

# Наука і сучасні технології

УДК 622.691.4

## РОЗРАХУНОК ГАЗОВИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОРМУЛИ КОЛБРУКА

А.І. Ксенич

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15., тел. (03422) 42166  
e-mail: tznng@nimg.edu.ua

*Разработаны уточненная методология, вычислительный алгоритм и программное обеспечение для проведения гидравлических расчетов газовых сетей низкого давления с использованием формулы Колбрука и нормативной формулы.*

*Designed methodology, calculation algorithm and software for the hydraulic calculations of gases networks of low pressure with the use the formula of Kolbruk and normative formula.*

Процеси проектування та експлуатації систем газопостачання населених пунктів базуються на результатах гідравлічних розрахунків ділянок газових мереж. Враховуючи сучасні тенденції щодо ускладнення структури газових мереж, використання поліетиленових газопроводів, прокладання підземних та наземних газопроводів, забезпечення достовірних результатів гідравлічних розрахунків є актуальним питанням. У зв'язку з цим важливе практичне значення мають розробка достовірних методів та алгоритмів гідравлічних розрахунків газових мереж, а також їх реалізація у програмному забезпеченні. Одним із шляхів удосконалення методів розрахунку систем газопостачання є використання більш точних математичних моделей.

На даний час гідравлічні розрахунки газових мереж низького тиску проводяться за методикою, рекомендованою ДБН В.2.5-20-2001. У даній методиці під час виконання гідравлічних розрахунків введено низку припущень, а саме: густину та кінематичну в'язкість газу розраховують за нормальних умов, температуру газу приймають рівною 0°C та не враховують реальних властивостей газу — коефіцієнт стисливості газу вважають рівним одиниці. З урахуванням зазначених припущень основні формули для визначення втрат тиску від тертя (Па) на  $i$ -ій ділянці газової мережі низького тиску мають такий вигляд:

при виконанні умови  $Re_i \leq 2000$  (ламінальний режим руху)

$$\Delta P_{ni} = 1,132 \cdot 10^6 \frac{Q_{200i}}{D_i^4} v_n \rho_n l_i; \quad (1)$$

при виконанні умови  $2000 < Re_i \leq 4000$  (критичний режим руху)

$$\Delta P_{ni} = 0,516 \frac{Q_{200}^{2,333} \rho_n l_i}{D_i^{5,333} v_n^{0,333}}; \quad (2)$$

при виконанні умови  $Re_i > 4000$  (турбулентний режим руху)

$$\Delta P_{ni} = 69 \left( \frac{k_e}{D_i} + 1922 \frac{v_n D_i}{Q_{200i}} \right)^{0,25} \frac{\rho_n Q_{200i} l_i}{D_i^5}; \quad (3)$$

де:  $Re_i$  — число Рейнольдса на  $i$ -ій ділянці газопроводу;

$Q_{200i}$  — розрахункова годинна витрата газу на  $i$ -ій ділянці за нормальних умов, м<sup>3</sup>/год;

$D_i$  — внутрішній діаметр  $i$ -ої ділянки, см;

$l_i$  — довжина  $i$ -ої ділянки, см;

$k_e$  — абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні газопроводу, см;

$v_n$  — кінематична в'язкість газу за нормальних умов, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_n$  — густина газу за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>.

Слід зазначити, що під час одержання формули (3) для турбулентного режиму руху газу, за якого працюють більшість газових мереж населених пунктів, коефіцієнт гідравлічного опору знаходиться за формулою Альтшуля, яка не завжди забезпечує одержання точних результатів гідравлічних розрахунків.

Достовірність методів гідравлічного розрахунку будь-якого трубопроводу, у тому числі газових мереж населених пунктів, багато в чо-

му залежить від достовірного визначення коефіцієнта гідравлічного опору, який загалом є складною функцією числа Рейнольдса і шорсткості внутрішньої поверхні труби. У світовій практиці гідравлічний розрахунок трубопроводів різноманітного призначення проводиться з використанням універсальної формули Колбрука, яка дає адекватні результати для всіх зон тертя турбулентного режиму руху рідини чи газу [1].

Запропонована нами методика гідравлічного розрахунку газових мереж населених пунктів не передбачає введення низки припущень, дає змогу врахувати фактичну температуру газу і базується на використанні універсальної формули Колбрука для визначення коефіцієнта гідравлічного опору.

У результаті спільного розв'язування рівняння руху, рівняння нерозривності потоку і рівняння стану реального газу можна одержати таку формулу для визначення втрат тиску від тертя на ділянці газових мереж низького тиску [2]

$$\Delta P_i = \lambda_i \frac{l_i}{D_i} \frac{w_i^2}{2} \rho, \quad (4)$$

де:  $\lambda_i$  – коефіцієнт гідравлічного опору на ділянці газопроводу;

$w_i$  – середнє значення швидкості газу на ділянці газопроводу;

$\rho$  – середнє значення густини природного газу в газовій мережі.

Врахуємо вплив фактичної температури газу в газовій мережі на властивості природного газу. Оскільки газові мережі низького тиску характеризуються невеликими перепадами тиску, то середнє значення абсолютного тиску газу в газовій мережі може бути знайдене за формулою

$$P_{cp} = P_n + 0,5(P_n + P_k), \quad (5)$$

де:  $P_n$  – нормативне значення атмосферного тиску,  $P_n = 101325$  Па;

$P_n, P_k$  – надлишковий тиск на початку газової мережі і біля споживачів відповідно.

Середнє значення коефіцієнта стисливості газу в газовій мережі може бути обчислене за формулою

$$z_{cp} = 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}. \quad (6)$$

Використовуючи рівняння стану реального газу, визначаємо середнє значення густини газу за умов газових мереж

$$\rho = \frac{P_{cp}}{z_{cp} R T_{cp}}. \quad (7)$$

Як свідчать результати досліджень, в умовах газових мереж залежністю в'язкості природного газу від тиску можна знехтувати. Залежність динамічної в'язкості компонентів природного газу від температури адекватно описує формула Сатерленда

$$\eta_j = \eta_{nj} \frac{273 + C_j}{T_{cp} + C_j} \left( \frac{T_{cp}}{273} \right)^{1,5}, \quad (8)$$

де  $C_i$  – стала Сатерленда для  $i$ -ого компонента природного газу.

Визначається динамічна в'язкість природного газу за умов газових мереж

$$\eta \approx \sum_{j=1}^n \eta_j r_j. \quad (9)$$

Обчислюється кінематична в'язкість природного газу за умов газових мереж низького тиску

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (10)$$

Після визначення властивостей газу в умовах газових мереж переходимо до гідравлічного розрахунку ділянки низького тиску.

Методом послідовних наближень знаходимо перше перехідне число Рейнольдса  $Re_n$ , яке розділяє зону гідравлічного гладких труб і зону змішаного тертя турбулентного режиму [3]

$$\frac{k_e}{D_i} = \frac{8,15}{Re_{ni} \sqrt{0,0032 + 0,221 Re_{ni}^{-0,237}}}. \quad (11)$$

Обчислюємо секундну витрату газу за нормальних умов для ділянки газопроводу

$$Q_{ni} = \frac{Q_{zodj}}{3600}. \quad (12)$$

Витрату газу на ділянці зводимо до робочих умов у газових мережах

$$Q_i = Q_{ni} \frac{P_n T_{cp} z_{cp}}{P_{cp} T_n}, \quad (13)$$

де  $T_n$  – температура, що відповідає нормальним умовам,  $T_n = 273$  К.

Визначаємо число Рейнольдса на ділянці газопроводу низького тиску за формулою

$$Re_i = \frac{4Q_i}{\pi D \nu}. \quad (14)$$

Вводимо поняття ефективної еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні труби за умовою [3]

$$k_{eei} = k_e \frac{Re_i - 4000}{Re_{ni} - 4000}. \quad (15)$$

За виконання умови  $Re_i > Re_{ni}$  приймаємо

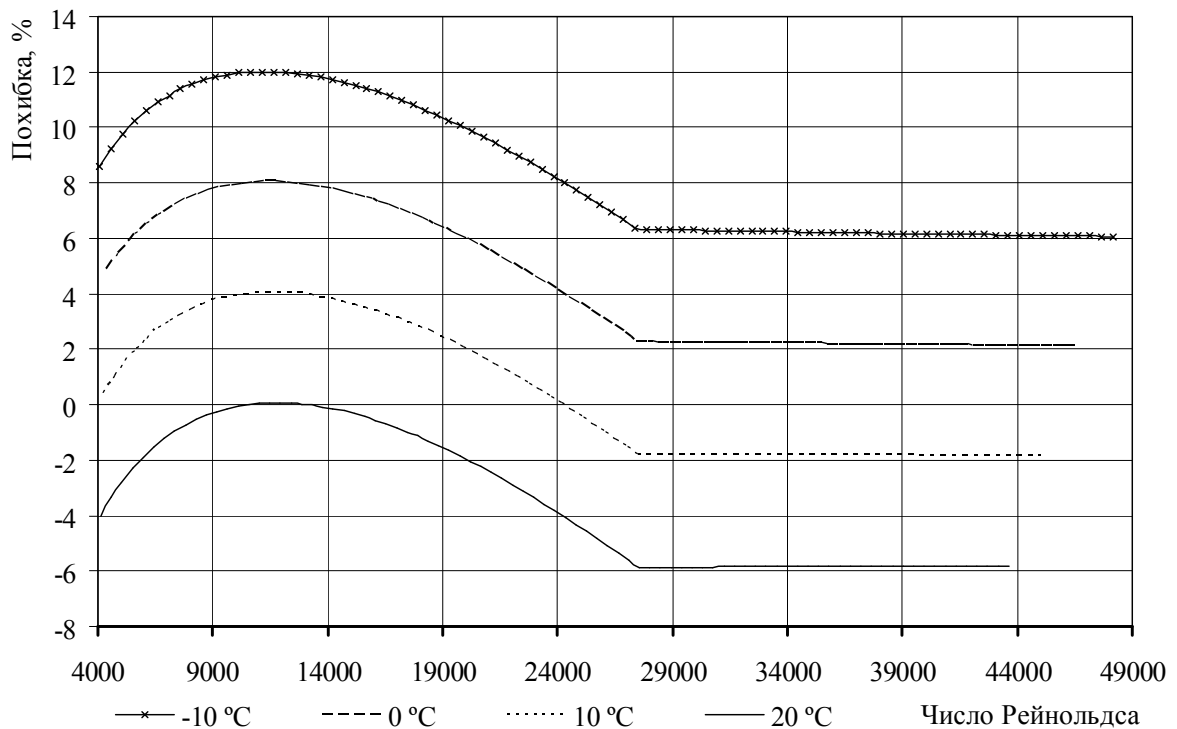
$$k_{eei} = k_e. \quad (16)$$

Обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору на ділянці газопроводу:

за виконання умови  $Re_i \leq 2000$  (ламінальний режим руху)

$$\lambda_i = \frac{64}{Re_i}; \quad (17)$$

за виконання умови  $2000 < Re_i \leq 4000$  (критичний режим руху)



**Рисунок 1 — Графічна залежність похибки визначення втрат тиску газу для ділянки діаметром 57x3мм залежно від числа Рейнольдса для різних температур газу**

$$\lambda_i = 0,0025 Re_i^{0,333} ; \quad (18)$$

за виконання умови  $Re_i > 4000$  (турбулентний режим руху) за модифікованою формулою Колбрука [3]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re_i \sqrt{\lambda_i}} + \frac{k_{eei}}{3,7 D_i} \right). \quad (19)$$

Далі за формулою (4) знаходимо уточнений перепад тиску газу від тертя на ділянці газової мережі низького тиску.

Відносна різниця результатів розрахунку втрат тиску від тертя на ділянці газопроводу низького тиску за використання запропонованої нами методики замість методики, що рекомендується ДБН В.2.5-20-2001 (далі – нормативна методика), визначалась за формулою

$$\delta_i = \frac{\Delta P_{ni} - \Delta P_i}{\Delta P_{ni}} 100 \%. \quad (20)$$

Величина  $\delta_i$  свідчить, яка відносна похибка результатів гідравлічного розрахунку має місце, якщо замість уточненої методики, запропонованої нами, застосовувати традиційну нормативну методику розрахунку втрат тиску від тертя.

Описаний вище алгоритм реалізований нами у програмному забезпеченні KOLBR, що дає змогу методом комп'ютерного моделювання дослідити вплив температурного чинника, а також вибору моделі коефіцієнта гідравлічного опору на результати гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску. Дане програмне забезпечення застосоване для проведення бага-

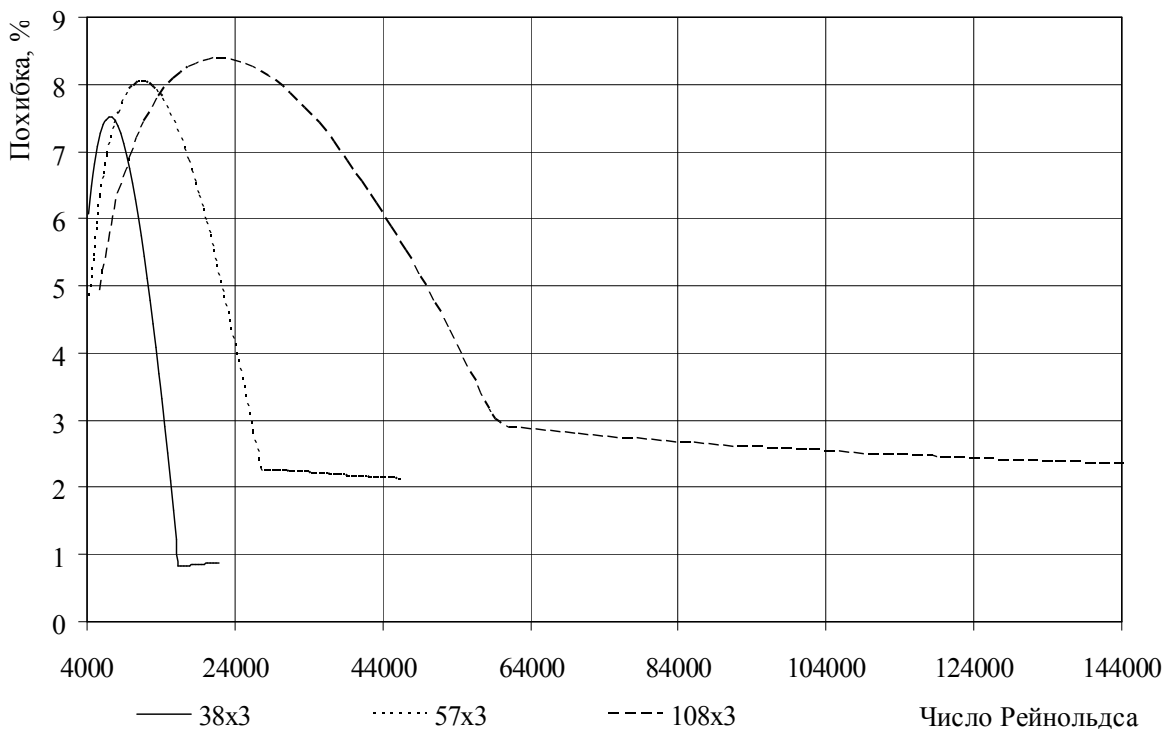
товаріантних гідравлічних розрахунків газових мереж за розробленою нами методикою та нормативною методикою, рекомендованою ДБН В.2.5-20-2001. Дослідженню підлягав весь сортамент сталевих труб, що використовується в газових мережах низького тиску. Для кожного діаметра труб дослідження проводились для можливого у практиці газопостачання діапазону значень витрат газу. Гідравлічні розрахунки виконувались для різних значень середньої температури газу в газових мережах у діапазоні від  $-10^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$ .

Рисунок 1 ілюструє залежність похибки результатів гідравлічного розрахунку модельного сталевого газопроводу діаметром 57x3 мм від числа Рейнольдса і середньої температури газу.

Аналіз графіків на рисунку 1 наглядно свідчить про те, що результати гідравлічного розрахунку газопроводу за двома методиками помітно відрізняються. Різниця результатів суттєво залежить від режиму руху газу (числа Рейнольдса) та від середньої температури газу в газових мережах.

За середньої температури газу  $20^\circ\text{C}$  застосування нормативної методики призводить до заниження результатів визначення втрат тиску від тертя на  $0,2-6\%$  залежно від ступеня завантаження ділянки газопроводу (числа Рейнольдса). За чисел Рейнольда понад 27000 похибка результатів розрахунків стабілізується на рівні мінус 6%.

За середньої температури газу  $10^\circ\text{C}$  похибка результатів розрахунків складає  $0,5\%$  за  $Re = 4000$ , за збільшення числа Рейнольдса



**Рисунок 2 — Залежність похибки розрахунку втрат тиску газу від числа Рейнольдса для різних діаметрів ділянок газової мережі**

зростає, досягаючи максимуму 4,2% за  $Re = 12000$ . Далі зменшується до нуля за  $Re = 24000$  і до  $-1,7\%$  за  $Re = 27000$ . За чисел Рейнольдса понад 27000, похибка результатів розрахунків стабілізується на рівні  $-1,8\%$ .

За середньої температури газу в газовій мережі  $0^{\circ}C$  і нижче для всього діапазону чисел Рейнольдса застосування нормативної методики призводить до завищення результатів визначення втрат тиску від тертя. Максимальна похибка результатів досягає 8% за середньої температури газу  $0^{\circ}C$  і 12% за середньої температури газу  $-10^{\circ}C$  за числа Рейнольдса  $Re = 12000$ .

Аналіз багатоваріантних гідравлічних розрахунків модельного газопроводу засвідчив, що величина похибки результатів під час застосування нормативної методики залежить від діаметра газопроводу. На рисунку 2 зображено графічну залежність величини похибки визначення втрат тиску від числа Рейнольдса для трьох стандартних значень діаметрів сталевих труб за середньої температури газу  $0^{\circ}C$ . Для інших температур газу спостерігається подібна залежність впливу діаметра газопроводу на величину похибки розрахунків. Зі зростанням діаметра газопроводу зростає максимальна неточність визначення втрат тиску від тертя за нормативною методикою, що ілюструє рисунок 2.

За результатами багатоваріантних розрахунків та одержаними графічними залежностями нами проведено математичне моделювання кривих похибок для всього сортаменту сталевих труб газопроводів в діапазоні середніх температур газу від  $-10^{\circ}C$  до  $+20^{\circ}C$ . Моделювання

величини похибки проводилося як залежно від витрати газу на ділянці, так і залежно від режиму руху газу на ній. В зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму руху газу запропоновані поліноміальні залежності, які адекватно описують характер кривих. У зоні змішаного тертя турбулентного режиму руху газу для моделювання вибрано лінійну залежність. На рисунку 3 і 4 зображено приклади одержаних математичних моделей для ділянки газопроводу діаметром 57x3 мм за середньої температури газу  $0^{\circ}C$ .

Розроблені нами математичні моделі дають можливість прогнозувати, яка похибка результатів буде допущена залежно від діаметра труб, величини витрати газу, числа Рейнольдса і середньої температури газу у випадку застосування під час гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску нормативної методики. Вони визначають умови, за яких нормативна методика дає задовільні результати, і за яких її застосування призводить до неприпустимих помилок.

Таким чином, у результаті досліджень доведено, що застосування запропонованої нами уточненої методики прогнозування втрат тиску в газових мереж низького тиску дає змогу значно підвищити точність їх проектних та експлуатаційних розрахунків.

### Література

1 Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М: Недра, 1970. – 216 с.

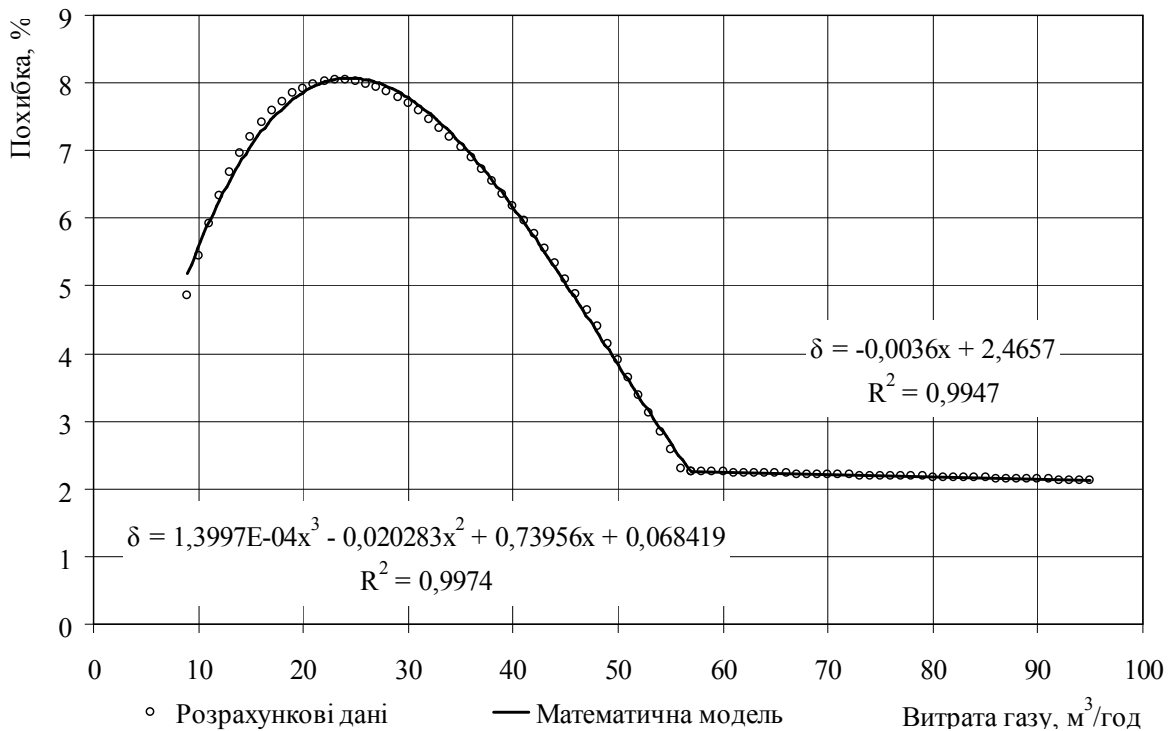


Рисунок 3 — Залежність похибки розрахунку втрат тиску від витрати газу для ділянки газової мережі низького тиску діаметром 57x3 мм за середньої температури газу 0°C

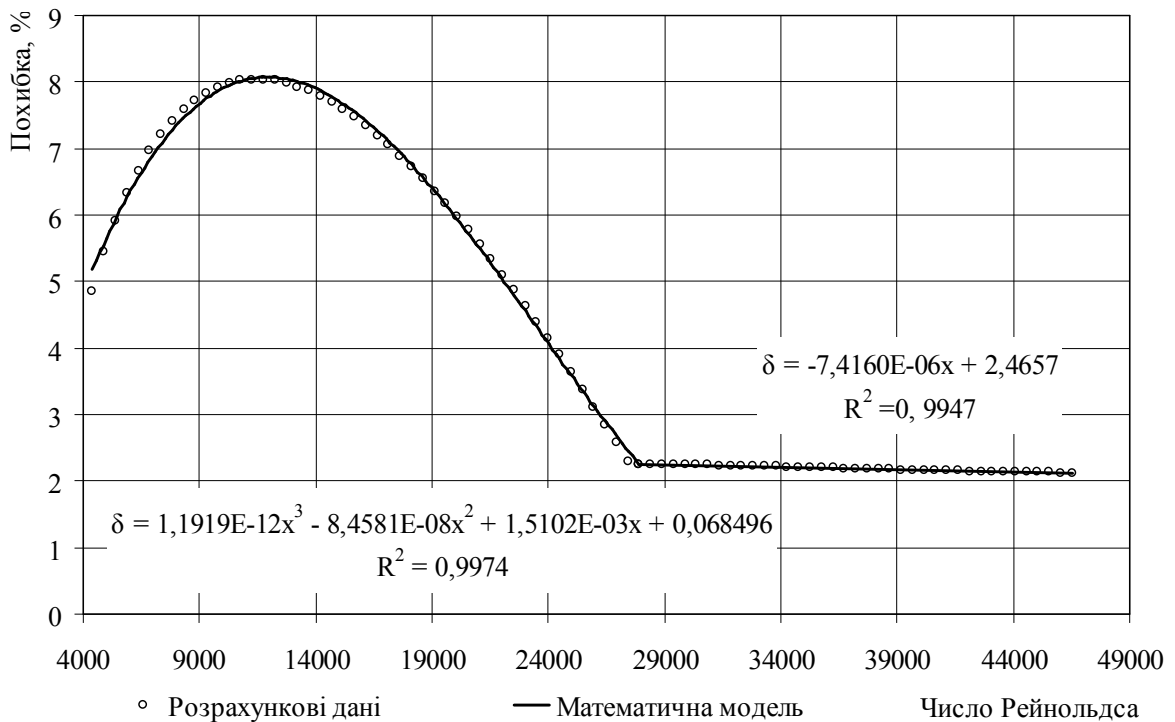


Рисунок 4 — Залежність похибки розрахунку втрат тиску газу від числа Рейнольдса для ділянки газової мережі низького тиску діаметром 57x3 мм за середньої температури газу 0°C

2 Середюк М.Д., Малик В.Я., Болонний В.Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 436 с.

3 Середюк М.Д., Люта Н.В. Обґрунтування вибору математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору в нафтопроводах // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №2. – С. 35-37.