

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОПРОВОДІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ

А.І. Ксенич, М.Д. Середюк

ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,  
e-mail: tzn g @ n i n g . e d u . u a

*Наведено результати експериментальних досліджень газодинамічних процесів, що супроводжують рух газу в поліетиленових газопроводах. Запропоновані формули для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького тиску для різних режимів руху газу.*

Ключові слова: газові мережі низького тиску, поліетиленові труби, гідравлічний розрахунок, коефіцієнт гідравлічного опору, експериментальний метод.

*Приведены результаты экспериментальных исследований газодинамических процессов, сопровождающих движение газа в полиэтиленовых газопроводах. Предложены формулы для коэффициента гидравлического сопротивления полиэтиленовых газопроводов низкого давления при различных режимах движения газа.*

Ключевые слова: газовые сети низкого давления; полиэтиленовые трубы, гидравлический расчет, коэффициент гидравлического сопротивления, экспериментальный метод.

*The results of experimental studies of gas-dynamic processes accompanying gas flow in plastic pipelines are given. The formulae for the coefficient of hydraulic resistance of polyethylene gas pipelines of low pressure under different regimes of motion of the gas have been proposed.*

Keywords: gas networks of low pressure, polyethylene pipes, hydraulic calculation, friction factor, the experimental method.

На сьогодні пріоритетним напрямом в Україні є широке впровадження енергоефективних та енергоощадних технологій в усіх сферах господарської діяльності. Газові мережі населених пунктів належать до енерговитратних елементів систем газопостачання. Одним із шляхів підвищення енергоефективності газопостачання є зменшення витрат тиску у процесі транспортування газу.

Однією із переваг поліетиленових газопроводів саме є менша гідравлічна енерговитратність порівняно зі сталевими газопроводами. Дослідження вчених, у тому числі зарубіжних, довели, що газодинамічні процеси, які супроводжують рух газу в поліетиленових газопроводах, мають низку особливостей [1,2]. Ось чому для проведення гідравлічних розрахунків поліетиленових газопроводів не можна використовувати загальноприйняті формули для коефіцієнта гідравлічного опору, які одержані в результаті досліджень закономірностей руху рідини або газу в сталевих трубах. Особливості руху газу в поліетиленових газопроводах можна виявити лише дослідним шляхом. Це дасть змогу одержати адекватні залежності для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів.

Для проведення експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів розроблена експериментальна установка, яка розміщена в лабораторії трубопровідного транспорту університету. Основною частиною установки є поліетиленовий газопровід діаметром 32x3 мм та довжиною 63,65 м. Робочим середовищем є повітря, що

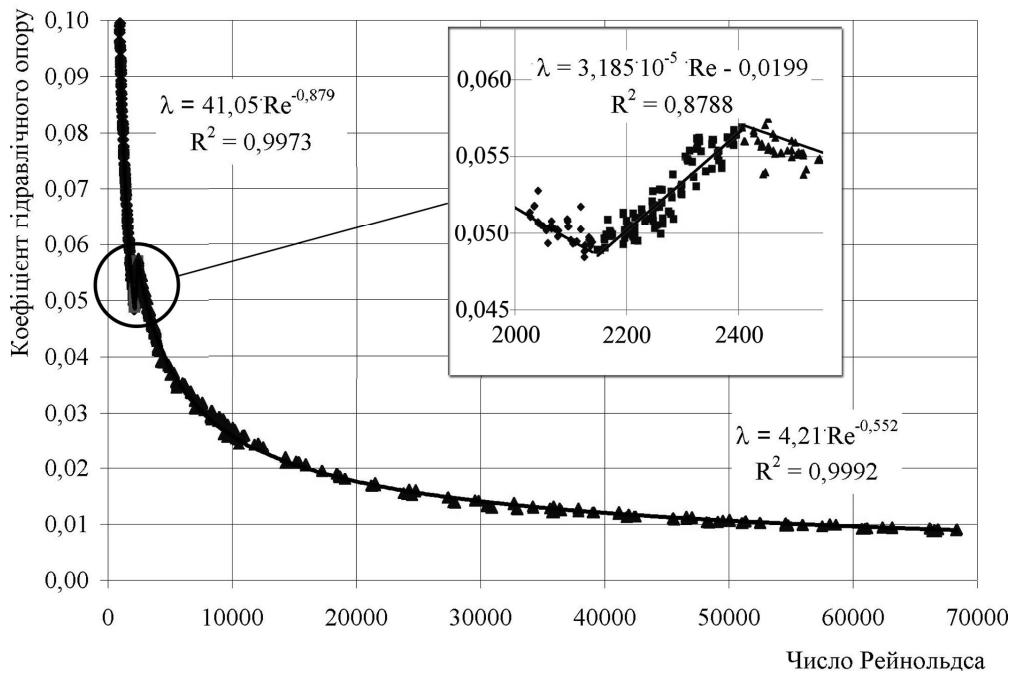
нагнітається в модельний газопровід за допомогою відцентрового компресора.

Режим роботи модельного газопроводу можна змінювати шляхом дроселювання потоку робочого середовища. Визначення витрати повітря в експериментальній установці здійснюється за допомогою аналогового давача витрати AWM720P1 фірми Honeywell, який характеризується високою точністю вимірювання. Для визначення перепаду тиску повітря в поліетиленовому газопроводі використано сучасний аналоговий давач диференційного перепаду тиску MPX5010DP фірми Freescale Semiconductor. З метою врахування температури та вологості повітря, що транспортується модельним газопроводом, встановлено цифровий давач SHT15 фірми Sensirion.

Одержані аналогові сигнали з давачів оцифровуються в аналогово-цифрових перетворювачах і посиляються на мікроконтролерний блок керування, який за допомогою послідовного інтерфейсу передачі даних надсилає інформацію на персональний комп'ютер користувача.

Для отримання даних вимірювання та їх подальшої обробки на комп'ютері розроблено програмне забезпечення GMCOM в середовищі об'єктно-орієнтованої мови програмування DELPHI.

За допомогою експериментальної установки нами проведені експериментальні дослідження енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску в діапазоні витрат, що відповідає робочим умовам в системах газопостачання населених пунктів.



**Рисунок 1 – Узагальнені результати математичного моделювання залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса**

Для проведення математичної обробки результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску розроблена методика, яка дозволяє врахувати всі параметри, що мають суттєвий вплив на газодинамічні процеси поліетиленового газопроводу. Зокрема враховувався барометричний тиск, вологість та коефіцієнт стисливості робочого середовища. Математичній обробці підлягає кожен із дослідів, що відповідав певному значенню витрати, температури та вологості робочого середовища.

Результатами математичної обробки результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів є графічні залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу залежно від числа Рейнольдса для різних режимів руху газу.

Для практичного використання графічні залежності необхідно описати аналітичними виразами. З урахуванням специфіки газодинамічних процесів руху газу в газопроводах низького тиску можна прогнозувати, що коефіцієнт гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску є степеневою функцією числа Рейнольдса

$$\lambda = a \cdot Re^b, \quad (1)$$

де  $a, b$  – коефіцієнти, які залежить від режиму руху газу в газопроводі.

Регресійні моделі коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів одержані за допомогою методів математичної статистики. Для підвищення адекватності розроблених регресійних моделей серед даних експерименту виявлено ті дані, які є помилковими. Для цього кожену точку вибірки перевірено на виконан-

ня умови Ст'юдента [3]. Експериментальні точки, для яких зазначена умова не виконувалася, вважалися помилковими і не враховувалися при одержанні математичних моделей.

За результатами обробки всієї множини даних багатосерійних експериментів нами одержані узагальнені математичні моделі залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса для ламінарного, критичного та турбулентного режимів руху газу в зоні гідравлічного гладких труб (рис. 1). Окрім того, уточнені критичне та перехідне числа Рейнольдса, які розділяють режими руху газу.

Виявлено, що перехід від ламінарного до критичного режиму руху газу в поліетиленовому газопроводі низького тиску відповідає такому критичному числу Рейнольдса  $Re_{k1} = 2150$ . Перехід від критичного до турбулентного режиму руху газу відповідає числу Рейнольдса  $Re_{k2} = 2400$ .

Із рис. 1 випливає, що коефіцієнт гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску може бути розрахований за такими формулами:

– для ламінарного режиму руху  $Re < Re_k = 2150$

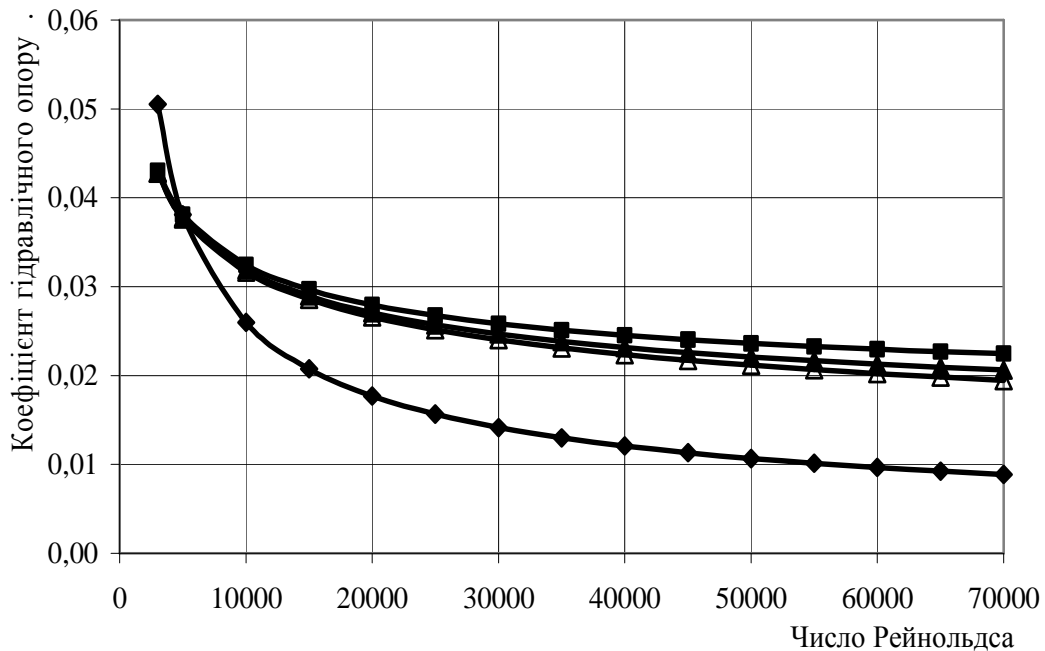
$$\lambda = 41,05 \cdot Re^{-0,879}, \quad (3)$$

– для критичного режиму руху  $Re_k < Re < Re_{m1} = 2400$

$$\lambda = 3,185 \cdot 10^{-5} Re - 0,0199, \quad (4)$$

– для турбулентного режиму руху в зоні гідравлічно гладких труб

$$\lambda = 4,21 \cdot Re^{-0,552}. \quad (5)$$



◆ - дослідні значення коефіцієнта гідравлічного опору ; ■ - теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, обчислене за формулою Альтшуля за  $k_e=0,002$  см; ▲ - теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, обчислене за формулою Альтшуля за  $k_e=0,0007$  см; △ - теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, обчислене за формулою Блазіуса

**Рисунок 2 – Порівняння гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску за наявними та пропонованою методиками**

Всі отримані математичні моделі для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів мають високу ступінь вірогідності апроксимації, що свідчить про їх достовірність.

Порівняємо між собою фактичну за результатами експериментів та розраховану за наявними на сьогодні методами енерговитратність поліетиленових газопроводів.

Зовнішні газопроводи низького тиску систем газопостачання населених пунктів працюють здебільшого в зоні гідравлічного гладких труб турбулентного режиму. Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору у зазначених умовах чинні нормативні документи передбачають використання ступеневі моделі Альтшуля [4]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_e}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (6)$$

Абсолютну еквівалентну шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленового газопроводу приймаємо рівною  $k_e=0,002$  см згідно з вимогами вітчизняного нормативного документа [4] та  $k_e=0,0007$  см згідно з вимогами відповідного нормативного документа Російської Федерації СП 42-101-2003 [5].

У класичній гідродинаміці для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору в зоні гідравлічно гладких труб широко використовується емпірична формула Блазіуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (7)$$

Результати порівняння дослідних значень та розрахованих за наведеними вище формулами значень коефіцієнта гідравлічного опору модельного поліетиленового газопроводу низького тиску для різних значень витрат газу за турбулентного режиму руху газу в зоні гідравлічних гладких труб наведено на рис. 2.

Рисунок 2 свідчить, що формули, наведені в чинних нормативних документах, дають значення коефіцієнта гідравлічного опору, які суттєво різняться від фактичних даних енерговитратності поліетиленових газопроводів, одержаних у результаті експериментальних досліджень. Відносна різниця результатів залежить від режиму руху газу і змінюється від  $\delta=0\%$  для числа Рейнольдса  $Re=5000$  до  $\delta=60\%$  для числа Рейнольдса  $Re=70000$ .

Аналогічна картина спостерігається у разі використання формули Блазіуса для визначення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького тиску. Відносна різниця розрахованих і фактичних значень коефіцієнта гідравлічного опору змінюється від  $\delta=0\%$  для числа Рейнольдса  $Re=5000$  до  $\delta=54\%$  для числа Рейнольдса  $Re=70000$ .

Таким чином, використання одержаних нами математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького тиску замість рекомендованих чинними нормативними документами і класичною гідромеханікою дає змогу значно підвищити точність проектних та експлуатаційних розрахунків газових мереж населених пунктів.

На основі результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів розроблена уточнена методика розрахунку газових мереж низького тиску, яка передбачає використання наведених вище математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору. Методика реалізована в оригінальному програмному забезпеченні GMNU на мові програмування Visual Basic в середовищі Microsoft Excell.

Розроблене програмне забезпечення GMNU дає змогу проводити проектні та експлуатаційні гідравлічні розрахунки газової мережі низького тиску довільної конфігурації як за нормативною, так і за розробленою уточненою методикою.

Для прикладу використано програму GMNU для проектного розрахунку типової кільцевої газової мережі низького тиску сільського населеного пункту сумарною довжиною 3,02 км. Питома шляхова витрата газу для всіх ділянок приймалася рівною  $q = 0,125 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м})$ . Допустимі втрати тиску у газовій мережі становили  $\Delta P_{\text{доп}} = 1200 \text{ Па}$ .

Проведено такі три варіанти гідравлічного розрахунку газової мережі:

- 1) проектний розрахунок згідно з нормативною методикою, що рекомендована [4];
- 2) проектний розрахунок з використанням уточненої методики;
- 3) експлуатаційний розрахунок з використанням уточненої методики.

Як засвідчило порівняння результатів розрахунку, проектні параметри газової мережі за нормативною та уточненою методиками суттєво відрізняються. Різняться як діаметри деяких ділянок, так і значення тиску у вузлах газової мережі. Зокрема на деяких ділянках уточнена методика передбачає укладання труб менших діаметрів, що зменшує капіталовкладення в будівництво газової мережі. Нами виконаний техніко-економічний розрахунок двох конкуруючих варіантів системи розподілу газу із поліетиленових труб, отриманих за результатами розрахунку. У результаті одержано, що за реалізації варіанта, розрахованого за уточненою методикою, капіталовкладення у будівництво системи газифікації села зменшуються на 18,1%.

Порівняння результатів експлуатаційних розрахунків поліетиленової газової мережі низького тиску за двома методиками виявило суттєві відмінності у розподілі тиску газу в елементах мережі, а отже в режимі роботи газопроводів. Так за нормативною методикою сумарний перепад тиску газу по довжині основного напрямку становить 753 Па. За уточненою методикою розрахунку цей параметр становить 521 Па, що на 31% менше.

Таким чином, апробація розробок для конкретної газорозподільної системи довела, що використання уточненої методики у процесі проектних розрахунків поліетиленових газових мереж низького тиску дає можливість скоригувати до менших значень діаметри ділянок і тим самим помітно зменшити витрати на будівни-

цтво системи газопостачання населеного пункту. Зазначений висновок можна поширити на газову мережу низького тиску довільної конфігурації. Це впливає із порівняльного аналізу результатів розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску за традиційними та запропонованими формулами (рис. 2).

Проведені дослідження засвідчили, що наявні на сьогодні методики гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску не можуть бути використані для поліетиленових газопроводів, оскільки вони дають суттєву неточність при визначенні коефіцієнтів гідравлічного опору, що призводить до недостовірності результатів проектних та експлуатаційних розрахунків систем газопостачання. Тому вважаємо доцільним увести корективи в державні та галузеві нормативні документи щодо методики гідравлічного розрахунку поліетиленових газопроводів, передбачивши застосування одержаних нами формул для коефіцієнта гідравлічного опору.

### *Література*

1 Ксеніч А.І. Порівняння енерговитратності транспортування газу в сталевих і поліетиленових газопроводах систем газопостачання населених пунктів / А.І. Ксеніч, М.Д. Середок // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2009. – № 3(21). – С.20-25.

2 Карасевич А.М. Анализ результатов экспериментов по оценке гидравлического сопротивления полиэтиленовых труб / А.М. Карасевич, М.Г. Сухарев, И.В. Тверской // Развитие компьютерных комплексов моделирования, оптимизации режимов работы систем газоснабжения и их роль в диспетчерском управлении технологическими процессами в газовой отрасли. Сборник тезисов докладов I международной научно-технической конференции «DISCOM 2002». – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – С. 41-42.

3 Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М: Наука, 1978. – 508 с.

4 Газопостачання: ДБН В.2.5 – 2– 2001. – [Чинний від 2001– 08– 01]. – К.: Держбуд України, 2001. – 286 с. [Державні будівельні норми України].

5 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб: СП 42-101-2003. – [Действующий от 2003-07-08]. – М.: ЗАО "Полимергаз", ГУП ЦПП, 2003. – 223 с. – [Свод правил по проектированию и строительству].

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
27.10.11*

*Рекомендована до друку Оргкомітетом  
науково-технічної конференції  
“Нафтогазова енергетика – 2011”,  
яка відбулася в ІФНТУНГ  
10-14 жовтня 2011 р.*