

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтохранилищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

доктор технических наук,

профессор кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Serediuk Mariia

Doctor of Technical Sciences, Professor of the

Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ В

ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО

СОПРОТИВЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ СЕТЯХ НАСЕЛЕННЫХ

ПУНКТОВ

CALCULATION OF HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT IN

GAS NETWORKS OF INHABITED LOCALITY

Анотація. Шляхом математичного моделювання встановлено наслідки застосування формули Хофера для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору замість формул, передбачених чинним нормативним документом ДБН В.2.5-20-2018, при газодинамічних розрахунках газових мереж населених пунктів. Виявлено ступінь впливу зазначеної зміни математичної моделі на результати розрахунку коефіцієнта

гідравлічного опору в сталевих і поліетиленових газових мережах низького, середнього і високого тиску залежно від режиму руху газу.

Ключові слова: газодинамічний розрахунок, природний газ, газові мережі низького, середнього і високого тиску, сталеві труби, поліетиленові труби.

Аннотація. Путем математического моделирования установлены последствия применения формулы Хофера для определения коэффициента гидравлического сопротивления вместо формул, предусмотренных действующим нормативным документом ДБН В.2.5-20-2018, при газодинамических расчетах газовых сетей населенных пунктов. Установлено степень влияния изменения математической модели на результаты расчета коэффициента гидравлического сопротивления в стальных и полиэтиленовых газовых сетях низкого, среднего и высокого давления в зависимости от режима движения газа.

Ключевые слова: газодинамический расчет, природный газ, газовые сети низкого, среднего и высокого давления, стальные и полиэтиленовые трубы.

Summary. The consequences of applying Hofer's formula for the coefficient of hydraulic resistance instead of the formulas provided by the current normative document DBN B.2.5-20-2018 in gas-dynamic calculations of gas networks of settlements have been established by mathematical modeling. The influence of this change in the mathematical model on the results of calculating the coefficient of hydraulic resistance in steel and polyethylene gas networks of low, medium and high pressure depending on the mode of gas movement is revealed.

Key words: gas-dynamic calculation, natural gas, low, medium and high pressure gas networks, steel pipes, polyethylene pipes.

Вступ. Газодинамічні розрахунки газових мереж населених пунктів виконуються при проектуванні, експлуатації та редизайні систем газопостачання населених пунктів. Це визначає важливе теоретичне і практичне значення досліджень, присвячених удосконалення методів і засобів проектних та експлуатаційних газодинамічних розрахунків газових мереж різного тиску розгалуженої та кільцевої структури.

В Україні газодинамічні розрахунки газових мереж населених пунктів виконують за методом, що запропонований у чинному нормативному документі ДБН В.2.5-20-2018 «ГАЗОПОСТАЧАННЯ» [1]. У вітчизняній практиці наведені в [1] розрахункові формули десятки років успішно застосовувалися як при проектуванні, так і при експлуатації систем газопостачання населених пунктів [2; 3; 4; 5; 6].

В останні роки у фахівців, що проектують та експлуатують системи газопостачання населених пунктів, появилася можливість застосовувати сучасні програмні продукти, які математично моделюють газодинамічні процеси, що супроводжують транспортування газу в складних розподільних газопровідних мережах. Конкретним прикладом такого програмного забезпечення може слугувати програмний комплекс (ПК) SIMONE - сучасний провідний європейський стандарт програмного забезпечення для моделювання та оптимізації магістральних і розподільних газопроводів.

На сьогодні ПК SIMONE вже використовується в Україні як ефективний інструмент при проектуванні, експлуатації та оптимізації структури та режимів роботи газових мереж населених пунктів.

Важливе теоретичне і практичне значення має вирішення питання відповідності теоретичних положень газодинамічного розрахунку газових мереж, закладених в обчислювальні алгоритми ПК SIMONE, вимогам чинного нормативного документа [1].

Газодинамічний розрахунок газопроводу полягає у визначенні втрат тиску з врахуванням геометричних характеристик трубопроводу, фізико-хімічних властивостей газу та газодинамічного режиму його транспортування. За усталених режимів руху газу в газопроводі методи газодинамічного розрахунку можуть відрізнятися, у першу чергу, математичними моделями для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору. Вибір формул для зазначеного коефіцієнта визначає результати розрахунку втрат тиску, тобто величину газодинамічної енерговитратності при транспортуванні газу в газопроводах. Проектний комплекс SIMONE пропонує для коефіцієнта гідравлічного опору в газових мережах населених пунктів застосування аналітичних залежностей, що раніше не використовувались у вітчизняній практиці. Такий підхід спричинить вплив на результати проектних та експлуатаційних розрахунків систем газопостачання населених пунктів, величину якого доцільно оцінити.

Мета роботи – співставлення результатів розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору в газових мережах за моделями, традиційними для вітчизняної практики, та передбаченими сучасними програмними комплексами для оцінювання ступеня відповідності останніх нормативній методиці [1].

Згідно з [1] коефіцієнт гідравлічного опору слід обчислювати так:

у газових мережах низького тиску за ламінарного режиму руху газу

($Re < 2000$)

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (1)$$

у газових мережах низького тиску за перехідного режиму руху газу

($2000 < Re < 4000$)

$$\lambda = 0,0025 Re^{1/3}, \quad (2)$$

у газових мережах низького, середнього і високого тиску у разі турбулентного режиму руху газу ($Re > 4000$) за формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_e}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

де Re - число Рейнольдса у газопроводі;

$$Re = 0,0354 \frac{Q_n}{D \cdot v_n}, \quad (4)$$

Q_n - витрата газу у газопроводі за нормальних фізичних умов (абсолютному тиску 101325 Па і температурі 0 °С), м³/год;

D - внутрішній діаметр газопроводу, см.

k_e - абсолютна еквівалентна шорсткість поверхні труби.

Відповідно до рекомендацій [1] величину абсолютної еквівалентної шорсткості слід приймати для нових сталевих газових труб $k_e = 0,01$ см, для поліетиленових труб $k_e = 0,002$ см.

В обчислювальному алгоритмі ПК SIMONE для газових мереж низького, середнього і високого тиску незалежно від режиму руху газу для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору запропоновано застосування формули Хофера

$$\lambda = \frac{1}{\left\{ 2 \lg \left[\frac{4,518}{Re} \lg \left(\frac{Re}{7} \right) + \frac{k_e}{3,71D} \right] \right\}^2}. \quad (5)$$

Формула Хофера є наближеною апроксимацією загальновідомої формули Колбрука-Уайта

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_e}{3,71D} \right), \quad (6)$$

Формула Колбрука-Уайта за формою є трансцендентним рівнянням і тому не розв'язується в явному вигляді відносно коефіцієнта гідравлічного опору. Розв'язок рівняння (6) передбачає застосування методу послідовних наближень, що ускладнює газодинамічні розрахунки газових мереж. Цей недолік усунений у формулі Хофера, яка значно зручніша у практичному застосуванні. Але виникає питання, яку точність забезпечує наближена апроксимація формули Колбрука-Уайта?

Дослідження адекватності зазначених вище формул для коефіцієнта гідравлічного опору проведено методом математичного моделювання для сталевих і поліетиленових газових мереж низького, середнього і високого тиску. Як модельний газопровід вибрано сталеву газову трубу діаметром 108x3 мм незалежно від робочого тиску та поліетиленові труби для низького і середнього тиску діаметром 110x6,3 мм, а для високого тиску діаметром 110x10 мм. При дослідженнях використані фізичні властивості природного газу, що транспортувався газовими мережами Івано-Франківської області в 2021 р., а саме: густина за нормальних умов $\rho_n = 0,778 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість за нормальних умов $\nu_n = 13,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Слід зазначити, що в системах газопостачання населених пунктів, на відміну від магістральних газопроводів, крім розвинутого турбулентного режиму, характерного для газових мереж середнього і високого тиску, у газових мережах низького тиску можуть реалізуватись турбулентний режим у зоні гідравлічно гладких труб, перехідний режим, а також ламінарний режим руху газу. Останній характерний для внутрішніх газових мереж будівель, а також для відводів низького тиску до окремих споживачів газу. Кожен режим руху газу в газових мережах характеризується особливостями газодинамічного розрахунку.

Для сталевих і поліетиленових труб сформований діапазон зміни витрати газу, який відповідає різному завантаженню газових мереж низького, середнього і високого тиску. Для кожного значення витрати газу розраховані число Рейнольдса за формулою (4) та коефіцієнт гідравлічного опору за нормативною методикою – формули (1)-(3), за формулою Колбрука-Уайта та формулою Хофера.

У результаті знайдено, яка похибка обчислення коефіцієнта гідравлічного опору буде допущена, якщо замість загальновідомої формули Колбрука-Уайта застосовувати її наближену апроксимацію – формулу Хофера.

$$\delta_{kx} = \frac{(\lambda_x - \lambda_k)}{\lambda_k} 100, \% \quad (7)$$

де λ_x - результати обчислення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера;

λ_k - результати обчислення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Колбрука-Уайта.

Рисунок 1 ілюструє відносну різницю результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта у разі ламінарного режиму руху газу в газових мережах низького тиску.

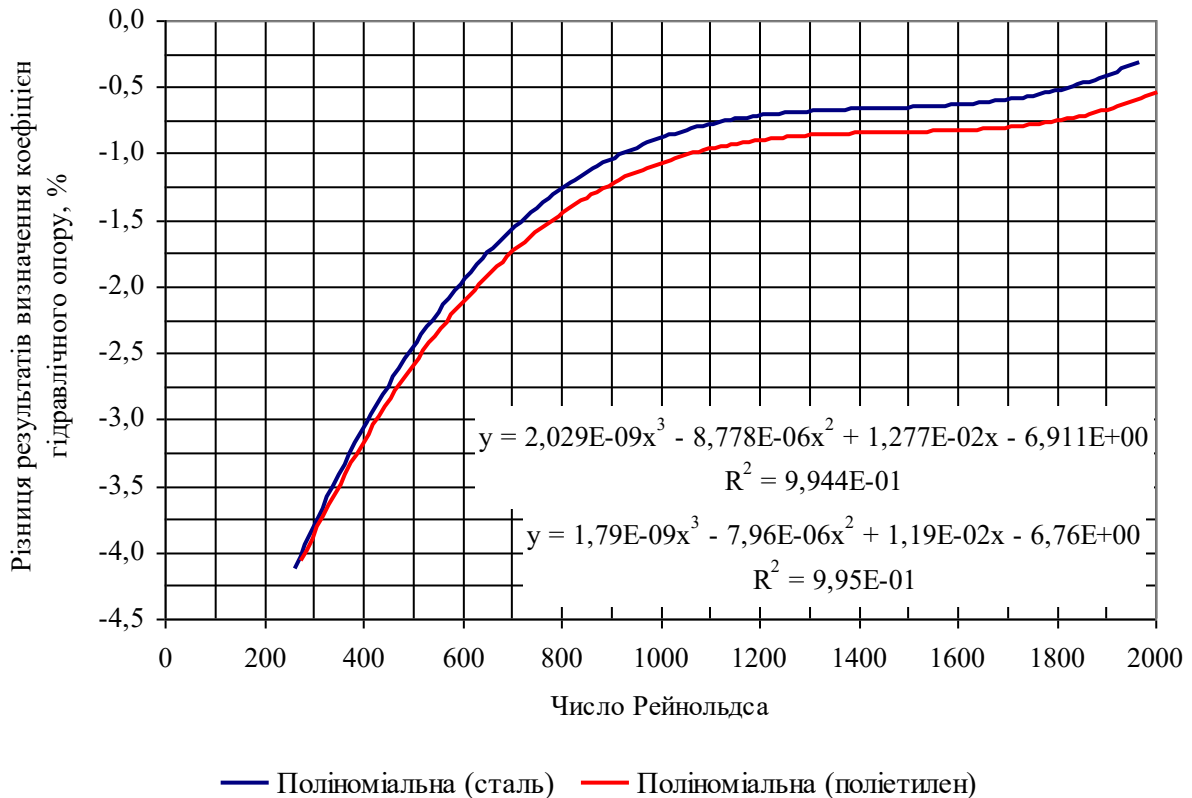


Рис. 1. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за ламінарного режиму руху газу (газові мережі низького тиску)

Як свідчить дані рисунка 1, при транспортуванні газу в газових мережах низького тиску за ламінарного режиму застосування формули Хофера замість формули Колбрука-Уайта спричинить зниження значення коефіцієнта гідравлічного опору від 4,2 % до (0,3-0,5) % залежно від числа Рейнольдса для сталевих і поліетиленових труб.

На рисунку 2 наведено порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за перехідного режиму руху газу в умовах газових мереж низького тиску.

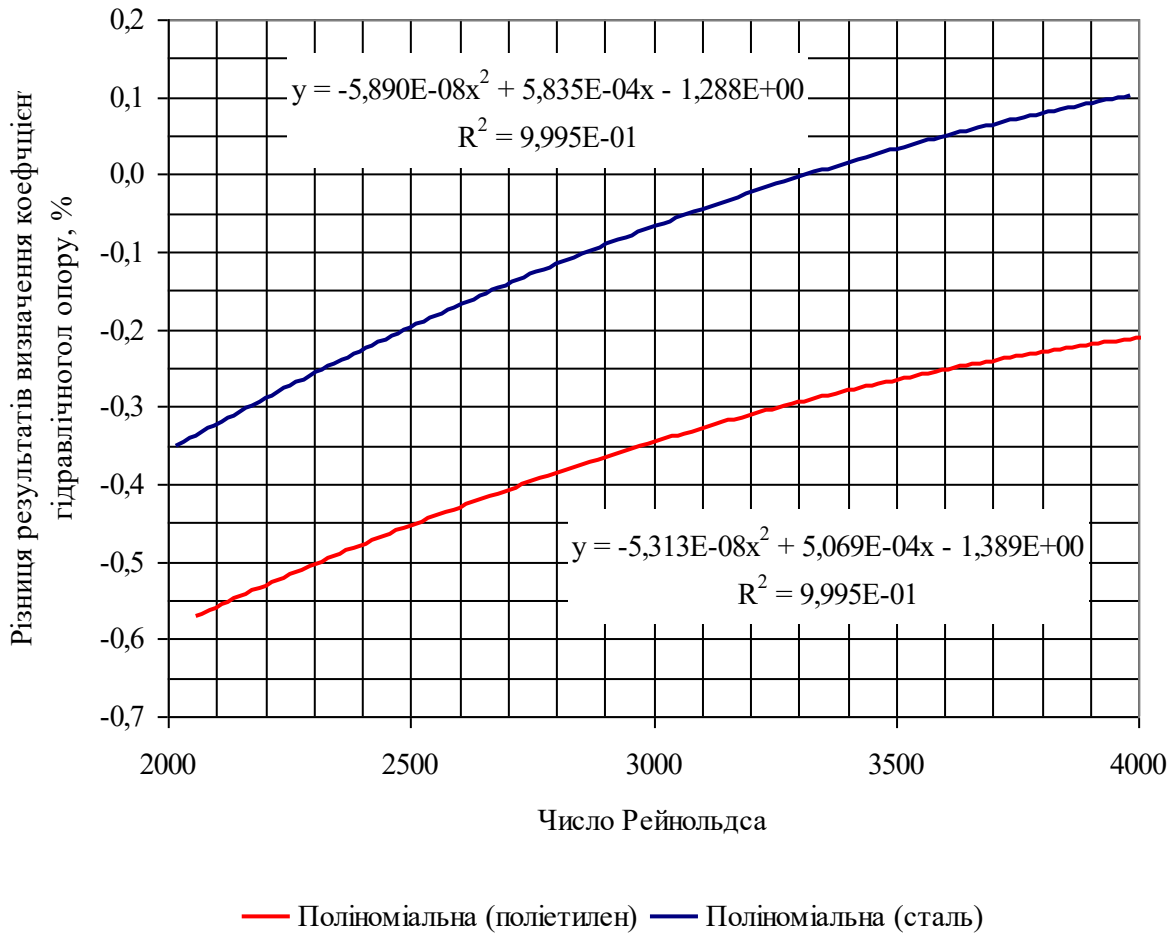


Рис. 2. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за перехідного режиму руху газу (газові мережі низького тиску)

При транспортуванні газу в сталевих газових мережах низького тиску за перехідного режиму застосування формули Хофера замість формули Колбрука-Уайта спричинить зниження значення коефіцієнта гідравлічного опору в діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 3400. В діапазоні чисел Рейнольдса від 3400 до 4000 формула Хофера незначно завищує коефіцієнт гідравлічного опору. Для поліетиленових труб застосування формули Хофера замість формули Колбрука-Уайта спричинить зниження коефіцієнта гідравлічного опору від 0,6 % до 0,2 % залежно від числа Рейнольдса (рисунок 2).

Рисунок 3 ілюструє результати аналогічних досліджень за турбулентного режиму руху газу в газових мережах низького тиску.

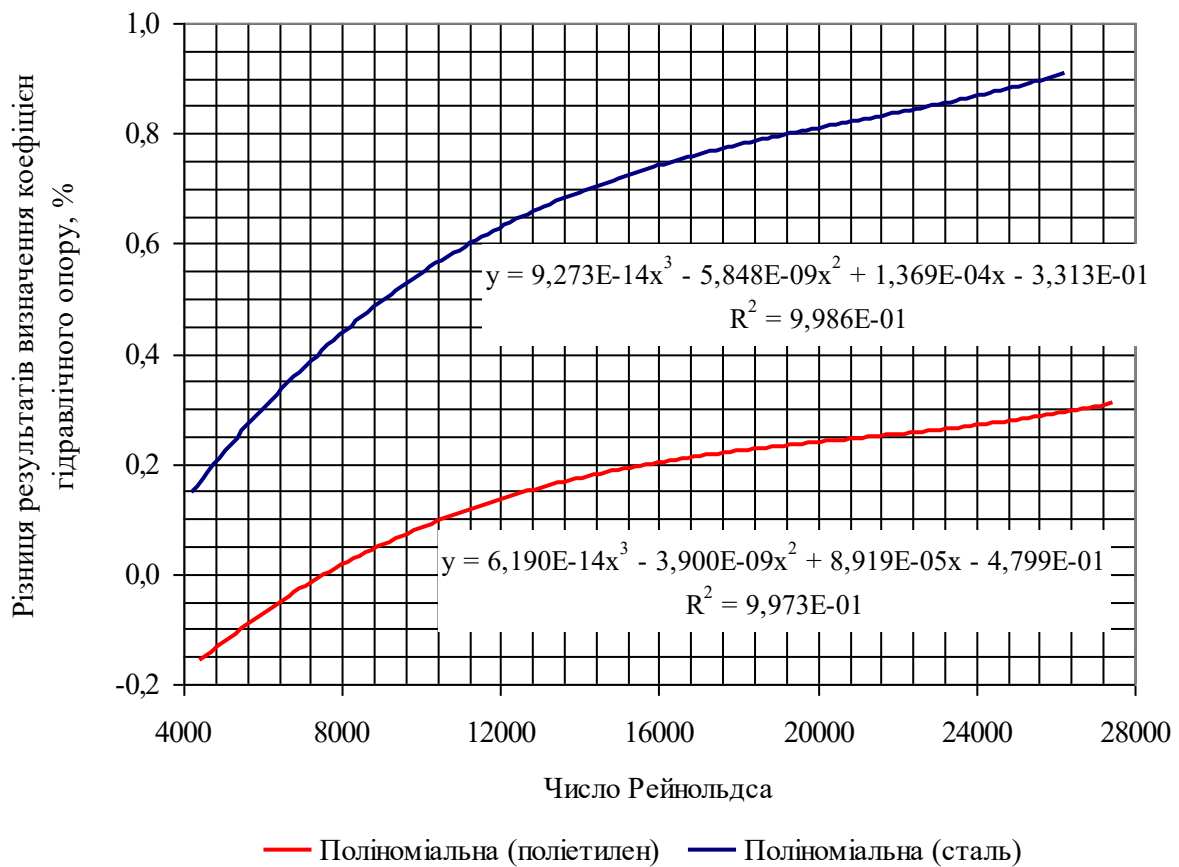


Рис. 3. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за турбулентного режиму руху газу (газові мережі низького тиску)

У сталевих газових мережах низького тиску за турбулентного режиму застосування формули Хофера замість формули Колбрука-Уайта завищує значення коефіцієнта гідравлічного опору від 0,1 % до 0,9 % в діапазоні чисел Рейнольдса від 4000 до 26000. Для поліетиленових труб за тих же умов різниця результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Колбрука-Уайта і Хофера змінюється від мінус 0,2 % до плюс 0,3 % в діапазоні чисел Рейнольдса від 4000 до 27000 (рисунок 3).

На рисунку 4 наведено порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за турбулентного режиму руху газу в умовах газових мереж середнього тиску.

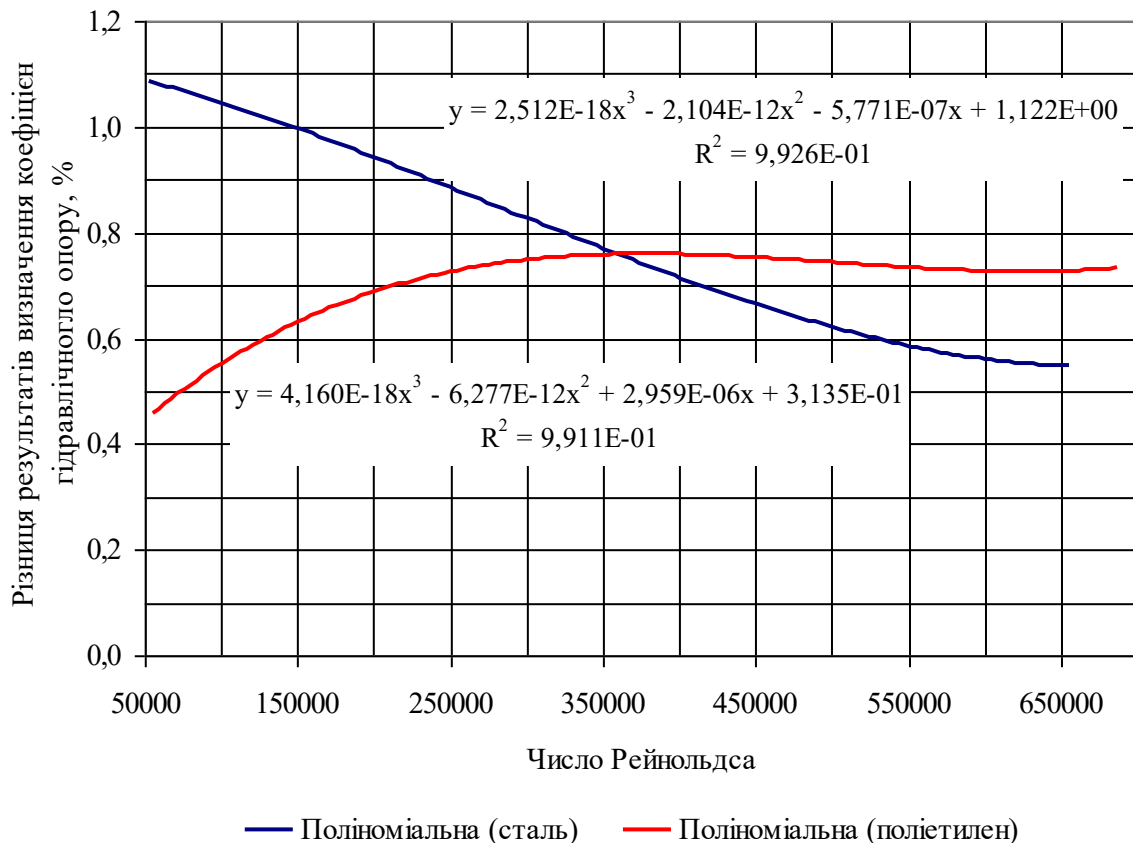


Рис. 4. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за турбулентного режиму руху газу (газові мережі середнього тиску)

Для сталевих газових мережах середнього тиску за турбулентного режиму застосування формули Хофера замість формули Колбрука-Уайта завищує значення коефіцієнта гідравлічного опору від 1,1 % до 0,5 % в діапазоні чисел Рейнольдса від 52000 до 655000. Для поліетиленових труб за тих же умов різниця результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Колбрука-Уайта і Хофера змінюється від 0,4 % до 0,7 % в діапазоні чисел Рейнольдса від 55000 до 690000 (рисунк 4).

На рисунку 5 наведено порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за турбулентного режиму руху газу в умовах газових мереж високого тиску.

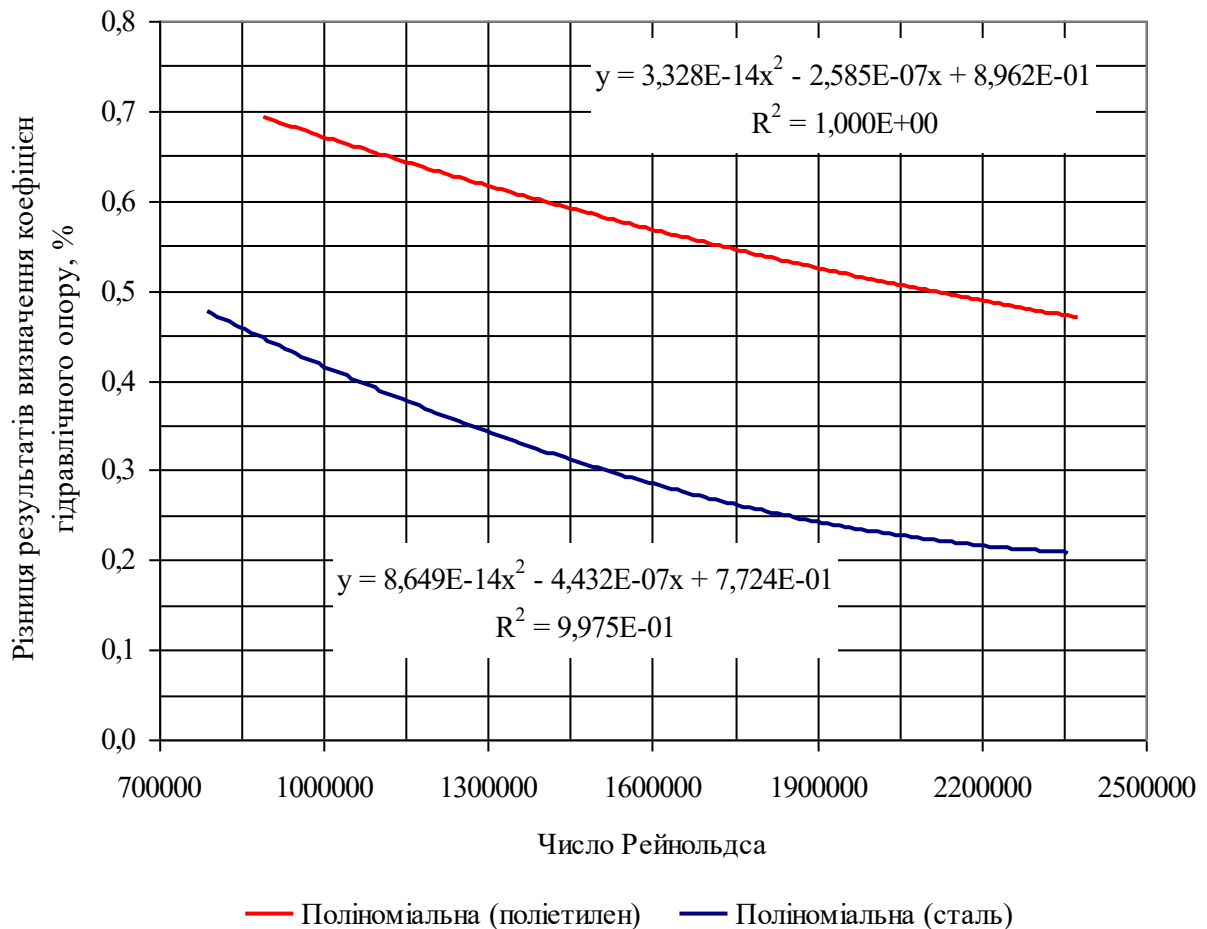


Рис. 5. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулами Хофера і Колбрука-Уайта за турбулентного режиму руху газу (газові мережі високого тиску)

Наступним етапом досліджень було співставлення результатів розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору в газових мережах за формулою Хофера та формулами (1)-(3) із нормативного документа [1]. Рисунок 6 ілюструє результати порівняння значення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (1) за ламінарного режиму в умовах газових мереж низького тиску.

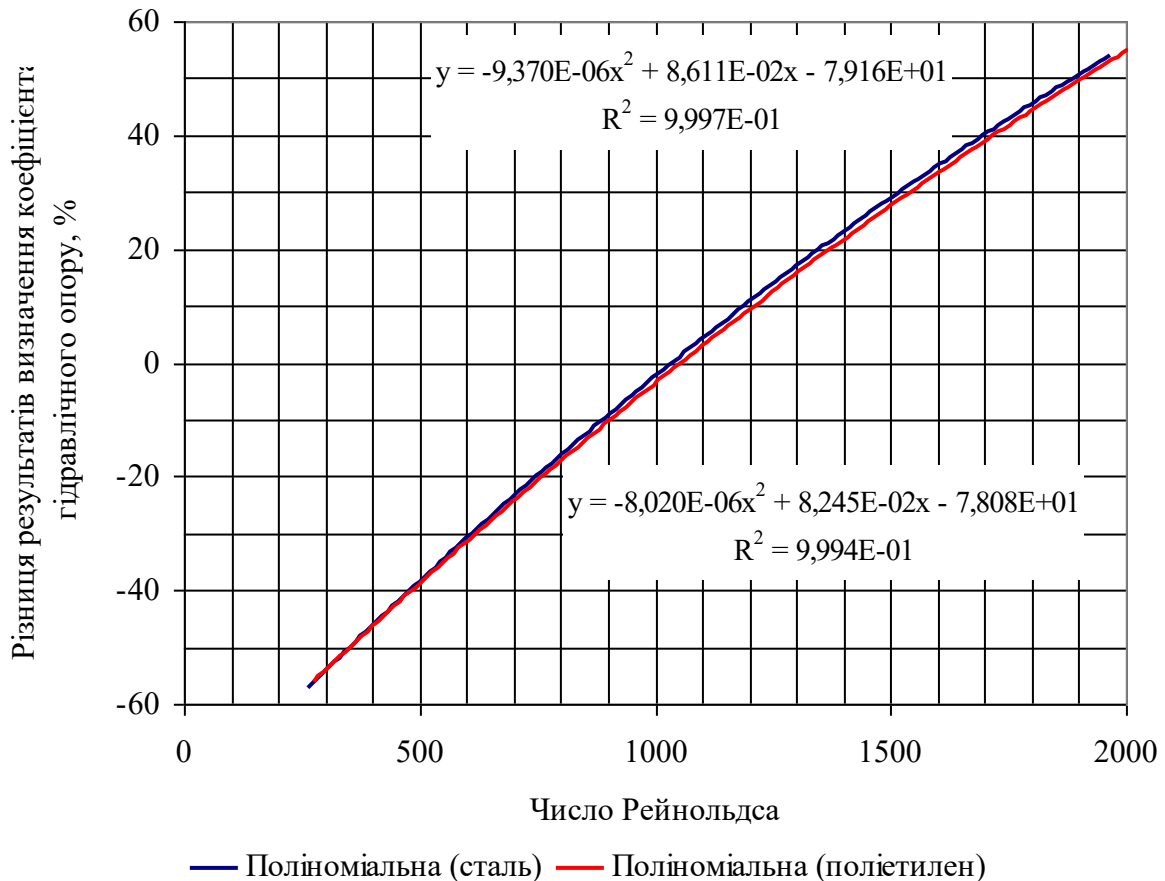


Рис. 6. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера і нормативною формулою (1) за ламінарного режиму руху газу (газові мережі низького тиску)

Як свідчить дані рисунка 6, у сталевих і поліетиленових газових мережах низького тиску за ламінарного режиму застосування формули Хофера замість нормативної формули (1) спричинить заниження коефіцієнта гідравлічного опору від (58-57) % до нуля в діапазоні чисел Рейнольдса від 300 до 1000 та завищення його значення до (54-56) % для чисел Рейнольдса від 1000 до 2000.

На рисунку 7 наведено результати порівняння значення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (2) за перехідного режиму в умовах газових мереж низького тиску.

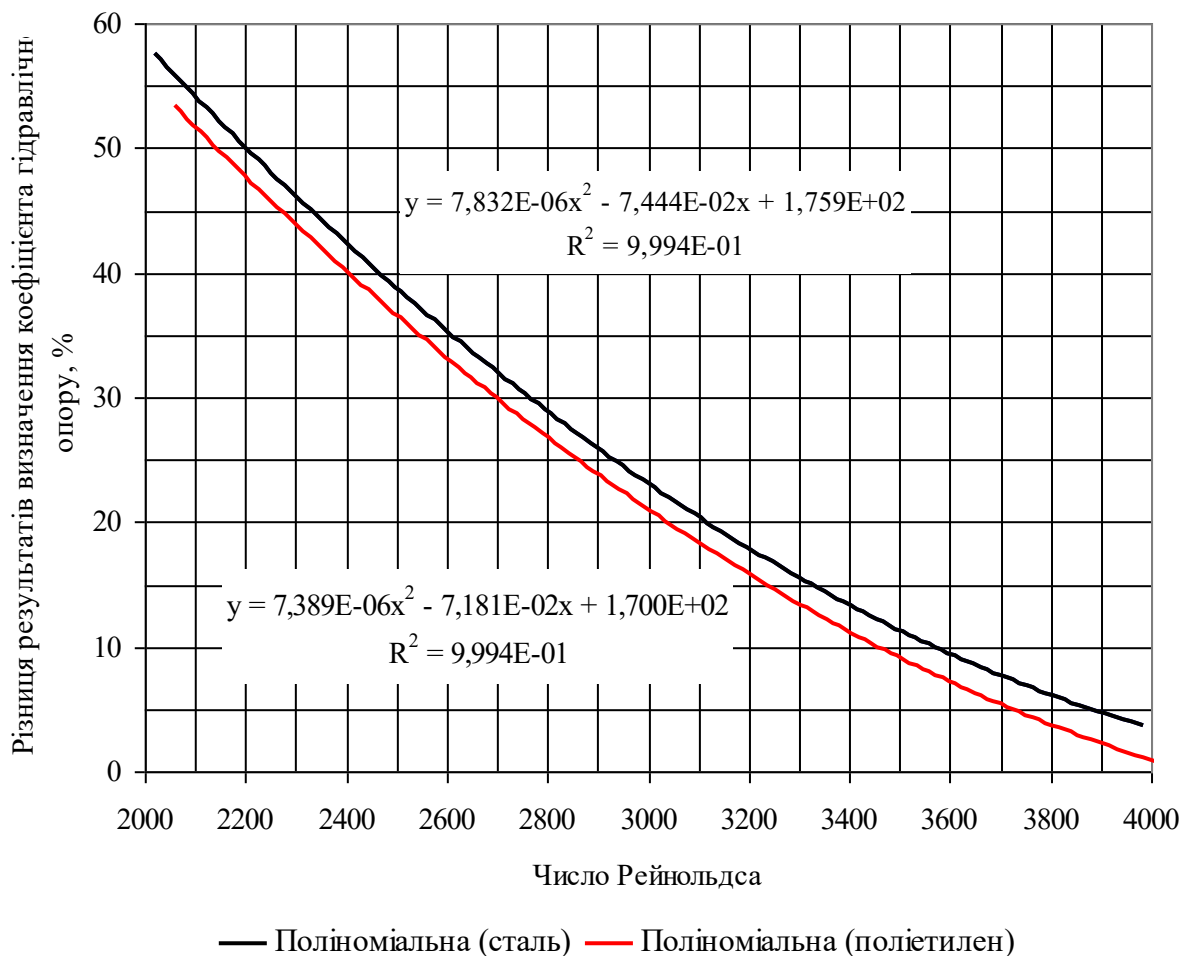


Рис. 7. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (2) за перехідного режиму руху газу (газові мережі низького тиску)

Розрахунки засвідчили, що у сталевих і поліетиленових газових мережах низького тиску за перехідного режиму застосування формули Хофера замість нормативної формули (2) спричинить завищення коефіцієнта гідравлічного опору від (58-55) % до (3,4-0,5) % діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 4000 для сталевих і поліетиленових труб.

На рисунку 8 наведено результати співставлення значень коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (3) за турбулентного режиму в умовах газових мереж низького тиску.

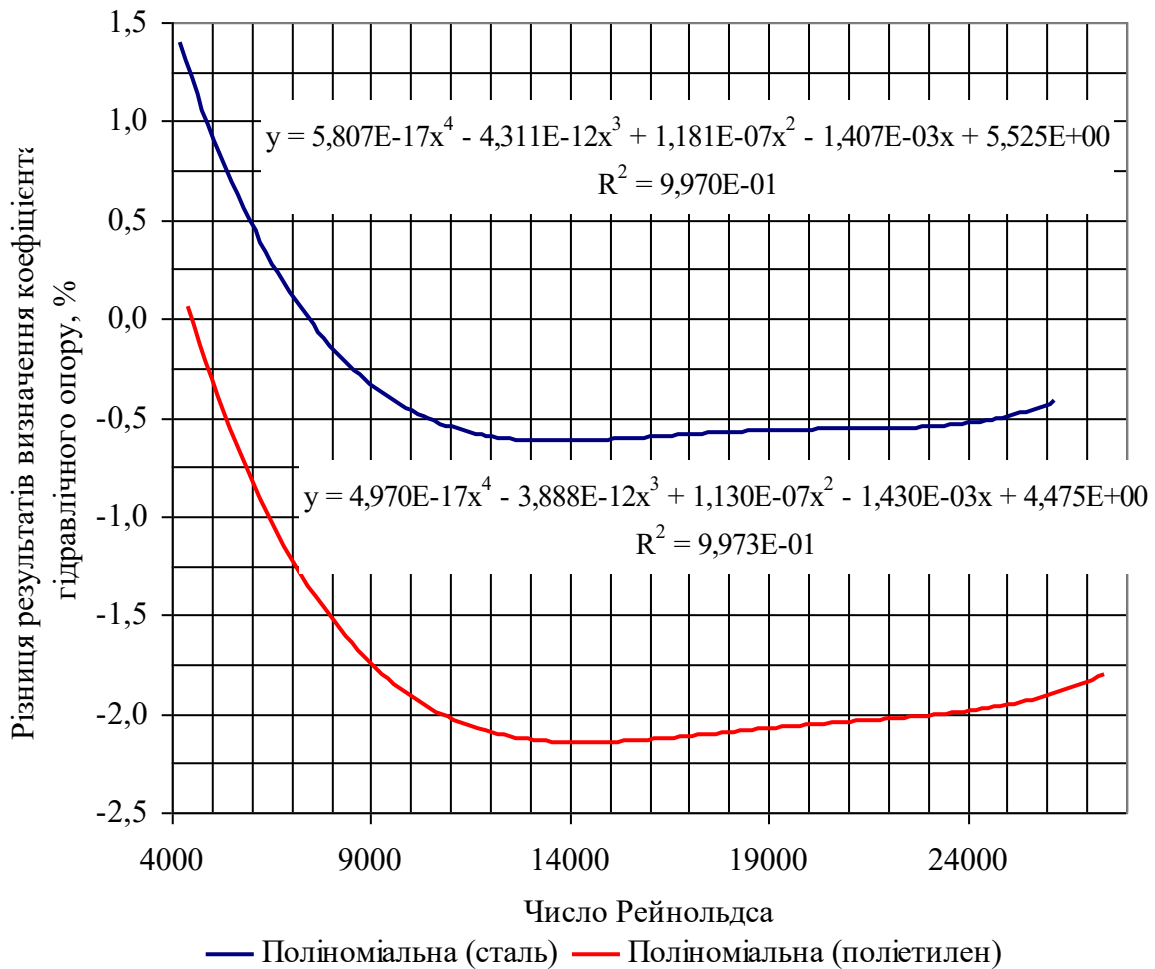


Рис. 8. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера і формулою (3) за турбулентного режиму руху газу (газові мережі низького тиску)

Результати досліджень показали, що у сталевих газових мережах низького тиску за турбулентного режиму руху природного газу застосування формули Хофера замість нормативної формули (3) спричинить завищення коефіцієнта гідравлічного опору до 1,5 % при числі Рейнольдса 4000 та його зниження до 0,6 % при числі Рейнольдса 12000. Для поліетиленових труб різниця результатів близька до нуля при числі Рейнольдса 4000 і досягає мінімуму мінус 2,3 % при числі Рейнольдса 14000.

На рисунку 9 наведено результати аналогічних досліджень за турбулентного режиму руху газу в газових мережах середнього тиску.

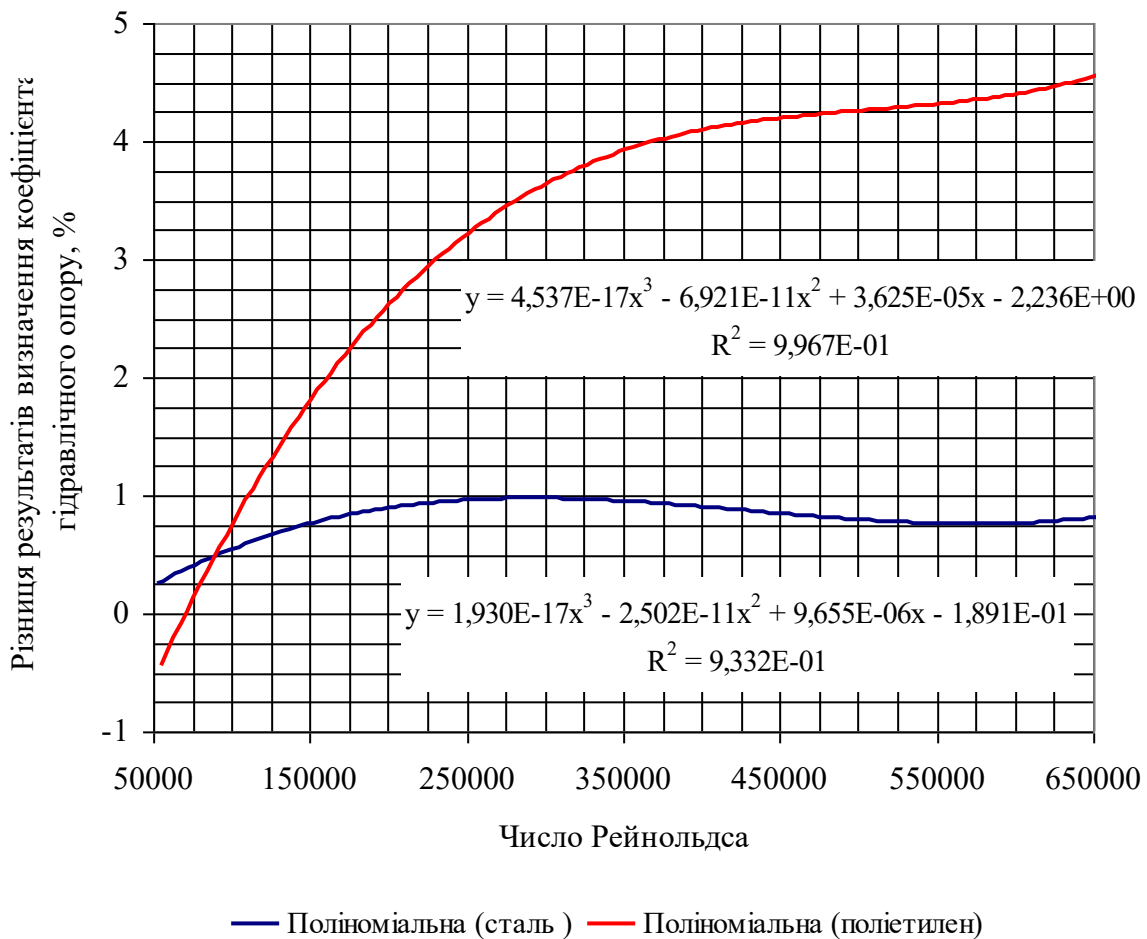


Рис. 9. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (3) за турбулентного режиму руху газу (газові мережі середнього тиску)

Рисунок 9 засвідчує, що у сталевих газових мережах середнього тиску за турбулентного режиму руху газу застосування формули Хофера замість нормативної формули (3) спричинить завищення коефіцієнта гідравлічного опору від 0,2 % при числі Рейнольдса 50000 до 1 % при числі Рейнольдса 300000. Для поліетиленових газових мереж за тих же умов відносна різниця результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору

змінюється від мінус 0,6 % до плюс 4,7 % у діапазоні чисел Рейнольдса від 50000 до 650000.

Рисунок 10 ілюструє результати порівняння коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (3) за турбулентного режиму в газових мережах високого тиску.

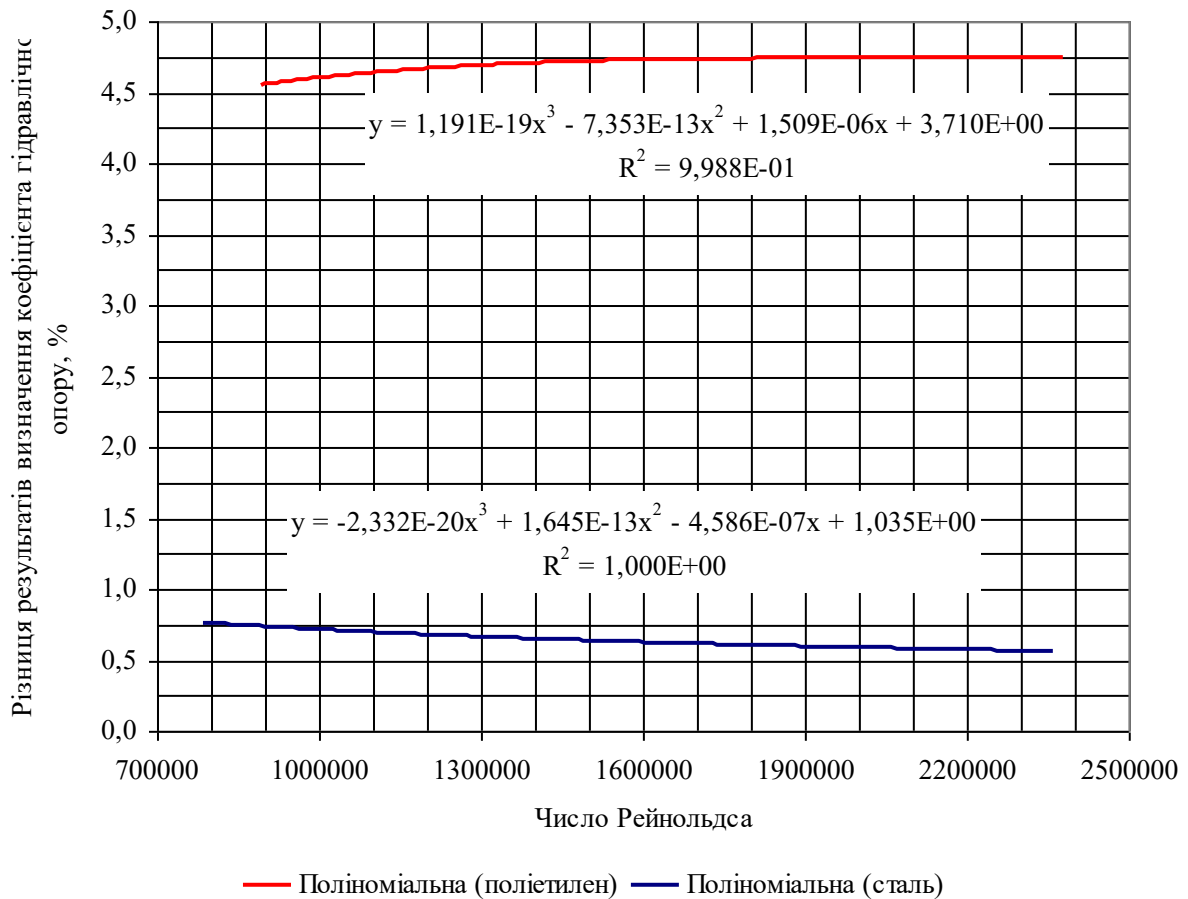


Рис. 10. Порівняння результатів визначення коефіцієнта гідравлічного опору за формулою Хофера та формулою (3) за турбулентного режиму руху газу (газові мережі високого тиску)

Рисунок 10 засвідчує, що застосування формули Хофера замість формули (3) завищує коефіцієнт гідравлічного опору на (0,6-0,8) % для сталевих і на (4,6-4,7) % для поліетиленових газових мереж високого тиску.

Висновки.

1. Шляхом математичного моделювання встановлено, що використання формули Хофера замість формули Колбрука-Уайта в газодинамічних розрахунках сталевих і поліетиленових газових мережах низького тиску знижує коефіцієнт гідравлічного опору до 4 % за ламінарного режиму в до 0,6 % за перехідного режиму руху газу.

2. При турбулентному режимі руху газу в сталевих і поліетиленових газових мережах низького, середнього і високого тиску формула Хофера завищує коефіцієнт гідравлічного опору до 1 % , порівняно з формулою Колбрука-Уайта.

3. При застосуванні формули Хофера замість формул, передбачених чинним нормативним документом, за ламінарного та перехідного режимів у сталевих і поліетиленових газових мережах низького тиску різниця обчислень коефіцієнта гідравлічного опору змінюється від мінус 58 % до плюс 56 % залежно від числа Рейнольдса.

4. При турбулентному режимі руху газу в газових мережах середнього і високого тиску застосування формули Хофера замість формул, передбачених чинним нормативним документом, завищує коефіцієнт гідравлічного опору до 1 % для сталевих труб і до 5 % для поліетиленових труб.

5. Одержані результати доцільно враховувати при застосуванні відповідних програмних комплексів, оскільки від значення коефіцієнта гідравлічного опору суттєво залежать проектні та режимні параметри систем газопостачання населених пунктів.

Література

1. ДБН В.2.5–20–2018 Газопостачання.
2. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: Сімик, 2006. 1313 с.
3. Середюк М. Д., Малик В. Я., Болонний В. Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів: навч. посіб. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 435 с.
4. Ксеніч А. І., Середюк М. Д. Порівняння енерговитратності транспортування газу в сталевих і поліетиленових газопроводах систем газопостачання населених пунктів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2009. № 3(21). С. 20-25.
5. Середюк М. Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 1(101). Т.1. С. 52-62.
6. Середюк М. Д. Особливості газодинамічних процесів у газових мережах середнього і високого тиску за транспортування газо-водневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 2 (102). С. 87-95.