ефективності за запропонованою методикою з результатами, отриманими на основі існуючих методів.

## 4. Вдосконалення методики прогнозування гідравлічної ефективності газопроводу на основі енергетичного підходу

### 4.1. Дослідження енергетичних втрат в газових потоках

Для газових потоків, що рухаються в магістральних газопроводах, дисипація енергії виражається в перетворенні потенціальної енергії в кінетичну і далі у внутрішню енергію газу, яка внаслідок взаємодії з довкіллям розсіюється в ґрунт у вигляді тепла.

У загальному випадку нестаціонарний термодинамічний процес руху газу в трубопроводі може бути описаний системою диференціальних рівнянь, наведених у векторній формі [2, 4, 9, 10]:

$$\bar{g}p - \text{grad}\bar{P} + \mu\nabla^2\bar{W} - \rho\left(\frac{\partial\bar{W}}{\partial t} + \bar{W}\text{grad}\bar{W}\right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}\bar{W} = 0,$$

$$\bar{W}\frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \text{grad}\bar{T} = -\frac{1}{\rho}\text{div}\bar{q} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \frac{1}{\rho}(\Phi + \bar{q}),$$

де  $\rho$  – густина газу як функція просторових координат і часу;  $\bar{P}$  – вектор тиску;  $\bar{W}$  – вектор швидкостей із проєкціями на просторові координати  $u, v, w$ ;  $\bar{T}$  – вектор температурного поля;  $\bar{g}$  – тепловий потік у навколишнє середовище;  $\Phi$  – дисипативна функція Релея

Тоді математична модель одномірного руху газу в трубопроводі з урахуванням теплообміну може бути представлена у вигляді системи рівнянь [1, 4, 5, 11]

$$\frac{\partial\rho}{\partial x} + \alpha W \frac{\partial(\rho W)}{\partial x} + \rho g \frac{dh}{dx} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \frac{\lambda\rho W^2}{2d} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -W \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{T\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial W}{\partial x} \left( c_p T + \rho T \frac{\partial c_p}{\partial \rho} \right) + \xi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \right) = \frac{\xi_c}{\rho_c c_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\pi D \alpha_2}{c_c \rho_c F_c} (T_{\text{нав}} - T_c) + \frac{\pi D \alpha_2}{c_c \rho_c F_c} (T - T_c).$$

Тут, крім зазначених вище позначень, прийнято:  $c_p, c_c$  – ізобарна теплоємність газу та теплоємного матеріалу труб;  $T_{\text{нав}}, T_c$  – температура навколишнього середовища і стінки трубопроводу;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі від газу до стінки і від стінки в навколишнє середовище;  $D, d$  – зовнішній і внутрішній діаметри труби;  $\xi, \xi_c$  – 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.

Останнє рівняння системи (2) називають рівнянням енергії потоку газу. Воно відображає закон збереження енергії стосовно руху реального газу в трубопроводі. При цьому 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. Як показано в [6, 12], дане співвідношення шляхом приведення диференціальних операторів і нескладних перетворень може бути представлено у вигляді

$$\Lambda = \frac{k(T_{гр} - T)W}{\rho c_p T_{гр}} \quad (3)$$

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

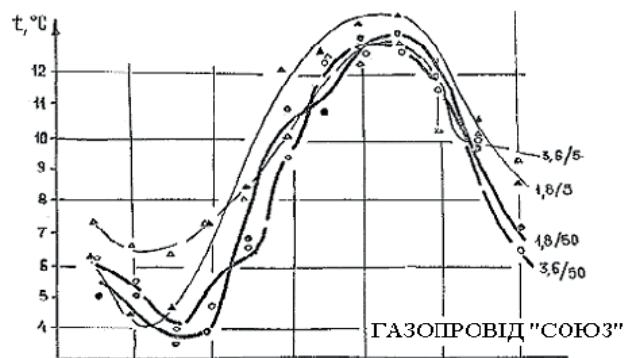
Визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності і динаміки його зміни в часі проводилося в рамках довгострокового і довготривалого виробничого експерименту, що виконувався на протязі 1999–2010 рр. на ділянках газопроводів «Братство», «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород», «Прогрес», які експлуатуються УМГ «Прикарпаттрансгаз». Для розрахунку коефіцієнту гідравлічної ефективності використовувалася методика, заснована на математичних моделях стаціонарної течії газу в трубах.

Початкові дані вибиралися з картограм запису параметрів газового потоку на компресорних станціях приладами, спеціально встановленими з метою проведення експерименту. Клас точності манометрів на початку і кінці лінійної ділянки складав 1.0, клас точності діафрагмових витратомірів складав 1.0 по тиску і 1.5 по перепаду.

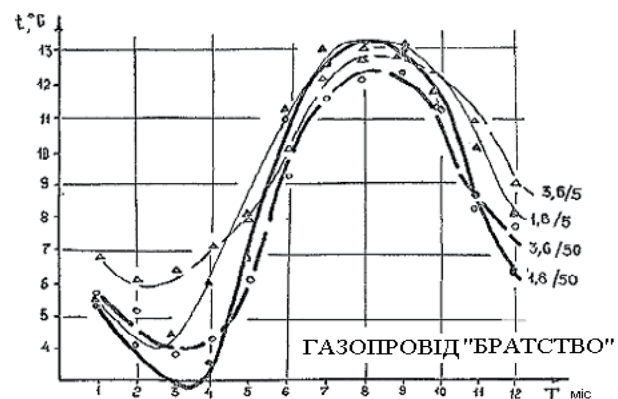
Рахунки коефіцієнтів гідравлічної ефективності виконувалися за вихідними даними, які відповідають стаціонарному режиму роботи газопроводу [5, 13].

Для визначення середньої по трасі температури ґрунту в непорушеному тепловому стані проводилися її вимірювання в різних точках траси і на різних глибинах. Із цією метою на різних відстанях від осі трубопроводу (5 м, 50 м) бурилися вимірювальні свердловини, в яких на різних глибинах (1.8 м і 3.6 м) постійно знаходилися шкальні ртутні термометри з теплоізолюваним балоном. Покази термометрів знімалися впродовж трьох років. На основі одержаних даних побудовані статистичні графічні залежності температури ґрунту залежно від календарної пори року. Результати у вигляді графіків приведені на рис. 1, а, б.

Їх аналіз показує, що на глибині закладення осі трубопроводу температура ґрунту в непорушеному тепловому стані протягом року змінюється в межах від 2.9 °С до 13.5 °С. При цьому мінімум температури характерний для березня, а максимум для вересня. В порівнянні з характером зміни температур повітря спостерігається запізнювання приблизно на 60 діб, яке пояснюється теплопровідністю ґрунту і великою інерційністю системи. Діапазон зміни температури ґрунту на глибині залягання трубопроводу складає від 8 до 14 %. Це значить, що сезонні зміни температури слід враховувати при розрахунках ефективності роботи газопроводу. Не врахування сезонних змін температури ґрунту призведе до збільшення випадкової похибки у визначенні коефіцієнта ефективності згідно з розрахунками на 1.5–2 %. Розрахунки для визначенням коефіцієнта гідравлічної ефективності на газопроводах проводилися кожного місяця – 2001÷2004 рр.



а



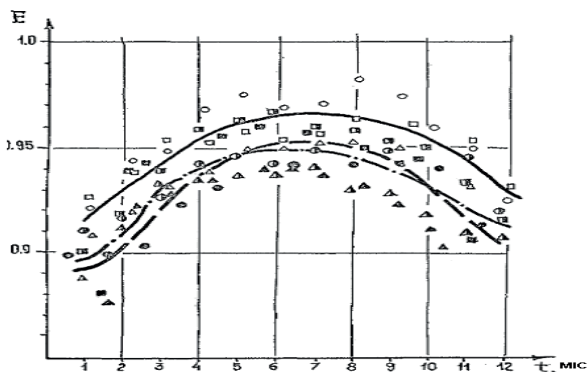
б

Рис. 1. Температури ґрунту в зоні проходження газопроводу: а – газопровід «Союз»; б – газопровід «Братство»

Результати розрахунків усереднювалися для кожного місяця. Таким чином були побудовані статистичні залежності коефіцієнтів гідравлічної ефективності газотранспортних систем від часу, які подані у вигляді графіків на рис. 2.

Як і слід було очікувати, коефіцієнт гідравлічної ефективності в часі знижується. Проте, залежно від умов експлуатації газопроводу або системи характер падіння може бути різним.

Розрахунки показують, що значення коефіцієнта гідравлічної ефективності може істотно змінитися (на величину до 50 %) протягом декількох годин. Окрім того, для нового газопроводу або після ретельного очищення значення коефіцієнта гідравлічної ефективності не досягає 100 %, навіть при вимірюваннях в умовах стаціонарного режиму. Це означає, що математична модель для визначення ефективності не враховує всіх видів енергетичних втрат. Тому, для оцінки ступеня впливу теплових енергетичних втрат проводилися статистичні дослідження на реальних режимах роботи газопроводів «Братство», «Союз» і «Уренгой-Помари-Ужгород».



--- газопровід «Братство» (□ – 2000; ○ – 2001; Δ – 2002)  
 - ● - газопровід «Союз» (□ – 2002; ○ – 2003; Δ – 2004)  
 — газопровід Уренгой – Помари – Ужгород (○ – 2001; □ – 2002; Δ – 2003)

Рис. 2. Залежність коефіцієнтів гідравлічної ефективності від часу

Згідно з законами класичної газової динаміки, температура і тиск є мірами енергії газового потоку. При цьому температура є критерієм внутрішньої енергії газового потоку, а тиск і швидкісний напір – критерієм механічної. Згідно з законами збереження і перетворення енергії, дисипація будь-якого його виду призводить до втрати загальної енергоємності замкнутої системи [3, 4, 7]

Коефіцієнт ефективності роботи газопроводів вказує на зниження енергоємності замкнутої системи (газового потоку) в результаті перетворення механічної енергії газового потоку в теплову, і подальших тепловтрат в навколишнє середовище.

Таким чином, величина теплопередачі від газового потоку в навколишнє середовище для магістрального газопроводу повинна бути тісно пов'язана з коефіцієнтом ефективності роботи газопроводу. Неврахування характеру і ступеня зміни внутрішньої енергії газу приводить до занижених значень коефіцієнта гідравлічної ефективності і збільшує його дисперсію навколо середнього значення. Отже, неврахування характеру та ступеня зміни внутрішньої енергії газу призводить до занижених значень коефіцієнта гідравлічної ефективності та збільшує його дисперсію навколо середнього значення.

Аналізуючи динаміку зміни коефіцієнта гідравлічної ефективності в часі, можна зауважити, що

при загальній тенденції до зниження його числового значення на протязі 2000–2004 рр. для газопроводів «Братство», «Союз» та «Уренгой-Помари-Ужгород» спостерігається його зростання в літній період і зниження в зимовий. За своєю природою гідравлічна ефективність є параметричною ознакою технічного стану внутрішньої порожнини газопроводу, і тому коефіцієнт гідравлічної ефективності не може принципово зростати в часі, якщо для цього не приймалися спеціальні заходи. Очевидно, що зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності в літній період для всіх вказаних газопроводів і на протязі значного проміжку часу повинно мати своє фізичне пояснення. Зауважимо, що максимальні значення коефіцієнта гідравлічної ефективності спостерігаються для моментів часу, в яких температура ґрунту в непорушеному тепловому стані є максимальною (серпень-вересень), а найнижчі значення – відповідають мінімуму температури ґрунту (лютий-березень), причому діапазон зміни досягає 4–6 %.

На рис. 3 приведено залежності зміни критерію  $\Lambda$  для умов траси газопроводів «Братство» і «Союз» за 2002 рік експлуатації. Як бачимо, максимум тепловіддачі в докілья спостерігається для лютого-березня, а мінімум – для серпня-вересня, причому діапазон зміни внутрішньої енергії в часі складає приблизно 3–5 %.

Це дозволяє стверджувати, що причиною зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності в літній період є зниження величини розсіювання внутрішньої енергії внаслідок збільшення температури докілья, що не враховують математичні моделі для розрахунку ефективності.

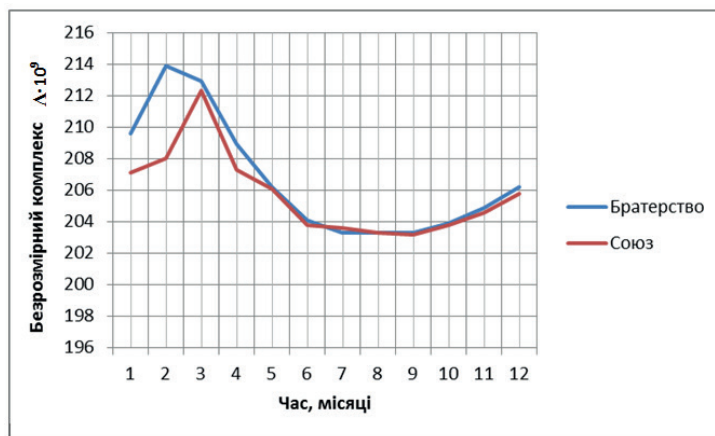


Рис. 3. Динаміка зміни критерію  $\Lambda$  на протязі року

Таким чином, для достовірності визначення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів необхідно проводити його розрахунки за методиками, які враховують не тільки зміну механічної енергії потоку газу в трубах, але й внутрішньої.

#### 4. 2. Енергетичний підхід до проблеми моделювання гідравлічної ефективності

Енергетичний баланс газового потоку в газопроводі описується рівнянням енергії, або узагальненим рівнянням Бернуллі, яке для випадку стаціонарної неізотермічної течії газу має вигляд [4, 10, 12]:

$$gh_1 + u_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = gh_2 + u_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} + q + l, \quad (4)$$

де індекси «1» і «2» відносяться до початкового і кінцевого перерізів газового потоку;  $h$  – геодезична позначка перерізу над площиною порівняння (питома потенціальна енергія положення);  $u$  – питома внутрішня енергія;  $\frac{P}{\rho}$  – питома потенціальна енергія тиску;  $\frac{w^2}{2}$  – питома кінетична енергія потоку;  $q$  – питома величина теплообміну;  $l$  – питома робота газового потоку.

Як відомо [1, 4, 14]:

$$u = c_v T = (c_p - R)T = \left( \frac{c_p}{c_p - c_v} - 1 \right) RT = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho}; \quad (5)$$

$$q = \frac{k_m \pi D x}{M} (T - T_{гр}); \quad \frac{P}{\rho} = zRT,$$

де  $k$  – показник адиабати;  $k_m$  – повний коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту;  $D$  – зовнішній діаметр відрізка газопроводу довжиною  $x$ ;  $M$  – масова витрата газу;  $R$  – газова стала;  $z$  – коефіцієнт стисливості газу;

$T, T_{гр}$  – температури газу і ґрунту відповідно  $\frac{P}{\rho}$ .

В диференціальній формі (4) з врахуванням (5) має вигляд:

$$\frac{zRT}{k-1} \frac{dP}{\rho} - \frac{M^2 (zRT)^2}{F^2} \frac{dP}{P^3} + (gi - \frac{k_m \pi D}{M} (T - T_{гр})) dx + \frac{\lambda M^2 (zRT)^2}{2F^2 P^2 d} dx = 0, \quad (6)$$

де  $i=h/L$  – геометричний нахил ділянки газопроводу внутрішнім діаметром  $d$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу;  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Для ітерування (6) розділимо на  $\frac{zRT}{P^2}$ , зробимо заміну  $P^2 = u$  та позначимо:

$$a = \frac{M^2 zRT}{F^2} (k-1);$$

$$b = \frac{2(k-1)}{zRT} (gi - \frac{k_m \pi D}{M} (T - T_{гр}));$$

$$c = \frac{M^2 \lambda zRT}{dF^2} (k-1).$$

Одержимо

$$du - a \frac{du}{u} + (bu + c) dx = 0. \quad (7)$$

Після розділення змінних отримаємо диференціальне рівняння:

$$\left( 1 + b \frac{a}{c} \right) \frac{du}{(bu + c)} - \frac{a}{c} \frac{du}{u} + dx = 0. \quad (8)$$

При інтегруванні (8) врахуємо, що при зміні лінійної координати від 0 до  $x$  шукана функція змінюється в межах від  $u_1$  до  $u_x$ . Тоді розв'язок має вигляд:

$$\frac{bu_x + c}{bu_1 + c} = \exp \left( -b \left( \frac{a}{c} \ln \frac{u_x}{u_1} \right) / \left( 1 + b \frac{a}{c} \right) \right). \quad (9)$$

В параметрах технологічного процесу транспорту газу отримаємо:

$$\frac{(gi - \frac{Dk}{M} \Delta T)P + \frac{MzRT}{d}}{(gi - \frac{Dk}{M} \Delta T)P + \frac{MzRT}{d}} = \exp \left( - \frac{2(k-1)(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T}{M}) \frac{x}{zRT} \frac{-\ln \frac{P}{P_H}}{1 + \frac{2(k-1)(gi - \frac{Dk}{M} \Delta T) d}{zRT}} \right).$$

Отримана залежність дозволяє визначити тиск  $P_x$  в довільному перерізі газопроводу  $x$  при відомій витраті газу і початковому тиску  $P_H$ . Якщо в одержаній залежності прийняти  $x=L$ , то отримаємо тиск в кінці ділянки газопроводу  $P_x = P_K$ . Тоді одержимо залежність для визначення масової витрати газу:

$$\frac{(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T)P_K^2 + \frac{\lambda}{d} \left( \frac{MzRT}{F} \right)^2}{(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T)P_H^2 + \frac{\lambda}{d} \left( \frac{MzRT}{F} \right)^2} = \exp \left( - \frac{2(k-1)(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T}{M}) \frac{L + \frac{d}{\lambda} \ln \frac{P_x^2}{P_H^2}}{1 + \frac{2(k-1)(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T) d}{zRT}}}{d} \right), \quad (10)$$

де  $\Delta T = T_{гр} - T$ .

Трансцендентне рівняння (10) не може представити розв'язок відносно масової витрати  $M$  в явному вигляді. Тому пропонується ітераційна процедура, яка може бути реалізована графічним методом. З цієї метою залежність (10) представляється у вигляді двох функцій масової витрати газу:

$$\frac{(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T)P_K^2 + \frac{\lambda}{d} \left( \frac{MzRT}{F} \right)^2}{(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T)P_H^2 + \frac{\lambda}{d} \left( \frac{MzRT}{F} \right)^2} = F_1(M) \quad (11)$$

$$\exp \left( - \frac{2(k-1)(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T}{M}) \frac{L + \frac{d}{\lambda} \ln \frac{P_x^2}{P_H^2}}{1 + \frac{2(k-1)(gi - \frac{\pi D k_m \Delta T) d}{zRT}}}{d} \right) = F_2(M).$$

Алгоритм розрахунку представляє собою послідовність:

1. Задається масив значень об'ємної продуктивності газопроводу при стандартних умовах  $Q_i$ .
2. Для кожного з значень масиву визначається масова витрата

$$M_i = Q_i \rho_{CT},$$

( $\rho_{CT}$  – густина газу при стандартних умовах)

3. Для кожного з значень масиву визначається число Рейнольдса та коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу

$$Re = C \frac{Q_i \Delta}{d \eta},$$

$$\lambda = 0,067 \left( 158 / Re + 2k_e / d \right)^{0,2}, \quad (12)$$

де  $C$  – коефіцієнт, що залежить від вибору системи одиниць вимірювання;  $\Delta, \eta$  – відносна густина і динамічна в'язкість газу;  $k_e$  – еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні стінок труб.

4. За (11) будуються графічні залежності  $F_1(M)$  та  $F_2(M)$ . Точка перетину кривих відповідає розрахунковій витраті газу.

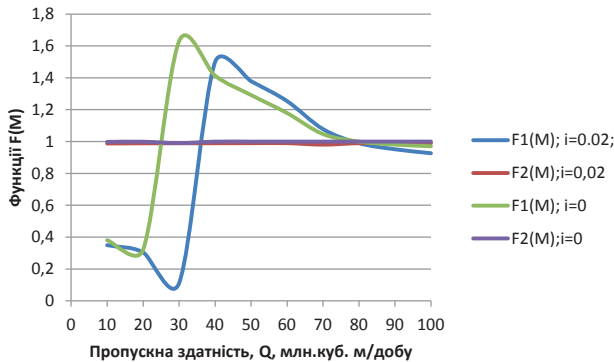


Рис. 4. Визначення пропускної здатності газопроводу

### 4. 3. Результати досліджень та їх аналіз

Розраховані таким чином значення пропускної здатності складають 81,912 млн. м<sup>3</sup>/добу для умов розрахунку без врахування профілю траси і 80,289 млн. м<sup>3</sup>/добу з врахуванням його впливу. Розрахована за класичною методикою пропускну здатність складає 85,3147 млн. м<sup>3</sup>/добу. Розбіжність між результатами складає 3,99 % в першому випадку і 5,89 % в другому.

Результати проведених досліджень покладено в основу методики розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів з врахуванням зміни внутрішньої енергії газового потоку, суть якої полягає в наступному:

1. На діючому магістральному газопроводі в умовах квазістаціонарного руху газу проводять ізохронні вимірювання

- тисків газу на початку  $P_H$  і в кінці  $P_K$  ділянки;
- температур газу на початку  $T_H$  і в кінці  $T_K$  ділянки;
- витрати газу  $Q$ ;
- температура ґрунту в непорушеному тепловому стані, фізичні властивості газу та геометричні характеристики газопроводу вважаються відомими.

2. З метою оцінки міри нестационарності газового потоку визначають критерій нестационарності [ 4, 15 ]:

$$N_t = \frac{\delta Q d}{\lambda w t},$$

де  $\delta Q = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{сep}}$  – відносна зміна продуктивності

на проміжку часу  $\tau$ ;  $w = \frac{4Q_{сep}}{\pi d^2} \cdot \frac{P_{сr}}{P_{сp}} \cdot \frac{T_{сep}}{T_{сr}} z$  – середня по

довжині й усереднена в часі швидкість газу.

Технологічний режим роботи газопроводу вважається квазістаціонарним у тому випадку, якщо величина критерію нестационарності складає  $N_t < 1,4 \cdot 10^{-6}$ . В іншому випадку режим руху газу вважається нестационарним, і похибка в обчисленні коефіцієнта ефективності перевищить 5 %, тому результати даної серії вимірювань слід відкинути і перейти до наступної серії.

3. Визначаються за (12) число Рейнольдса і коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу.

4. Визначається середня температура і середній тиск на ділянці газопроводу

$$T_{сp} = T_0 + \frac{T_H - T_K}{\ln \frac{T_H - T_0}{T_K - T_0}} \quad P_{сp} = \frac{2}{3} \left( P_H + \frac{P_{KJ}^2}{P_H + P_K} \right),$$

де  $T_0$  – температура ґрунту.

5. Визначають коефіцієнт стисливості газу

$$z = 1 - 5,5 \frac{P_{сp} \Delta^{1,3}}{T_{сp}^{3/3}}.$$

6. З (10) методом ітерацій визначають масову витрату газу і переводять її в пропускну здатність газопроводу при стандартних умовах, вважаючи її значення теоретичним.

7. Визначають коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу

$$E = \sqrt{Q_{ф} / Q_T}.$$

За запропонованою методикою проведено розрахунки коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів «Братство» і «Союз» за 12 місяців 2004 року. Результати приведено на рис. 5, на якому показано результати розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності для вказаних газопроводів за класичною методикою, що не враховує зміну внутрішньої енергії газу.

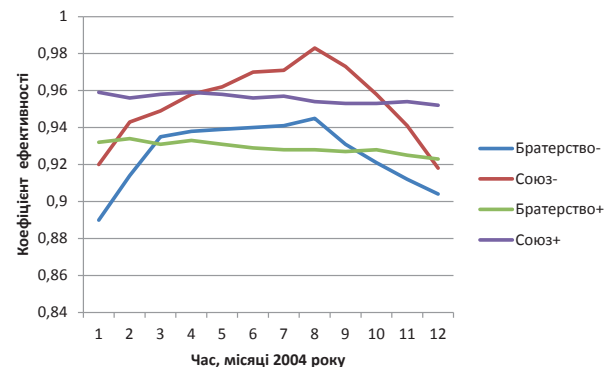


Рис. 5. Результати розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводів Братство і Союз без врахування зміни внутрішньої енергії (-) та з її врахуванням (+)

Як видно з графіків, врахування зміни внутрішньої енергії газового потоку призводить до принципово відмінної тенденції зміни гідравлічної ефективності в часі, що відповідає апріорним уявленням про коефіцієнт ефективності як діагностичну ознаку.

## 5. Висновки

Максимальні значення коефіцієнта гідравлічної ефективності спостерігаються для моментів часу, в яких температура ґрунту в непорушеному тепловому стані є максимальною (серпень-вересень), а найнижчі значення – відповідають мінімуму температури ґрунту (лютий-березень), причому діапазон зміни досягає 4–6 %. Причиною зростання коефіцієнта гідравлічної ефективності в літній період є зниження величини розсіювання внутрішньої енергії внаслідок збільшен-

ня температури довкілля, що не враховують математичні моделі для розрахунку ефективності.

На основі аналізу рівняння енергії газового потоку з урахуванням теплообміну з довкіллям одержані аналітичні залежності, що зв'язують основні параметри руху газу в трубопроводі і на цій основі запропоновано методику розрахунку теоретичного значення пропускної здатності газопроводу і його гідравлічної ефективності.

Запропонована методика враховує всі види гідравлічних втрат енергії в газовому потоці ( в тому числі дисипацію в довкілля), а результати проведених розрахунків показують, що врахування зміни внутрішньої енергії газового потоку призводить до принципово відмінної тенденції зміни гідравлічної ефективності в часі, що відповідає апріорним уявленням про коефіцієнт ефективності як діагностичну ознаку.

## Література

1. Ходанович, Е. И. Об изменении эффективности газопровода [Текст] / Е. И. Ходанович, Н. Ф. Нефелова // Труды ВНИИ-газа. – 1957. – Вып. 2. – С. 127–129
2. Бобровский, С. А. Трубопроводный транспорт газа [Текст] / С. А. Бобровский, С. Г. Щербаков, Е. И. Яковлев и др.; под. общ. ред. С. А. Бобровский. – М.: Наука, 1976. – 491 с.
3. Галиуллин, З. Т. Оценка влияния инерционных сил при нестационарном течении газа в магистральных газопроводах [Текст] / З. Т. Галиуллин, И. Е. Ходанович, В. В. Девичев и др.; под. общ. ред. З. Т. Галиуллин. – Магистральные газопроводы, 1975. – С. 132–139.
4. Грудз, В. Я. Обслуговування і ремонт газопроводів [Текст] / В. Я. Грудз, Д. Ф. Тимків, В. Б. Михалків та ін.; под. общ. ред. В. Я. Грудз. – Івано-Франківськ: Лілея НВ, 2009. – 711 с.
5. Грудз, В. Я. Технічна діагностика трубопроводних систем [Текст] / В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. В. Костів та ін. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 511 с.
6. Ковалко, М. П. Трубопроводный транспорт газа [Текст] / М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін.; под. общ. ред. М. П. Ковалко. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
7. Ставровский, Е. Р. Статистические методы расчета коэффициента гидравлического сопротивления газопровода [Текст] / Е. Р. Ставровский, М. Г. Сухарев. – М.: ВНИИЭгазпром, 1970. – 78 с.
8. Чарный, И. А. Неустановившиеся движения реальной жидкости в трубах [Текст] / И. А. Чарный. – М.: Недра, 1975. – 224 с.
9. Ходанович, И. Е. Об эффективности продувки газопровода [Текст] / И. Е. Ходанович // Газовая промышленность. – 1958. – № 3. – С. 24–25.
10. Яковлев, Е. И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами [Текст] / Е. И. Яковлев // Изв.вузов. Нефть и газ. – 1968. – № 2. – С. 72–76.
11. Eakin, B. Application of the BWR equation to hydrocarbon-carbon dioxide mixtures [Text] / B. Eakin. – Thermod. Transp. Prop. Gas and Liquids, Sympos. Lafayette, 1959. – P. 195–204.
12. Ellington, R. Thermodynamic properties of methane – nitrogen mixtures [Text] / R. Ellington. – Sympos. Lafayette, 1959. – P. 102–109.
13. Gonzalez, M. Graphical viscosity correlation for hydrocarbons [Text] / M. Gonzalez, A. L. Lee // AIChE Journal. – 1968. – Vol. 14, Issue 2. – P. 242–244. doi: 10.1002/aic.690140208
14. Kao, R. Thermodynamic properties of LNG [Text] / R. Kao // Cryogenics Ind. Gases. – 1970. – Vol. 5, Issue 5. – P. 24–31.
15. McCarty, R. A comparison of mathematical models for the prediction of LNG densities [Text] / R. McCarty. – Nat. Bur. Stand., USA, Internal Report 77-867, 1977. – 60 p.
16. Molenda, J. Gaz ziemny [Text] / J. Molenda. – Katowice: Slask, 1974. – 470 p.