

РОЗРАХУНКОВІ ВИТРАТИ ГАЗУ В ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

М. Д. Середюк*, Н. В. Мотрук

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727139,
e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua; motruk1995@gmail.com

Метою роботи є удосконалення методу газодинамічного розрахунку газорозподільних мереж, що здійснюють газопостачання побутових споживачів, при застосуванні математичної моделі рівномірного і безперервного відбору газу. За результатами теоретичних досліджень з використанням узагальненої математичної моделі Лейбзонна одержано уточнену формулу для сталой по довжині розрахункової витрати газу, яка забезпечує втрати тиску, що мають місце за фактичної змінної по довжині витрати у газорозподільних мережах низького, середнього та високого тиску. Знайдено аналітичні вирази для коефіцієнтів моделі Лейбзонна у разі застосування формули Хофера для коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі. Встановлено закономірності впливу режиму руху газу, що характеризується критерієм Рейнольдса, та співвідношення транзитної та шляхової витрат газу на ділянці газопроводу всіх категорій робочого тиску на ступінь уточнення розрахункової витрати газу при застосуванні уточненої формули замість спрощеної. Встановлено, що основним чинником, що впливає на розрахункову витрату, є величина співвідношення транзитної та шляхової витрати газу в газопроводі. Оцінено ступінь уточнення величини розрахункових витрат газу у разі застосування запропонованого методу при газодинамічних розрахунках газорозподільних мереж низького та середнього тиску. Встановлено, що максимальне уточнення розрахункової витрати газу до 15 % відповідає тупиковим ділянкам газопроводу, для яких транзитна витрата газу дорівнює нулю. Для співвідношення транзитної та шляхової витрати, більшого за одиницю, різниця обчислень за спрощеною та уточненою формулами зменшується до (1-2) %.

Ключові слова: газодинамічний розрахунок, транзитна витрата, шляхова витрата, турбулентний режим, коефіцієнт гідравлічного опору, формула Хофера.

The purpose of the work is to improve the method of gas-dynamic calculation of gas distribution networks that supply gas to domestic consumers, when applying a mathematical model of uniform and continuous gas selection. Based on the results of theoretical studies using Leibenzon's generalized mathematical model, a refined formula was obtained for the estimated gas flow constant along the length, which ensures the pressure losses that occur during the actual variable flow along the length in low, medium and high pressure gas distribution networks. Analytical expressions were found for the coefficients of the Leibenzon model in the case of applying the Hofer formula for the coefficient of hydraulic resistance in the turbulent regime. The regularities of the influence of the gas flow regime, characterized by the Reynolds criterion, and the ratio of transit and route gas flow rates on the gas pipeline section of all working pressure categories on the degree of refinement of the calculated gas flow rate when applying the refined formula instead of the simplified one have been established. It has been established that the main factor affecting the estimated flow rate of the gas pipeline is the ratio of transit and route gas flow. The degree of clarification of the amount of calculated gas consumption in the case of applying the proposed method in gas dynamic calculations of gas distribution networks of low and medium pressure is estimated. It was established that the maximum refinement of the calculated gas flow rate of 15 % corresponds to dead-end areas for which the transit gas flow rate is zero. For the ratio of transit and road costs greater than one, the difference between calculations based on the simplified and refined formulas decreases to (1-2) %.

Keywords: gas-dynamic calculation, transit flow rate, flow rate, turbulent regime, hydraulic drag coefficient, Hofer's formula.

Вступ

В Україні функціонує протяжна, складна за структурою система газорозподільних мереж, яка забезпечує газопостачання побутових, комунальних та промислових споживачів. Газорозподільні мережі характеризуються різною геометричною структурою, прокладені зі сталевих та поліетиленових труб, працюють за різних величин робочого тиску. Всі ці чинники впливають на газодинамічні процеси, які су-

проводжують транспортування та розподіл газу. Значна частина газорозподільних мереж має тривалий термін експлуатації, що робить необхідним їх капітальний ремонт та модернізацію. З 2019 року набув чинності оновлений варіант основного нормативного документа у сфері газопостачання ДБН В.2.5-20:2018 «Газопостачання». Постійно вдосконалюється та оновлюється вітчизняний «Кодекс газорозподільних систем». Зазначені нормативні документи міс-

тять сучасні підходи до питань проектування, спорудження та експлуатації зовнішніх та внутрішніх газорозподільних мереж України.

Це вимагає суттєвого оновлення та удосконалення методів газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж, які виконують як при проектуванні, так і при модернізації та експлуатації систем газопостачання населених пунктів. Робота, що пропонується, присвячена удосконаленню методу газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж, які живлять побутових споживачів природного газу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Питанням удосконалення методів газодинамічних розрахунків газопроводів, робочі умови яких відповідають умовам експлуатації газорозподільних мереж України, присвячено низку робіт. У роботі [1] розглядаються практичні питання прогнозування гідравлічних режимів газорозподільних мереж. Аналізується структура турбулентного потоку газу і пропонуються формули для коефіцієнта гідравлічного опору у різних зонах тертя. Для зони гідравлічно гладких труб використано формулу Ренуара або Блазіуса, а для квадратичної зони турбулентного режиму руху газу – формулу Колбрука або одержані на її базі модифікації. Акцентовано увагу на проблемі адекватного знаходження перехідних чисел Рейнольдса. Вказано, що для газових мереж низького тиску можна знехтувати явищем стисливості газу. Аналізуються розрахункові та фактичні параметри газодинамічних режимів експлуатації газорозподільних мереж Сербії. Запропоновано низку формул для втрат тиску у газорозподільних мережах, які за класифікацію вітчизняних нормативних документів відносяться до газопроводів середнього та високого тисків.

У роботі [2] виконано порівняння двох програмних продуктів PIPEPHASE та TGNET для гідравлічного аналізу режимів експлуатації газорозподільних мереж. Порівнюючи результати моделювання з фактичними даними, автори виявили, що програмне забезпечення PIPEPHASE краще прогнозує газодинамічні параметри газопроводів.

У роботі [3] пропонують застосування таких формул для коефіцієнта гідравлічного опору:

– у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму –

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8;$$

– для зони змішаного тертя турбулентного режиму – формулу Колбрука-Уайта у вигляді

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \lg \left(\frac{e}{D} + \frac{9,35}{Re \sqrt{\lambda}} \right) - 0,8;$$

– для квадратичної зони турбулентного режиму –

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \lg \left(\frac{e}{D} \right),$$

де Re - число Рейнольдса;

e - абсолютна еквівалентна шорсткість поверхні труби.

Автори роботи [4] пропонують обчислювати коефіцієнт гідравлічного опору

– у разі виконання умови $2000 < Re < 4000$ за формулою:

$$\lambda = \frac{1,63}{\ln^2 \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{e}{3,7D} \right)^{1,11} \right]},$$

– для всіх зон тертя турбулентного режиму за формулою Колбрука у вигляді

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \lg \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{e}{3,7D} \right)^{1,11} \right].$$

Аналіз режимів транспортування газу в трубопровідних мережах значною мірою залежить від адекватного визначення коефіцієнта гідравлічного опору. Автори [5] пропонують застосовувати методи штучного інтелекту, які передбачають використання штучних нейронних мереж та генетичного програмування. Газодинамічний розрахунок газопроводу за вказаною технологією передбачає систематичну зміну значень чисел Рейнольдса і відносної шорсткості труби та розв'язання рівняння Колбрука-Уайта методом послідовних наближень.

У роботі [6] запропоновано методологію гібридного програмування для вибору необхідного діаметра труби в задачах визначення розмірів систем розподілу. Модель була отримана на основі множинного регресійного аналізу з використанням підходу екстраполяції Річардсона та алгоритму Левенберга-Марквардта з подвійною точністю. Автори стверджують, що для нового емпіричного рівняння середні похибки прогнозування між оціненим і теоретичним значеннями діаметра (розрахованими на основі числового розв'язку рівняння Колбрука-Уайта) були значно меншими, ніж в існуючих моделях. У роботі [7] досліджено можливість застосування формули Хофера, замість формул, передбачених чинними нормативними документами, для обчислення коефіцієнта гідравлічно-

го опору в газових мережах населених пунктів. Встановлено, що використання формули Хоффера для ламінарного та перехідного режимів у сталевих і поліетиленових газових мережах низького тиску є недоцільним, оскільки похибка результатів обчислень коефіцієнта гідравлічного опору змінюється від мінус 58 % до плюс 56 % залежно від числа Рейнольдса. У той же час у випадку турбулентного режиму експлуатації газових мереж застосування формули Хоффера замість формули Альтшуля дає можливість підвищити точність прогнозування параметрів газодинамічних процесів.

За останні роки у вітчизняну практику проектування та експлуатації систем газопостачання впроваджується сучасний програмний комплекс ПК SIMONE. Робота [8] дає відповіді на питання відповідності теоретичних положень і результатів, одержаних з використанням зазначеного комплексу, розрахунковій базі та рішенням, що отримані із застосуванням методів, передбачених вітчизняними нормативними документами. Встановлено вплив робочого тиску і режиму руху транспортованого середовища на величину втрат тиску від тертя в газових мережах всіх категорій тиску за двома методами розрахунку. Встановлено, що найбільша різниця втрат тиску до 160 % за двома методами розрахунку відповідає мало завантаженим газовим мережам низького тиску, що працюють за ламінарного та перехідного режимів руху природного газу. У всіх інших випадках при застосуванні ПК SIMONE виявлено завищення або заниження величини газодинамічної енерговитратності газорозподільних мереж до 5 %.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Значну частку газорозподільних мереж низького та середнього тисків посідають вуличні газопроводи міських та сільських населених пунктів. Зазвичай вуличний газопровід живить значну кількість споживачів, які споживають приблизно однакову кількість газу і розташовані на приблизно однаковій відстані. За виконання зазначених умов під час проектування та експлуатації вуличних газопроводів застосовують математичну модель газотранспортної системи із рівномірним та безперервним відбором газу по довжині. Застосування такої моделі значно спрощує газодинамічні розрахунки газових мереж. У процесі проектування необхідний діаметр газопроводу вибирають загалом для вулиці, а не для кожної ділянки між сусідніми споживачами газу. При експлуатації втрати тиску визначають також загалом для газопроводу, а не для ділянок довжиною кілька десятків метрів.

У разі застосування вказаної вище математичної моделі змінну по довжині газопроводу витрату газу замінюють розрахунковою витратою. Розрахункова витрата газу – це стала по довжині витрата, за якої втрати тиску від тертя у газопроводі дорівнюють втратам тиску від змінної по довжині витрати газу. Чинні нормативні документи пропонують таку спрощену формулу для розрахункової витрати газу на ділянці газопроводу будь-якого тиску [9]

$$Q_p = Q_T + 0,5 \cdot Q_{ш}, \quad (1)$$

де Q_T – транзитна витрата газу на ділянці;

$Q_{ш}$ – шляхова витрата газу на ділянці;

$$Q_{ш} = q \cdot l, \quad (2)$$

q – питома шляхова витрата газу;

l – довжина вуличного газопроводу.

Формула (1) справедлива тільки для ламінарного режиму руху газу в газопроводі, який нечасто реалізується в зовнішніх газорозподільних мережах. При більших числах Рейнольдса спостерігається більш складна залежність розрахункової витрати газу на ділянці газопроводу від режиму руху та співвідношення між шляховою і транзитною витратою. Застосування спрощеної формули (1) може спричинити неприпустимі неточності газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж. Однак, це питання не було предметом досліджень у наявних на сьогодні роботах.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є встановлення величини похибки, спричиненої застосуванням спрощеної формули, та одержання уточненої аналітичної залежності для визначення розрахункової витрати газу на ділянці газорозподільних мереж за реалізації математичної моделі рівномірного і безперервного відбору газу.

Мета досліджень реалізується шляхом вирішення таких завдань:

– знайти вигляд уточненої формули для визначення розрахункової витрати газу у газорозподільних мережах всіх категорій робочого тиску;

– обґрунтувати можливість застосування узагальненої моделі Лейбензона для коефіцієнта гідравлічного опору при газодинамічних розрахунках газорозподільних мереж всіх категорій робочого тиску;

– знайти аналітичні вирази для коефіцієнтів моделі Лейбензона при турбулентному режимі у разі застосування формули Хоффера для коефіцієнта гідравлічного опору;

– оцінити ступінь коригування величини розрахункових витрат газу при застосуванні уточненої формули замість спрощеної при газодинамічних розрахунках газових мереж.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

У разі застосування математичної моделі безперервного та рівномірного відбору газу по довжині витрату на відстані x від початку газопроводу описують так:

$$Q = Q_T + q(l - x), \quad (3)$$

де l – довжина газопроводу.

Одержання уточненого аналітичного виразу для розрахункової витрати газу вимагає застосування універсальної формули Лейбензона для коефіцієнта гідравлічного опору [10]

$$\lambda = \frac{A}{Re^m}, \quad (4)$$

де A, m – коефіцієнти математичної моделі, що залежать від режиму руху газу.

Для газових мереж будь-якого тиску рівняння Бернуллі у диференціальному вигляді має вигляд

$$\frac{dp}{\rho} + \lambda \frac{w^2}{2D} dx = 0, \quad (5)$$

де p – величина абсолютного тиску газу;

q – густина газу;

w – усереднена за перерізом труби швидкість руху газу;

D – внутрішній діаметр газопроводу.

Оскільки надлишковий тиск у газових мережах низького тиску України не перевищує 3000 Па, то густину транспортованого газу вважають сталою величиною. Розв'язування диференціального рівняння (5) за вказаної умови дає змогу одержати таку формулу для втрат тиску від тертя в газових мережах низького тиску:

$$\Delta p = \frac{2^{3-2m} A v^m \rho l}{\pi^{2-m} D^{5-m}} \cdot \frac{(Q_T + Q_{us})^{3-m} - Q_{us}^{3-m}}{(3-m) Q_{us}}. \quad (6)$$

Із рівняння енергетичного балансу знаходимо аналітичний вираз для розрахункової витрати газу на ділянці газорозподільних мереж низького тиску [10]

$$Q_p = \left[\frac{(Q_T + Q_{us})^{3-m} - Q_T^{3-m}}{(3-m) Q_{us}} \right]^{\frac{1}{2-m}}. \quad (7)$$

Для газорозподільних мереж середнього і високого тисків прийняття умови про сталу величину густини газу на ділянці може призвести до помітних похибок результатів газодинамічних розрахунків. Тому розв'язуємо рівняння (5)

з урахуванням рівнянь нерозривності потоку і стану реального газу. У результаті одержуємо такий вираз для втрат тиску від тертя на ділянці газорозподільних мереж середнього і високого тиску

$$P_n^2 - P_k^2 = \frac{2^{4-2m} P_n^2 A v^m z \Delta T l}{\pi^{2-m} z_n^2 T_n^2 R_{нов} D^{5-m}} \times \frac{(Q_T + Q_{us})^{3-m} - Q_T^{3-m}}{(3-m) Q_{us}}, \quad (8)$$

де P_n, P_k – абсолютний тиск газу на початку та в кінці ділянки газопроводу відповідно;

P_n, T_n – стандартні умови для вимірювання об'ємної витрати, для газорозподільних мереж України $P_n = 101,325$ кПа, $T_n = 273,15$ К [9];

z_n, z – коефіцієнт стисливості газу за стандартних і робочих умов;

Δ – відносна густина газу за повітрям;

T – температура газу в газопроводі;

$R_{нов}$ – газова стала повітря.

Відповідно до чинного нормативного документа [9] газодинамічні розрахунки газорозподільних мереж будь-якої категорії тиску виконують за густиною і в'язкістю природного газу, що відповідають нормальним фізичним умовам. Використовуючи рівняння енергетичного балансу для фактичної, змінної по довжині витрати газу, та сталої за довжиною розрахункової витрати, встановлюємо, що для газопроводів середнього і високого тиску за наявності шляхового відбору газу аналітичний вираз для розрахункової витрати газу співпадає з формулою (7) для газових мереж низького тиску, але передбачає інші значення коефіцієнтів режиму.

Застосування формули (7) для визначення розрахункових витрат газу в газорозподільних мережах передбачає наявність коефіцієнта m , значення якого залежить від режиму руху газу у газопроводі. Для ламінарного і критичного (перехідного) режимів ці значення стали і дорівнюють відповідно $m = 1$ та $m = -(1/3)$ [11]. Для турбулентного режиму руху газу в газопроводі значення коефіцієнта m залежить від числа Рейнольдса Re і шорсткості поверхні труби k_e .

Знайдемо аналітичний вираз для коефіцієнта m у разі турбулентного режиму руху газу в газових мережах. Для коефіцієнта гідравлічного опору пропонуємо застосовувати формулу Хофера, яка є адекватною апроксимацією загальновідомої формули Колбрука-Уайта. Формула Хофера широко використовується для розрахунків газопроводів у сучасних програмних комплексах [8]

$$\lambda = \frac{1}{\left\{ 2 \lg \left[\frac{4,518}{Re} \lg \left(\frac{Re}{7} \right) + \frac{k_e}{3,71D} \right] \right\}^2}. \quad (9)$$

Диференціюємо формулу Лейбензона (4) по числу Рейнольдса, одержаний вираз розв'язуємо відносно коефіцієнта m

$$m = - \frac{d\lambda}{d Re} \cdot \frac{Re}{\lambda}. \quad (10)$$

Знаходимо диференціал $\frac{d\lambda}{d Re}$ від формули Хофера (9). Одержуємо математичний вираз, який підставляємо у формулу (10). У результаті математичних перетворень формулу для коефіцієнта режиму m зводимо до такого вигляду:

$$m = \frac{7,849 \left[\lg \left(\frac{Re}{7} \right) - 0,4343 \right] \sqrt{\lambda}}{\left[4,518 \lg \left(\frac{Re}{7} \right) + Re \frac{k_e}{3,71 \cdot D} \right]}. \quad (11)$$

Як свідчить формула (7), розрахункова витрата газу на ділянці газопроводу залежить від режиму руху газу, який характеризується числом Рейнольдса, і співвідношення транзитної та шляхової витрат газу. Для встановлення характеру зазначених залежностей формулу (7) зводимо до такого вигляду:

$$Q_p = Q_{ш} \left[\frac{(1 + \alpha)^{3-m} - \alpha^{3-m}}{(3-m)} \right]^{2-m}, \quad (12)$$

де α – відношення транзитної витрати до шляхової на ділянці газопроводу,

$$\alpha = \frac{Q_T}{Q_{ш}}. \quad (13)$$

Як модельний трубопровід, вибрано сталевий газопровід низького тиску діаметром 108x3 мм. Приймали, що газопроводом транспортується природний газ, кінематична в'язкість якого $\nu = 14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Задавали певне значення розрахункової витрати газу. Після того приймали значення коефіцієнта α . За спрощеною формулою (1) знаходили шляхову витрату газу. Обчислювали число Рейнольдса. За формулою (9) визначали коефіцієнт гідравлічного опору. За формулою (11) знаходили значення коефіцієнта режиму m . За формулою (12) визначали уточнене значення розрахункової витрати газу на ділянці. Обчислювали відносну різницю результатів обчислень розрахункової витрати газу за уточненою і спрощеною формулами.

Розрахунки виконані для розрахункових витрат, які відповідають діапазону можливого

завантаження газопроводу низького тиску. Значення коефіцієнта α приймали у діапазоні від нуля до значення, для якого відносна різниця результатів обчислень за двома методами близька до 1 %.

Таблиця 1 містить результати обчислень уточненої розрахункової витрати газу на ділянці газопроводу низького тиску за умови, що значення витрати за спрощеною формулою (1) становить 100 м³/год.

Як свідчать дані таблиці 1, похибка визначення розрахункової витрати газу на ділянці газопроводу низького тиску при користуванні спрощеною формулою (1) суттєво залежить від величини коефіцієнта α . Вона приймає максимальне значення за відсутності на ділянці транзитної витрати газу, тобто при $\alpha = 0$. Така умова відповідає тупиковим ділянкам, які зазвичай прокладають на периферії території населених пунктів.

Дослідимо, як впливає на зазначену вище похибку ступінь завантаження газопроводу, який характеризується числом Рейнольдса (рис. 1). На рисунку 1 крива 1 відповідає коефіцієнту відношення транзитних та шляхових витрат газу $\alpha = 0$, а крива 2 побудована для $\alpha = 1,3$.

Аналіз графіків, наведених на рисунку 1, свідчить, що різниця результатів обчислення розрахункових витрат газу при застосуванні уточненої формули (12) замість спрощеної формули (1) значно менше залежить від завантаження газопроводу, ніж від співвідношення транзитної та шляхової витрат газу. Це дало можливість узагальнити результати обчислень для різного ступеня завантаження та одержати закономірність уточнення результатів визначення розрахункових витрат газу за формулою (12) від співвідношення транзитної та шляхової витрати газу на ділянці газопроводу низького тиску (рис. 2).

З вірогідністю апроксимації понад 99 % залежність величини уточнення розрахункової витрати газу (%) від співвідношення транзитної та шляхової витрати на ділянці газопроводу низького тиску (рис. 2) описується такою поліноміальною функцією четвертого порядку:

$$\delta_Q = 19,148 \cdot \alpha^4 - 63,456 \cdot \alpha^3 + 77,635 \cdot \alpha^2 - 45,02 \cdot \alpha + 13,10. \quad (14)$$

Газові мережі середнього тиску за рахунок вищого робочого тиску характеризуються значно більшими робочими витратами газу і, відповідно, більш розвиненим турбулентним режимом транспортування природного газу. Для встановлення особливостей застосування

Таблиця 1 – Результати уточнення розрахункової витрати газу в газопроводі низького тиску для різних значень відношення транзитної витрати до шляхової (для значення витрати за спрощеною формулою 100 м³/год)

Назва параметра	Значення параметрів за відношення транзитної витрати газу до шляхової на ділянці газопроводу α						
	0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3
Шляхова витрата газу, м ³ /год	200,0	166,7	142,9	100,0	76,9	66,7	55,6
Транзитна витрата газу, м ³ /год	0	16,7	28,6	50,0	61,5	66,7	72,2
Розрахункова витрата газу за формулою (1), м ³ /год	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Число Рейнольдса	28055	27081	26485	25630	25289	25165	25051
Коефіцієнт гідравлічного опору за формулою Хофера	0,02647	0,02663	0,02673	0,02688	0,02695	0,02697	0,02699
Значення коефіцієнта m	0,17078	0,17285	0,17415	0,17607	0,17685	0,17714	0,17740
Уточнена розрахункова витрата за формулою (12), м ³ /год	113,3	109,3	106,9	103,4	102,0	101,5	101,1
Відносна різниця значень розрахункових витрат газу, %	13,3	9,3	6,9	3,4	2,0	1,5	1,1

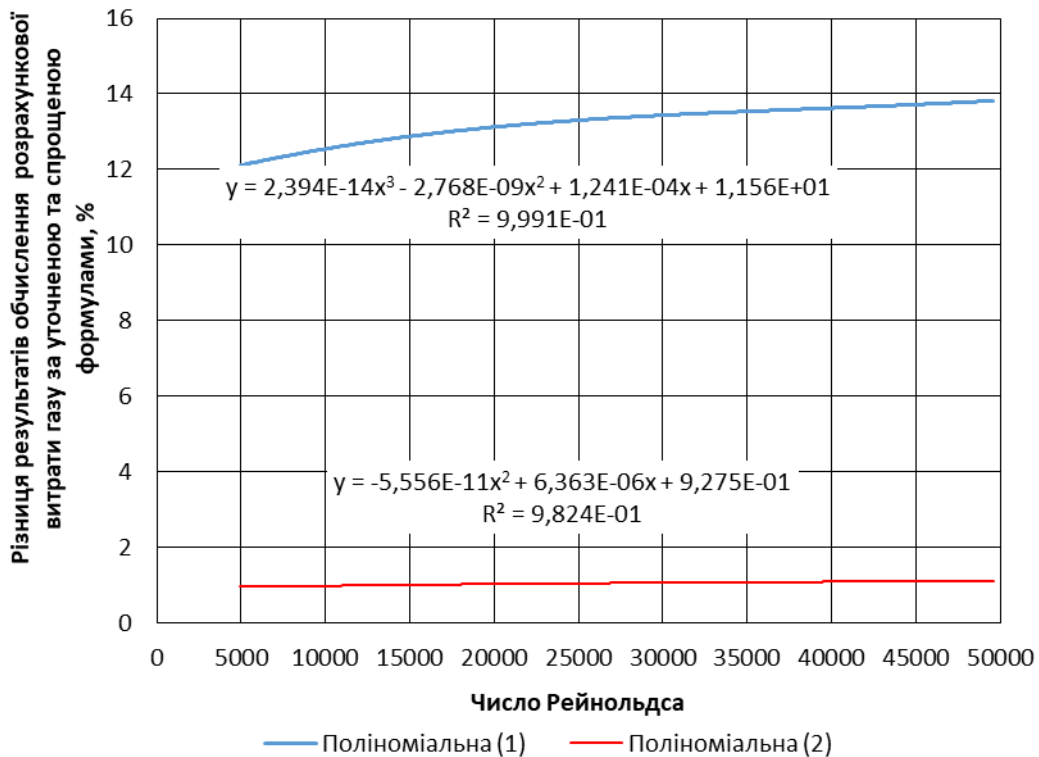


Рисунок 1 – Різниця результатів обчислення розрахункових витрат газу при застосуванні уточненої формули замість спрощеної для різних чисел Рейнольдса

уточненої формули (12) замість спрощеної (1) в газових мережах середнього тиску проведено аналогічні, як для газопроводу низького тиску, багатоваріантні газодинамічні розрахунки для різних значень завантаження модельного газопроводу середнього тиску та різних значень співвідношення транзитної і шляхової витрати газу. Параметри газопроводу середнього тиску такі ж, як для газопроводу низького тиску.

Таблиця 2 містить приклад одержаних результатів для завантаження газопроводу середнього тиску, що відповідає розрахунковій витраті газу 1000 м³/год згідно з формулою (1).

Аналіз результатів досліджень, виконаних для газових мереж середнього тиску, підтвердив суттєвий вплив відношення транзитної витрати до шляхової уточнення розрахункової витрати у разі застосування формули (12)

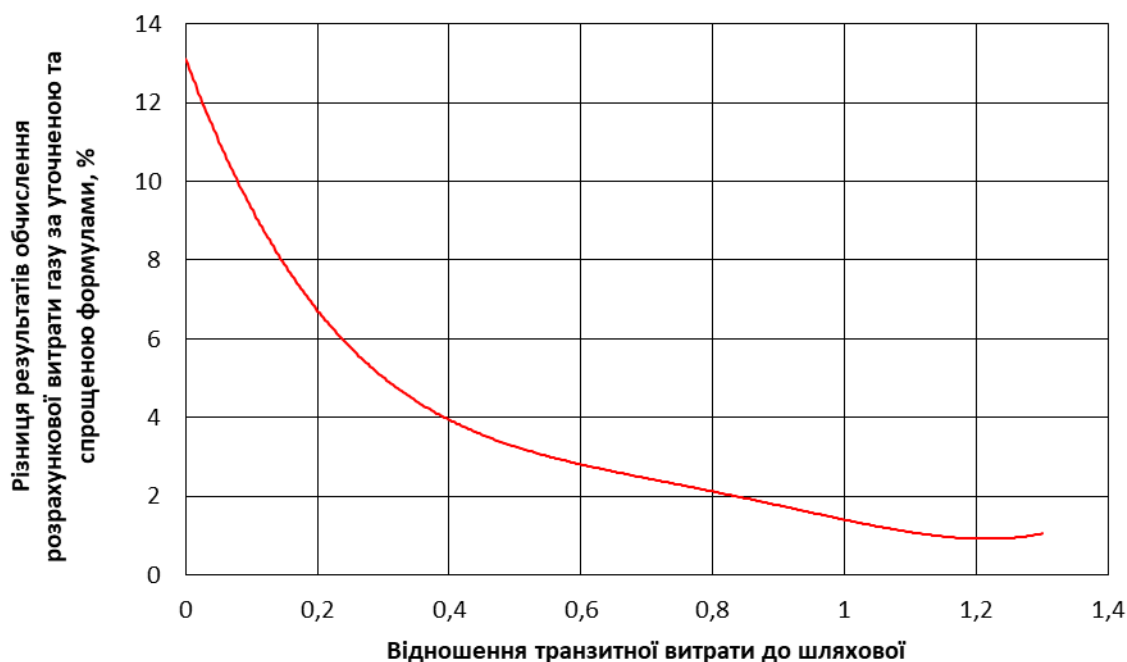


Рисунок 2 – Різниця результатів обчислення розрахункових витрат газу у газопроводі низького тиску для випадку застосування уточненої формули замість спрощеної залежно від співвідношення транзитної та шляхової витрати

Таблиця 2 – Результати уточнення розрахункової витрати газу в газопроводі середнього тиску за різних значень відношення транзитної витрати до шляхової (для значення витрати за спрощеною формулою 1000 м³/год)

Назва параметра	Значення параметрів за відношення транзитної витрати газу до шляхової на ділянці газопроводу α					
	0	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3
Шляхова витрата газу, м ³ /год	2000,0	1428,6	1000,0	769,2	666,7	555,56
Транзитна витрата газу, м ³ /год	0	285,7	500,0	615,4	666,7	722,22
Розрахункова витрата газу за формулою (1), м ³ /год	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,00
Число Рейнольдса	284716	267212	257500	253620	252207	250898
Коефіцієнт гідравлічного опору за формулою Хофера	0,02074	0,02081	0,02085	0,02086	0,02087	0,020875
Значення коефіцієнта m	0,04913	0,05142	0,05280	0,05337	0,05358	0,053781
Уточнена розрахункова витрата за формулою (12), м ³ /год	1148,5	1077,9	1038,8	1023,1	1017,4	1012,10
Відносна різниця значень розрахункових витрат газу, %	14,9	7,8	3,9	2,3	1,7	1,2

замість спрощеної формули (1). У той же час, як і для газових мереж низького тиску, завантаження газопроводу середнього тиску, тобто величина числа Рейнольдса, значно менше впливає на уточнення результатів визначення розрахункових витрат газу. Це дало змогу усереднити результати для різних чисел Рейнольдса та одержати таку закономірність уточнення величини розрахункових витрат газу у газопроводі середнього тиску при застосуванні формули (12) як функцію відношення транзитної витрати до шляхової (рис. 3).

Як засвідчили дослідження, з вірогідністю апроксимації понад 99 % залежність величини уточнення розрахункової витрати газу (%) від співвідношення транзитної та шляхової витрати на ділянці газопроводу середнього тиску також можна описати поліноміальною функцією четвертого порядку

$$\delta_Q = 18,377 \cdot \alpha^4 - 62,574 \cdot \alpha^3 + 79,562 \cdot \alpha^2 - 48,529 \cdot \alpha + 14,84. \quad (15)$$

Запропонований метод визначення розрахункових витрат газу можна застосувати також

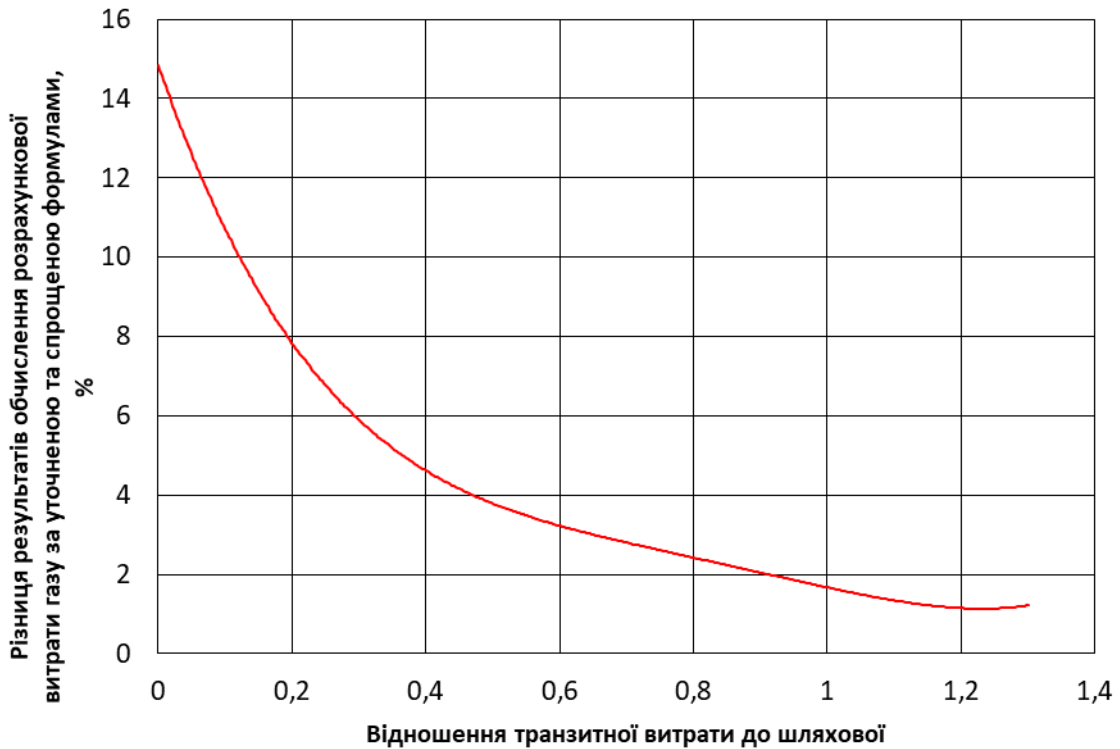


Рисунок 3 – Різниця результатів обчислення розрахункових витрат газу у газопроводі середнього тиску для випадку застосування уточненої формули замість спрощеної залежно від співвідношення транзитної та шляхової витрати

для газових мереж високого тиску. Однак у сфері газопостачання України математична модель рівномірного і безперервного відбору газу для газорозподільних мереж високого тиску практично не застосовується.

Висновки

1. Встановлено можливість застосування узагальненої моделі Лейбензона для коефіцієнта гідравлічного опору з метою уточнення формули розрахункової витрати газу в газорозподільних мережах всіх категорій робочого тиску у разі застосування моделі рівномірного і безперервного відбору газу по довжині.

2. Доведено, що уточнена формула для розрахункової витрати газу має однаковий вигляд як для газопроводів низького, так і середнього та високого тисків. Вона містить коефіцієнт, що залежить від режиму руху газу, та величину співвідношення транзитної та шляхової витрат газу на ділянці газорозподільних мереж.

3. Одержано аналітичні вирази для коефіцієнтів математичної моделі Лейбензона у разі застосування формули Хофера для коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі транспортування газу газорозподільними мережами.

4. Встановлено, що для газових мереж різних категорій робочого тиску уточнення розрахункової витрати газу у разі застосування запропонованої формули суттєво залежить від співвідношення транзитної та шляхової витрати газу на ділянці. У той же час, ступінь завантаження газопроводу, тобто величина числа Рейнольдса, значно менше впливає на уточнення результатів визначення розрахункових витрат газу.

5. За результатами досліджень одержано графічні та аналітичні залежності ступеня уточнення величини розрахункової витрати газу від величини співвідношення транзитної та шляхової витрати газу для газорозподільних мереж різних категорій робочого тиску. Встановлено, що максимальне значення уточнення розрахункової витрати (13-15)% відповідає тупиковим ділянкам, для яких транзитна витрати газу дорівнює нулю. При співвідношенні транзитної та шляхової витрат газу на ділянці газопроводу (1,3-1,5) уточнення розрахункової витрати газу близьке до 1%.

6. Уточнений метод визначення розрахункових витрат газу може бути застосований при розробленні обчислювальних алгоритмів та програмного забезпечення газодинамічних роз-

рахунків газорозподільних мереж населених пунктів.

Література

1. Brkic D. Two efficient methods for gas distributive net work calculation. *23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy System*. 2011. Vol. 29. P. 366. URL: https://www.researchgate.net/publication/279777308_A_Gas_Distribution_Network_Hydraulic_Problem_from_Practice_vol_29_pg_366_2011 (дата звертання 14.04.2024).

2. Yongan Y., Juntao Y., Jingyi L., Jiajia L. Analysis on hydraulic adaptability and pressure drop factors of low-pressure pipe network in coal-bed methane field. *Article Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9(2). P. 1–11.

DOI: [10.1177/1687814017693947](https://doi.org/10.1177/1687814017693947).

URL: <http://journals.sagepub.com/home/ade>.

3. Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson, Gary Z. Wstters. *Hydraulics of Systems*. CRC Press. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. 2000. 533 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9780367802431> (дата звертання 14.04.2024).

4. Alesmaeel M., Alfarsi A., Almusa S., Diaz E., Grigoryan S., Queda J., Zirakian T., Boyajian D. Analysis of a Hydraulic Pipe System with Major and Minor Pressure Losses. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2019. No 13. P. 209–217. DOI: [10.17265/1934-7359/2019.03.006](https://doi.org/10.17265/1934-7359/2019.03.006)

5. Salmasi F., Khatibi R., Ghorbani M. A. A study of friction factor formulation in pipes using artificial intelligence techniques and explicit equations. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 2012. No 36. P. 121–138. DOI: [10.3906/muh-1008-30](https://doi.org/10.3906/muh-1008-30). URL: <https://aj.tubitak.gov.tr/engineering/issues/muh-12-36-2/muh-36-2-3-1008-30.pdf> (дата звертання 14.04.2024).

6. Yetilmezsoy K., Bahramian M., Klyan E., Bahramian M.. Development of a New Practical Formula for Pipe-Sizing Problems within the Framework of a Hybrid Computational Strategy. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 147. No 5. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001556> (дата звертання 14.04.2024).

7. Середюк М. Д. Розрахунок коефіцієнта гідравлічного опору в газових мережах населених пунктів. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2022. № 8 (127). С. 51–60. DOI: [10.25313/2520-2057-2022-8-8156](https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-8-8156).

8. Середюк М.Д., Великий С.В. Аналіз методів визначення газодинамічної енерговитратності газових мереж населених пунктів. *Нафтогазова енергетика*. 2022. № 2(38). С. 51–61. DOI: [10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-51-61](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-51-61).

9. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. [Чинний від 2019-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2019. 113 с.

10. Гончарук М.І., Середюк М.Д, Шелудченко В.І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: *Сімік*, 2006. 1313 с.

11. Середюк М.Д. Проєктування та експлуатація газових мереж: навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. 144 с.

References

1. Brkic D. Two efficient methods for gas distributive net work calculation. *23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy System*. 2011. Vol. 29. P. 366. URL: https://www.researchgate.net/publication/279777308_A_Gas_Distribution_Network_Hydraulic_Problem_from_Practice_vol_29_pg_366_2011 (дата звертання 14.04.2024).

2. Yongan Y., Juntao Y., Jingyi L., Jiajia L. Analysis on hydraulic adaptability and pressure drop factors of low-pressure pipe network in coal-bed methane field. *Article Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9(2). P. 1–11.

DOI: [10.1177/1687814017693947](https://doi.org/10.1177/1687814017693947).

URL: <http://journals.sagepub.com/home/ade>.

3. Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson, Gary Z. Wstters. *Hydraulics of Systems*. CRC Press. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. 2000. 533 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9780367802431> (дата звертання 14.04.2024).

4. Alesmaeel M., Alfarsi A., Almusa S., Diaz E., Grigoryan S., Queda J., Zirakian T., Boyajian D. Analysis of a Hydraulic Pipe System with Major and Minor Pressure Losses. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2019. No 13. P. 209–217. DOI: [10.17265/1934-7359/2019.03.006](https://doi.org/10.17265/1934-7359/2019.03.006)

5. Salmasi F., Khatibi R., Ghorbani M. A. A study of friction factor formulation in pipes using artificial intelligence techniques and explicit equations. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 2012. No 36. P. 121–138. DOI: [10.3906/muh-1008-30](https://doi.org/10.3906/muh-1008-30). URL: <https://aj.tubitak.gov.tr/engineering/issues/muh-12-36-2/muh-36-2-3-1008-30.pdf> (дата звертання 14.04.2024).

6. Yetilmezsoy K., Bahramian M., Kiyani E., Bahramian M.. Development of a New Practical Formula for Pipe-Sizing Problems within the Framework of a Hybrid Computational Strategy. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 147. No 5. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001556> (дата звертання 14.04.2024).
7. Seredyuk M. D. Rozrahunok koefitsienta gidravlichnogo oporu v gazovih merezhah naselenih punktiv. *Mizhnarodniy naukoviy zhurnal «Internauka»*. 2022. No 8 (127). P. 51-60. DOI: [10.25313/2520-2057-2022-8-8156](https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-8-8156) [inUkrainian]
8. Seredyuk M. D., Velikiy S. V. Analiz metodiv viznachennya gazodinamichnoyi energovitratnostI gazovih merezh naselenih punktiv. *Naftogazova energetika*, 2022. No 2(38). P. 51–61. DOI: [10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-51-61](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-51-61) [in Ukrainian]
9. DNB V.2.5-20:2018. Hazopostachannia. [Chynnyi vid 2019-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Minhehion Ukrainy, 2019. 113 p. [in Ukrainian]
10. Goncharuk M. I., Seredyuk M. D., Sheludchenko V. I. Dovidnyk z gazopostachannya naselenykh punktiv Ukrainy. Ivano-Frankivsk: *Simik*, 2006. 1313 p. [in Ukrainian]
11. Seredyuk M. D. Proektuvannya ta ekspluatatsiia gazovykh merezh: navch. posib. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2022. 144 p. [in Ukrainian].