

РОЗРАХУНОК ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ПРОФІЛЮ ТРАСИ

М. Д. Середюк*, Н. В. Мотрук

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

На сьогодні питання будівництва нових та реконструкції існуючих газорозподільних мереж України безпосередньо пов'язані з удосконаленням методів їх проектування та експлуатації. Частина газорозподільних мереж України прокладена або планується до проектування та будівництва на територіях зі складними топографічними умовами. Це стосується, насамперед, систем газопостачання населених пунктів західних областей України. До сьогодні газодинамічні розрахунки зовнішніх газових мереж проводять без урахування впливу профілю траси через відсутність розуміння важливості цього чинника та неврахування його в нормативних методиках. Метою роботи є встановлення впливу профілю траси на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж високого, середнього та низького тисків. Базуючись на рівнянні Бернуллі для усталеного режиму руху реального газу у трубопроводі, за результатами теоретичних досліджень одержано розрахункові формули для встановлення зміни тиску в газорозподільних мережах високого, середнього та низького тисків з урахуванням впливу профілю траси, особливостей їх геометричної структури та режимних параметрів. Для газових мереж низького тиску передбачено додаткове урахування гідростатичного напору. Встановлено, що для газових мереж всіх категорій тиску при фіксованій витраті газу величина уточнення газодинамічних витрат тиску врахуванням профілю траси лінійно залежить від геометричного нахилу ділянки. Коефіцієнт пропорційності в лінійній залежності з достовірністю апроксимації понад 99 % описується степеневою функцією від числа Рейнольдса. Одержано, що для газопроводу діаметром 108x3 мм із відносно невеликим геометричним нахилом 0,1 та середнім завантаженням уточнення газодинамічної енерговитратності становить: за високого тиску - 60 %; за середнього тиску - 48 %; за низького тиску при додатковому врахуванні гідростатичного напору - 101 %. Результати досліджень довели необхідність врахування профілю траси при проектних та експлуатаційних розрахунках газорозподільних мереж всіх категорій тиску.

Ключові слова : газодинамічний розрахунок; профіль траси трубопроводу; геометричний нахил; гідростатичний напір; газодинамічна енерговитратність газових мереж

To date, the issues of construction of new and reconstruction of existing gas distribution networks of Ukraine are directly related to the improvement of their design and operation methods. Part of Ukraine's gas distribution networks has been laid or is planned to be laid in areas with difficult topographical conditions. First of all, this concerns the gas supply systems of populated areas in the western regions of Ukraine. To date, gas dynamic calculations of external gas networks are carried out without taking into account the influence of the route profile due to a lack of understanding of the importance of this factor and its failure to be taken into account in regulatory methods. The aim of this work is to determine the influence of the route profile on the gas dynamic energy consumption of high, medium and low pressure gas distribution networks. On the basis of the Bernoulli equation for the steady state of the movement of real gas in the pipeline, and on the basis of the results of theoretical studies, calculation formulas were obtained for determining the pressure change in gas distribution networks from high, medium to low pressure, taking into account the influence of the route profile, features of their geometric structure and regime parameters. For low pressure gas networks, the hydrostatic head is also taken into account. It has been found that for gas networks of all pressure categories with a fixed gas flow, the degree of refinement of gas-dynamic pressure losses taking into account the profile of the pipeline depends linearly on the geometric slope of the section. The coefficient of proportionality is described by a power function of the Reynolds number in a linear dependence with an approximation reliability of more than 99%. It was found that for a gas pipeline with a diameter of 108x3 mm, with a relatively small geometric slope of 0.1 and an average load, the refinement of the gas-dynamic energy consumption is: at high pressure 60%; at medium pressure 48%; at low pressure with additional consideration of hydrostatic pressure 101%. The results of the study demonstrate the need to take into account the profile of the pipeline when designing and calculating the operation of gas distribution networks of all pressure classes.

Keywords: gas dynamic calculation; pipeline route profile; geometric slope; hydrostatic pressure; gas dynamic energy consumption of gas networks

Вступ

Розвиток енергетичної сфери безпосередньо впливає як на рівень життя населення, так і на економічний стан держави. Україна повинна забезпечувати умови для покращення добробуту власних громадян, і однією з головних умов є забезпечення населення необхідними енергоресурсами. Цю функцію виконує паливно-енергетичний комплекс України. В умовах повномасштабного вторгнення Росії Україні доводиться не лише боротися за свою незалежність, але й знаходити шляхи забезпечення своїх громадян необхідними енергоресурсами. Вже в першому кварталі 2024 року, порівняно із аналогічним періодом минулого року, Групи Нафтогаз вдалося збільшити видобуток газу майже на 12 %. Цього результату вдалося досягти за рахунок запуску нових продуктивних свердловин, а також ефективної роботи зі старим фондом [1]. Збільшення видобутку власного природного газу завдяки модернізації та розробці нових горизонтів свідчить не лише про підтримання, але й про можливість розширення системи газопостачання України, адже навіть на сьогоднішній день не всі населені пункти є газифікованими. Крім того, значна частина газорозподільних мереж підлягає реконструкції. Реконструкція систем газопостачання вимагає впровадження енергоефективних технологій, удосконалення методів проектування та експлуатації газових мереж.

Ефективність та надійність системи газопостачання значною мірою залежить від правильності виконання проектних та експлуатаційних розрахунків її елементів. У зв'язку з цим важливе практичне значення має розроблення достовірних методів газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж складної структури та різних категорій тиску. Одним з важливих питань є встановлення впливу гравітаційного чинника на газодинамічну енерговитратність газових мереж.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Удосконаленню методів проектних та експлуатаційних розрахунків газорозподільних мереж присвячено низку робіт вітчизняних та закордонних вчених. Більшість із них стосується вибору розрахункових формул для коефіцієнта гідравлічного опору для різних режимів транспортування газу та газоводневих сумішей, впливу робочої температури й тиску на режим експлуатації газових мереж, впливу ступеня завантаження газопроводів на енергоефективність системи газопостачання. У роботі [2] об-

грунтовано умови застосування універсальної формули Колбрука-Уайта для коефіцієнта гідравлічного опору замість формул, рекомендованих чинними нормативними документами [3,4] при гідравлічних розрахунках газорозподільних мереж. Показано, що результати гідравлічного розрахунку за нормативною формулою помітно відрізняється від результатів розрахунку за формулою Колбрука-Уайта. Величина даної різниці залежить від величини завантаження газопроводу та від температури газу. Для зони турбулентного режиму руху газу встановлено тенденцію до зростання неточності обчислення перепаду тиску газу за нормативною формулою зі збільшенням числа Рейнольдса. Максимальне значення абсолютної похибки становить 9,7 % за температури газу 30 °С.

У роботі [5] на основі результатів математичного моделювання встановлено можливість застосування формули Хофера для обчислення коефіцієнта гідравлічного опору замість формул, передбачених чинним нормативним документом ДБН В.2.5-20-2018, при газодинамічних розрахунках сталевих та поліетиленових газових мереж високого, середнього та низького тисків для різних ступенів їх завантаження.

Особливості методів газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж при використанні програмного комплексу SIMONE розглянуто у роботі [6]. Встановлено ступінь відповідності теоретичної бази, закладеної в обчислювальні алгоритми зазначеного комплексу, методам газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж, що рекомендовані вітчизняними нормативними документами [3,4].

Аналіз засвідчив, що тільки невелика кількість робіт безпосередньо присвячена дослідженням впливу профілю траси газових мереж на результати їх проектних та експлуатаційних розрахунків. У наявних роботах зазвичай обмежуються врахуванням гідростатичного напору при газодинамічних розрахунках внутрішніх та зовнішніх газових мереж низького тиску. У роботі [7] запропоновано метод урахування зміни надлишкового тиску газу в газових мережах низького тиску на їх технологічні та економічні параметри. Зазначений метод базується на застосуванні спрощеної формули для гідростатичного напору, рекомендованої чинними нормативними документами [3,4]. Доведено, що врахування гідростатичного напору у процесі проектування спричинює зміну необхідних діаметрів ділянок газової мережі низького тиску, що помітно впливає на вартість системи газопостачання населеного пункту. Урахування зазначеного чинника дає змогу виконати більш

якісний проєкт газопостачання населених пунктів. При експлуатації газових мереж це дає можливість більш точно прогнозувати витрати і тиски газу в елементах газової мережі, забезпечуючи нормальний режим газопостачання споживачів. У роботі [8] обґрунтовано доцільність використання барометричної формули з метою врахування величини гідростатичного напору при газодинамічних розрахунках газових мереж низького тиску. Одержано аналітичні залежності ступеня уточнення гідростатичного перепаду тиску від різниці геодезичних позначок кінців газопроводу та середньої температури газу. За результатами досліджень доведено, що використання барометричної формули замість спрощеної лінійної залежності дає можливість на (10 -15) % уточнити результати газодинамічного розрахунку газових мереж низького тиску, що підвищує ефективність проєктування та експлуатації систем газопостачання населених пунктів.

У роботі [9] наведено аналіз результатів розподілу надлишкового тиску, швидкості та витрат газових потоків, отриманих під час моделювання течії газу в мережі трубопроводів низького тиску. Розрахунки проводились для ділянки існуючої газової мережі та фактичних даних, що описують споживання газу з мережі комунальними споживачами, та фактичних кліматичних даних, характерних для конкретного міста. Визначено мінімальний і максимальний надлишковий тиски потоку газу, що надходить у мережу, залежно від величини навантаження мережі та різниці у висоті між джерелом живлення та найбільш віддаленим споживачем мережі. Показано, що врахування в розрахунках відмінностей у висоті розташування окремих трубопроводів впливає на вибір граничних значень надлишкового тиску потоку газу, що постачає мережу.

Дослідження в роботі [10] зосереджено на динамічному моделюванні мережі газорозподільних трубопроводів. Програмне забезпечення здійснює керування динамікою тиску та витратами газу у рамках двох спрощених газодинамічних моделей. Ці спрощені моделі враховують нахил газопроводу, якого уникають у більшості наявних робіт з цього питання. Запропоновано дві чисельні схеми для інтеграції цих моделей. Для реалізації запропонованих числових схем використовувався інструмент MATLAB-Simulink. Створено бібліотеку з усіма основними компонентами мережі, за допомогою якої можна змоделювати поведінку трубопроводних мереж на основі окремого моделювання взаємопов'язаних блоків газопроводу.

Приклади розрахунків, що представлені в [10], свідчать, що впливом профілю траси не можна нехтувати в рівняннях моделей газових мереж, оскільки при використанні різних значень нахилу має місце значна різниця тисків на виході.

Слід зазначити, що результати досліджень закордонних вчених не завжди можна використати в Україні, оскільки параметри газорозподільних мереж інших країн помітно відрізняються від геометричних та технологічних параметрів газових мереж України.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Частина газорозподільних мереж України прокладена або планується до проєктування та будівництва на територіях зі складними топографічними умовами – насамперед з пересіченим рельєфом. Особливо це стосується систем газопостачання населених пунктів західних областей України. До сьогодні газодинамічні розрахунки зовнішніх газових мереж проводять без урахування впливу профілю траси. Чинні нормативні документи передбачають урахування зазначеного чинника лише для газових мереж низького тиску, не пропонуючи при цьому конкретних методів розрахунку. Вітчизняні та зарубіжні джерела також не містять окремих методів газодинамічного розрахунку газових мереж високого, середнього та низького тисків з урахуванням впливу особливостей профілю траси. У роботах [11,12] запропоновано методи урахування зазначеного чинника для умов транспортування газу в магістральних газопроводах, які не відповідають умовам експлуатації газорозподільних мереж.

На сьогодні відсутні дослідження щодо ступеня впливу профілю траси на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж залежно від робочого тиску, температури та витрати газу. Під час розрахунків враховують тільки додатковий, спричинений профілем траси газопроводу низького тиску, гідростатичний напір, для якого чинні нормативні документи [3,4] рекомендують таку спрощену формулу

$$\Delta P_{zc} = g(h_n - h_k)(\rho_{повн} - \rho_n), \quad (1)$$

де g - прискорення сили тяжіння;

h_n - геодезична позначка початку ділянки газопроводу (за напрямом руху газу);

h_k - геодезична позначка кінця ділянки газопроводу;

$\rho_{повн}$ - густина повітря за нормальних умов;

ρ_n - густина газу за нормальних умов.

Як зазначено у роботі [8], зміну тиску газу та повітря від висоти можна більш точно описати барометричною формулою, на базі якої одержано таку уточнену залежність для гідростатичного напору на ділянці газових мереж низького тиску:

$$\Delta p_{zc} = (p_{n_2} - p_{n_{нов}}) - p_{n_2} \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{ZRT}\right] + p_{n_{нов}} \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{R_{нов}T}\right], \quad (2)$$

де $p_{n_2}, p_{n_{нов}}$ - абсолютний тиск газу і повітря на початку ділянки газових мереж;

R - газова стала природного газу;

$R_{нов}$ - газова стала сухого повітря стандартного складу, $R_{нов} = 287,08$ Дж/(кг·К).

Z - середнє значення коефіцієнта стисливості газу на ділянці газових мереж;

T - середня температура газу на ділянці газових мереж.

У роботі (8) розглянуто тільки величину гідростатичного напору в газових мережах низького тиску. Робота, що пропонується, досліджує комплексний вплив профілю траси на режимні параметри газорозподільних мереж високого, середнього та низького тисків.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є встановлення впливу профілю траси на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж високого, середнього та низького тисків, що реалізується шляхом вирішення таких завдань:

- розробити метод газодинамічного розрахунку газових мереж високого та середнього тисків з урахуванням профілю траси;

- розробити метод газодинамічного розрахунку газових мереж низького тиску з урахуванням профілю траси та гідростатичного напору;

- встановити вплив профілю траси на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж залежно від геометричного нахилу, робочого тиску та завантаження.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для газодинамічного розрахунку ділянки газорозподільних мереж довжиною dx застосуємо рівняння Бернуллі, яке містить складову, що враховує вплив профілю траси [11]

$$\frac{dp}{\rho} + gdh + \frac{\lambda w^2 dx}{2D} = 0, \quad (3)$$

де p - абсолютний тиск газу;

ρ - густина газу;

h - геодезична позначка;

λ - коефіцієнт гідравлічного опору;

w - усереднена за перерізом труби швидкість руху газу;

D - внутрішній діаметр ділянки газових мереж.

Густина газу виражаємо через рівняння стану реального газу

$$\rho = \frac{p}{ZRT}. \quad (4)$$

Швидкість руху газу в газопроводі є функцією масової витрати M , тиску та температури

$$w = \frac{MZRT}{pF}, \quad (5)$$

де F - площа перерізу труби ділянки газових мереж.

Рівняння (3) з урахуванням виразів (4) і (5) у результаті математичних перетворень набуває вигляду

$$pdp + \frac{p^2 g dh}{ZRT} + \frac{\lambda M^2 ZRT dx}{2DF^2} = 0. \quad (6)$$

Для елементарної ділянки газопроводу довжиною dx величину dh можна записати через геометричний нахил i_2 [11]

$$dh = i_2 dx = \frac{h_k - h_n}{l} dx, \quad (7)$$

де l - довжина ділянки газових мереж.

Вводимо у рівняння (6) нову змінну

$$u = p^2. \quad (8)$$

Диференціальне рівняння (6) з урахуванням виразів (7) і (8) зводимо до вигляду

$$du + \frac{2ugi_2 dx}{ZRT} + \frac{\lambda M^2 ZRT dx}{2DF^2} = 0. \quad (9)$$

Зазвичай коефіцієнт гідравлічного опору, температура і величина коефіцієнта стисливості газу дещо змінюються по довжині ділянки газових мереж, однак умовах газорозподільних мереж зміна зазначених параметрів незначна. Тому при інтегруванні рівняння (9) приймаємо ці параметри сталими, усередненими по довжині газопроводу [13].

Введемо такі позначення

$$b = \frac{2gi_2}{ZRT}, \quad (10)$$

$$c = \frac{\lambda M^2 ZRT}{DF^2}. \quad (11)$$

Рівняння (9) з урахуванням виразів (10) і (11) після математичних перетворень набуває вигляду

$$\frac{du}{bu+c} + dx = 0. \quad (12)$$

Виконуємо інтегрування рівняння (12) з урахуванням умов на початку та в кінці ділянки газових мереж. У результаті одержуємо такий вираз

$$\frac{bp_k^2+c}{bp_n^2+c} = e^{-bl}. \quad (13)$$

де p_n, p_k - абсолютний тиск газу на початку та в кінці ділянки газових мереж.

Розв'язуємо рівняння (13) відносно кінцевого тиску газу

$$p_k = \sqrt{p_n^2 e^{-bl} - \frac{c}{b}(1-e^{-bl})}. \quad (14)$$

Формулу (14) з урахуванням (11) записуємо у такому вигляді

$$p_k = \sqrt{p_n^2 e^{-bl} - \frac{\lambda ZRTM^2}{bDF^2}(1-e^{-bl})}. \quad (15)$$

Із виразу (15) одержуємо формулу для визначення масової витрати газу на ділянці газових мереж з урахуванням профілю траси

$$M = \sqrt{\frac{(p_n^2 e^{-bl} - p_k^2) b DF^2}{\lambda ZRT(1-e^{-bl})}}. \quad (16)$$

Згідно з чинними нормативними документами [3,4] витрату газу в газорозподільних мережах України необхідно зводити до об'ємних одиниць Q_n за стандартних умов, що відповідають нормальним фізичним умовам $p_n = 101325$ Па, $T_n = 273,15$ К.

Змінюємо вигляд розрахункових формул (15) і (16) з урахуванням таких співвідношень:

$$R = \frac{R_{нов}}{\Delta}, F = \frac{\pi D^2}{4}, \rho_n = \frac{p_n \Delta}{Z_n R_{нов} T_n},$$

$$M = Q_n \rho_n = \frac{Q_n p_n \Delta}{Z_n R_{нов} T_n}, \quad (17)$$

де Δ - відносна густина газу за повітрям.

Після математичних перетворень одержуємо такі розрахункові формули для абсолютного тиску газу в кінці ділянки газових мереж

$$p_k = \sqrt{p_n^2 e^{-bl} - K_1 \frac{\lambda Z \Delta T Q_n^2}{b Z_n^2 D^5} (1-e^{-bl})}, \quad (18)$$

де K_1 - комплекс сталих величин, значення якого залежить від вибору системи одиниць;

$$K_1 = \frac{16 p_n^2}{\pi^2 R_{нов}^2 T_n^2}, \quad (19)$$

$$b = \frac{2 g i_z \Delta}{Z R_{нов} T}, \quad (20)$$

або

$$p_k = \sqrt{p_n^2 e^{-bl} - K_2 \frac{\lambda Z^2 T^2 Q_n^2}{Z_n^2 D^5 i_z} (1-e^{-bl})}, \quad (21)$$

де

$$K_2 = \frac{8 p_n^2}{\pi^2 T_n^2 g}. \quad (22)$$

Розрахункова формула для об'ємної витрати газу за нормальних умов для ділянки газових мереж з урахуванням впливу профілю траси зводиться до вигляду

$$Q_n = K_3 Z_n D^{2.5} \sqrt{\frac{(p_n^2 e^{-bl} - p_k^2) b}{\lambda Z \Delta T (1-e^{-bl})}}, \quad (23)$$

де K_3 - сталий комплекс параметрів, значення якого залежить від вибору системи одиниць

$$K_3 = \frac{\pi \sqrt{R_{нов} T_n}}{4 p_n}. \quad (24)$$

У міжнародній системі одиниць $K_3 = 0,03587$.

За формулами (18)-(24) можна виконувати газодинамічні розрахунки з урахуванням профілю траси газових мереж високого, середнього та низького тисків. Однак, для газових мереж низького тиску можна запропонувати спрощений метод врахування профілю траси.

Газові мережі низького тиску характеризуються незначними перепадами тиску, тому при їх газодинамічних розрахунках густина газу вважається сталою величиною. Як розрахункову величину густини приймаємо значення, що відповідає середньому абсолютному тиску газу на ділянці газових мереж $p_{сеп}$ [13]

$$\rho = \rho_{сеп}. \quad (25)$$

Тоді усереднене значення швидкості газу на ділянці газових мереж низького тиску дорівнює

$$w = \frac{M}{\rho_{сеп} F}. \quad (26)$$

Диференціальне рівняння (3) з урахуванням виразів (7), (25) і (26) зводимо до такого вигляду:

$$dp + \rho_{сеп} g i_z dx + \frac{\lambda M^2 dx}{2DF^2 \rho_{сеп}} = 0. \quad (27)$$

Підставляємо у рівняння (27) вираз для середньої густини газу на ділянці газових мереж низького тиску

$$\rho_{сеп} = \frac{p_{сеп}}{Z_{сеп} RT}, \quad (28)$$

де $Z_{сеп}$ - середнє значення коефіцієнта стисливості газу, що відповідає $p_{сеп}$ і T .

У результаті одержуємо таке рівняння:

$$dp + \frac{p_{cep}}{Z_{cep}RT} g_{i_2} dx + \frac{\lambda M^2 Z_{cep} RT dx}{2DF^2 p_{cep}} = 0. \quad (29)$$

Виконуємо інтегрування диференціального рівняння (29)

$$p_n - p_k = \left(\frac{p_{cep}}{Z_{cep}RT} g_{i_2} + \frac{\lambda M^2 Z_{cep} RT}{2DF^2 p_{cep}} \right) l. \quad (30)$$

Якщо перейти від масової витрати газу до об'ємної, що зведена до нормальних умов, то формула (30) у результаті математичних перетворень набуває вигляду

$$p_n - p_k = \left(\frac{8p_n^2}{\pi^2 T_n^2 R_{нов}} \cdot \frac{\lambda Z_{cep} \Delta T Q_n^2}{D^5 p_{cep} Z_n^2} + \frac{p_{cep} \Delta}{Z_{cep} R_{нов} T} g_{i_2} \right) \cdot l. \quad (31)$$

Спрощена методика газодинамічного розрахунку газових мереж низького тиску, що наведена у чинних нормативних документах [3,4], передбачає виконання таких умов:

$$T = T_n, \quad p_{cep} = p_n, \quad Z_n = 1, \quad Z_{cep} = 1. \quad (32)$$

Враховуючи умови (32), одержуємо таку спрощену формулу для газодинамічного розрахунку ділянки газових мереж низького тиску з урахуванням профілю траси

$$\Delta p_1 = \frac{p_n \Delta}{Z_n R_{нов} T_n} \left(\frac{8\lambda Q_n^2}{\pi^2 D^5} + g_{i_2} \right) l. \quad (33)$$

Як зазначалось вище, газові мережі низького тиску, на відміну від мереж середнього та високого тисків, безпосередньо пов'язані із споживачами природного газу. Режим експлуатації газових приладів споживачів визначається величиною надлишкового тиску у газових мережах низького тиску. Відмінності зміни абсолютного тиску з висотою для повітря та природного газу спричиняють так звані гідростатичний напір, який змінює величину надлишкового тиску, що подається споживачу. Цей додатковий чинник, крім втрат тиску за формулою (33), необхідно враховувати при гідравлічному розрахунку газових мереж низького тиску.

Для цього використаємо формулу (2), одержану нами у роботі [8], в яку вносимо певні корективи і зводимо до такого вигляду:

$$\Delta p_{zc} = (p_{n_2} - p_{n_{нов}}) - p_{n_2} \exp \left[-\frac{g_{i_2} \Delta l}{ZRT} \right] + p_{n_{нов}} \exp \left[-\frac{g_{i_2} l}{Z_{нов} R_{нов} T} \right], \quad (34)$$

де $Z_{нов}$ - коефіцієнт стисливості сухого повітря стандартного складу, $Z_{нов} = 0,999419$ за температури 0°C і тиску 101325 Па; $Z_{нов} = 0,999645$ за температури 20°C і тиску 101325 Па [14].

Таким чином, загальна зміна тиску в газових мережах низького тиску з урахуванням профілю траси складається із двох складових

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_{zc}. \quad (35)$$

Якщо природний газ на ділянці газових мереж рухається вгору, то перша складова додатна, а друга - від'ємна. Для ділянок газових мереж низького тиску з від'ємним геометричним нахилом перша складова від'ємна, друга - додатна.

За наведеними вище розрахунковими формулами розроблено обчислювальний алгоритм та комп'ютерну програму. Блок розрахунку фізичних властивостей газу передбачає обчислення густини, відносної густини за повітрям, коефіцієнта стисливості за нормальних фізичних умов згідно з вимогами міжнародного стандарту [14]. У програму закладено метод ітерацій для уточнення середнього тиску та фізичних властивостей газу в умовах транспортування газовими мережами високого, середнього та низького тисків.

Для газових мереж середнього та високого тисків газодинамічну енерговитратність характеризує енергетичний параметр A

$$A = \frac{p_n^2 - p_k^2}{l}. \quad (36)$$

Уточнення газодинамічної енерговитратності газових мереж середнього та високого тиску визначалось шляхом порівняння величини параметра A_g за умови врахування впливу профілю траси та параметра A без врахування даного чинника

$$\delta = \frac{(A_g - A) \cdot 100}{A} \% . \quad (37)$$

Дослідження впливу профілю траси ділянки газових мереж на енерговитратність транспортування газу проведено на модельному сталевому газопроводі високого, середнього та низького тисків діаметром 108×3 мм. Довжина газопроводу - 500 м. Приймали, що газопроводом транспортується 12-компонентний природний газ, молярна частка метану якому становила $91,15\%$.

Спочатку дослідження проводили для ділянки газопроводу високого тиску з початковим надлишковим тиском $p_n = 1,2$ МПа. Розрахунки виконано для різних значень геометричного нахилу за розрахункових витрат, які від-

Таблиця 1 – Результати уточнення газодинамічної енерговитратності в газопроводі високого тиску для різних значень геометричного нахилу для витрати газу 1500 м³/год

Назва параметра	Значення параметрів за різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки газових мереж, м						
	5	10	20	50	100	150	200
Геометричний нахил ділянки газових мереж	0,01	0,02	0,04	0,10	0,20	0,30	0,40
Кінцевий тиск газу без урахування профілю траси, Па	1293568	1293568	1293568	1293568	1293568	1293568	1293568
Кінцевий тиск газу з урахуванням профілю траси, Па	1293412	1292913	1291915	1288926	1283958	1279010	1274081
Параметр $A \cdot 10^5$ без врахування профілю траси	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026
Параметр $A \cdot 10^5$ з врахуванням профілю траси	4,106	4,365	4,880	6,424	8,980	11,516	14,033
Відносна різниця енергетичного параметра A , %	2,0	8,4	21,2	59,6	123,1	186,1	248,6

повідують діапазону можливого завантаження газопроводу високого тиску. Розраховували тиск газу у кінці газопроводу без врахування та з урахуванням впливу профілю траси. Визначали величину енергетичного параметра A та за формулою (37) знаходили відносну різницю результатів. Таблиця 1 містить результати уточнення енергетичного параметра A в газопроводі високого тиску для різних значень геометричного нахилу для витрати газу 1500 м³/год.

Як бачимо з даних таблиці 1, для значень геометричного нахилу у діапазоні від 0,02 до 0,4 неврахування впливу профілю траси ділянки газових мереж високого тиску спричинює похибку у визначенні енергетичного параметра відповідно від 8 % до 249 %.

За результатами газодинамічних розрахунків для інших значень витрати газу побудовано графічні залежності відносного уточнення енергетичного параметра від величини геометричного нахилу ділянки газових мереж високого тиску (рис. 1).

Математичне моделювання графічних залежностей на рисунку 1 засвідчило, що в газових мережах високого тиску для заданої витрати газу (числа Рейнольдса) відносне уточнення енергетичного параметра A з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати лінійною функцією від геометричного нахилу

$$\delta = K_g i_g, \% \quad (38)$$

Опрацювання результатів математичного моделювання графіків на рисунку 1 дало можливість одержати графічну та аналітичну залежність коефіцієнта K_g від ступеня завантаження ділянки газопроводу високого тиску (рис. 2).

Рисунок 2 засвідчує, що для газових мереж високого тиску величину коефіцієнта K_g у формулі (38) з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати такою степеневою функцією від числа Рейнольдса

$$K_g = 1,215 \cdot 10^{14} \cdot Re^{-2,017} \quad (39)$$

Аналогічні дослідження проведено для ділянки газопроводу середнього тиску з початковим надлишковим тиском $p_n = 0,3$ МПа. Розрахунки виконані для різних значень геометричного нахилу за розрахункових витрат, які відповідають можливому завантаженню ділянки газових мереж середнього тиску. Таблиця 2 містить результати уточнення енергетичного параметра A в газопроводі середнього тиску за різних значень геометричного нахилу для витрати газу 500 м³/год.

За результатами розрахунків для інших значень витрати газу побудовано графічні залежності відносного уточнення енергетичного параметра від величини геометричного нахилу ділянки газових мереж середнього тиску (рис. 3).

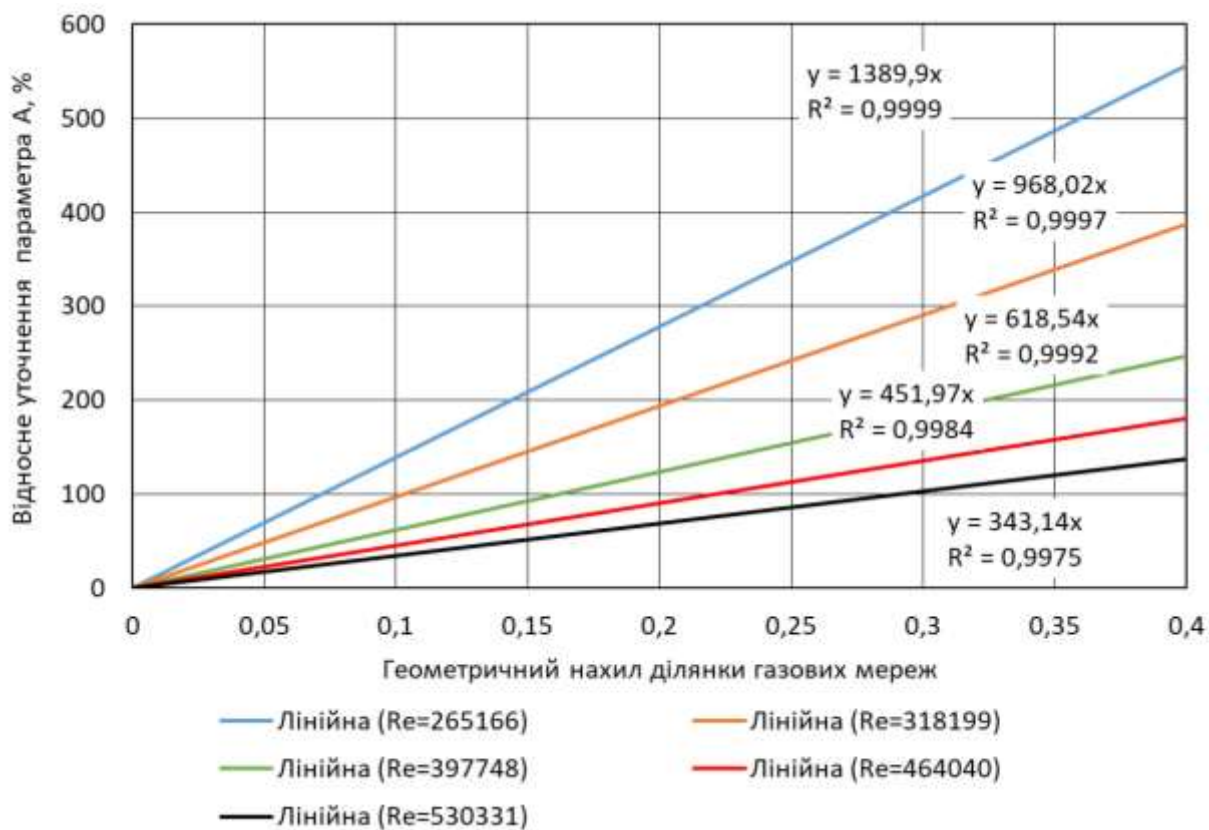


Рисунок 1 – Залежність відносного уточнення енергетичного параметра A від величини геометричного нахилу ділянки газових мереж високого тиску

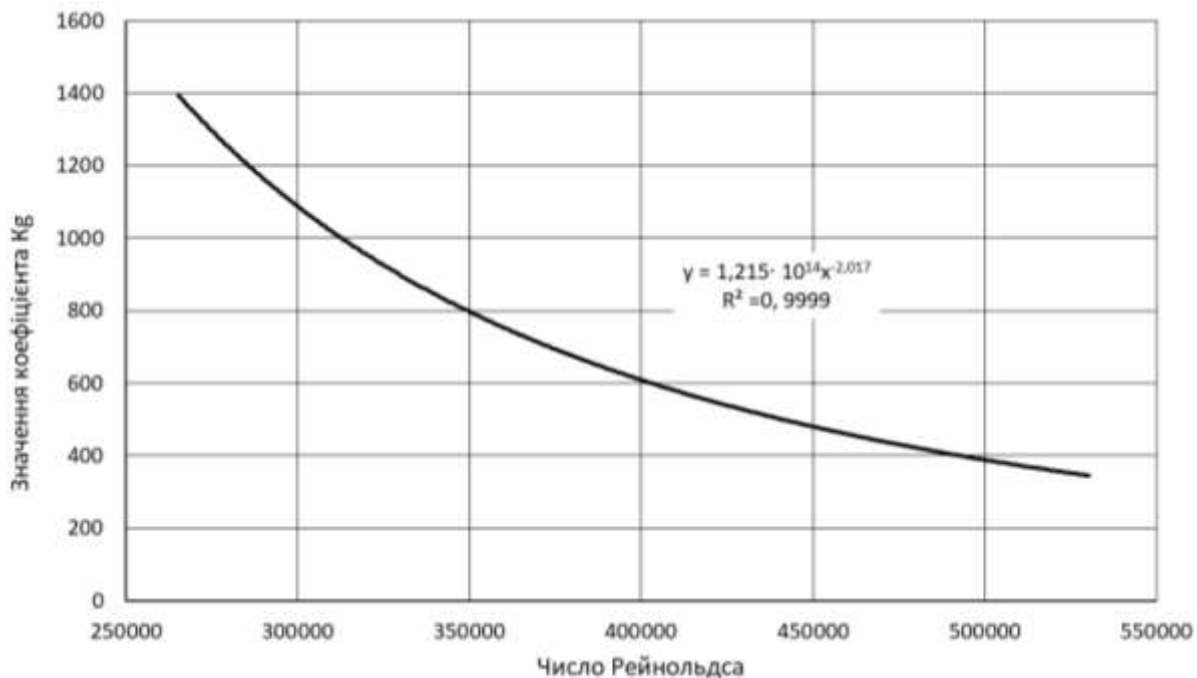


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта K_g від числа Рейнольдса для ділянки газових мереж високого тиску діаметром 108x3 мм

Таблиця 2 – Результати уточнення газодинамічної енерговитратності в газопроводі середнього тиску за різних значень геометричного нахилу для витрати газу 500 м³/год

Назва параметра	Значення параметрів за різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки газових мереж, м						
	5	10	20	50	100	150	200
Геометричний нахил ділянки газових мереж	0,01	0,02	0,04	0,10	0,20	0,30	0,40
Кінцевий тиск газу без урахування профілю траси, Па	398249	398249	398249	398249	398249	398249	398249
Кінцевий тиск газу з урахуванням профілю траси, Па	398138	397984	397676	396755	395223	393697	392177
Параметр $A \cdot 10^6$ без врахування профілю траси	4,919	4,919	4,919	4,919	4,919	4,919	4,919
Параметр $A \cdot 10^6$ з врахуванням профілю траси	5,096	5,341	5,830	7,295	9,721	12,1290	14,518
Відносна різниця енергетичного параметра A , %	3,6	8,6	18,5	48,3	97,6	146,6	195,1

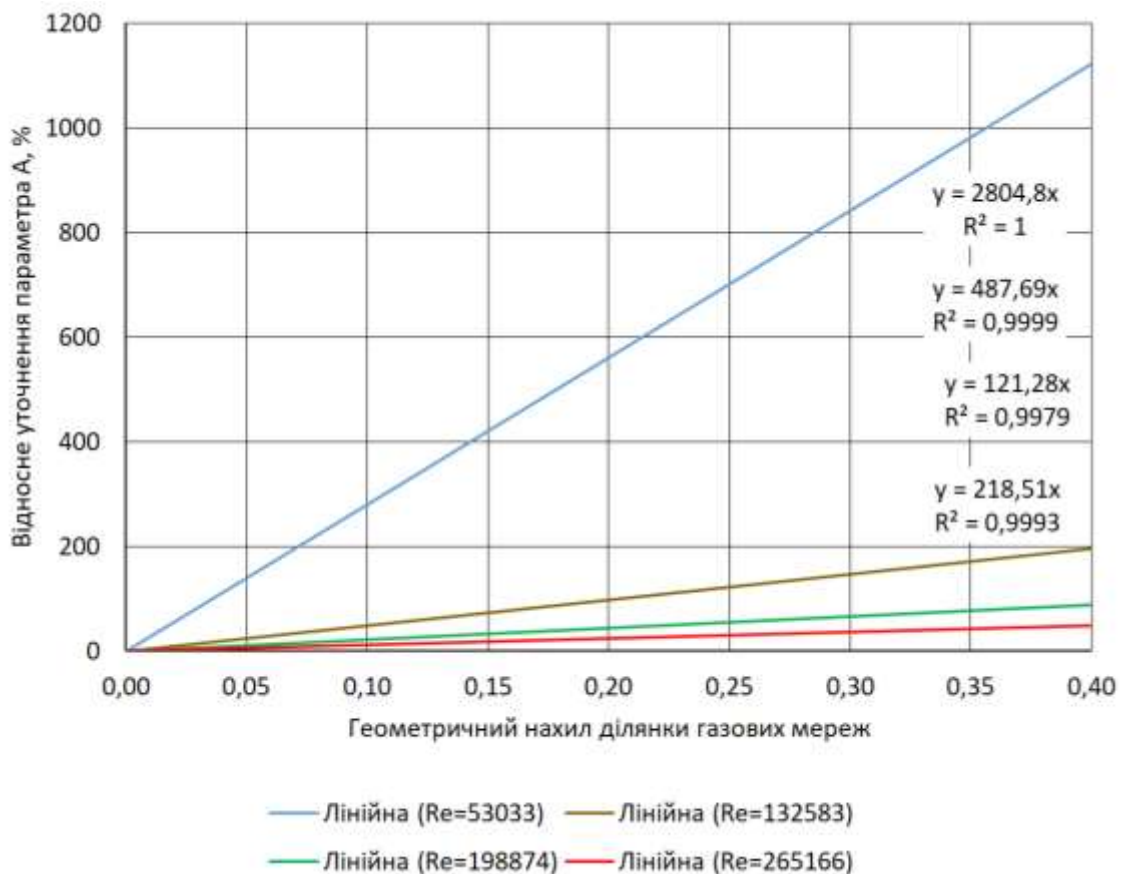


Рисунок 3 – Залежність відносного уточнення енергетичного параметра A від величини геометричного нахилу ділянки газових мереж середнього тиску

Таблиця 3 – Результати уточнення зміни тиску в газопроводі низького тиску для різних значень геометричного нахилу для витрати газу 50 м³/год

Назва параметра	Значення параметрів за різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки газових мереж, м					
	5	20	50	100	150	200
Геометричний нахил ділянки газових мереж	0,01	0,04	0,10	0,20	0,30	0,40
Кінцевий тиск газу без урахування профілю траси, Па	104158	104158	104158	104158	104158	104158
Кінцевий тиск газу з урахуванням профілю траси, Па	104118	103998	103759	103360	102964	102569
Втрати тиску без врахування профілю траси, Па	167	167	167	167	167	167
Втрати тиску з врахуванням профілю траси, Па	207	327	566	964	1361	1756
Гідростатичний напір, Па	-23	-93	-231	-459	-685	-909
Зміна тиску на ділянці газових мереж, Па	183	234	335	505	675	847
Відносна різниця зміни тиску, %	9,7	39,9	100,6	202,0	303,9	406,4

За результатами математичного моделювання графіків на рисунку 3 одержано графічну та аналітичну залежність коефіцієнта K_g від ступеня завантаження ділянки газових мереж середнього тиску. Для ділянки газових мереж середнього тиску діаметром 108x3 мм величина коефіцієнта K_g у формулі (38) з достовірністю апроксимації понад 99 % також виражається степеневою функцією від числа Рейнольдса

$$K_g = 4,441 \cdot 10^{12} \cdot Re^{-1,946} \quad (40)$$

Окремо досліджено комплексний вплив профілю траси на зміну тиску при транспортуванні газу в газових мережах низького тиску. Геометричні параметри ділянки газопроводу низького тиску аналогічні попереднім. Абсолютний тиск газу на початку ділянки приймали рівним 104325 Па. Розрахунки виконано для різних значень геометричного нахилу за розрахункових витрат, які відповідають можливому завантаженню ділянки зовнішніх газових мереж низького тиску.

Таблиця 3 містить результати уточнення зміни тиску при урахуванні впливу профілю траси в газопроводі низького тиску за різних значень геометричного нахилу для витрати газу 50 м³/год.

Рисунок 4 ілюструє сумарний вплив профілю траси, включаючи гідростатичний напір, на зміну тиску на ділянці газових мереж низького тиску за зазначених вище умов.

За результатами розрахунків побудовано графічні залежності відносного уточнення газодинамічної енерговитратності від величини геометричного нахилу ділянки газових мереж низького тиску для різного ступеня завантаження. Їх аналіз засвідчив, що для газових мереж низького тиску для заданої витрати газу також справедлива лінійна залежність величини уточнення зміни тиску від геометричного нахилу – формула (38).

Методом математичне моделювання зазначених вище графічних залежностей отримано формулу для коефіцієнта K_g залежно від ступеня завантаження ділянки газових мереж низького тиску, що характеризується числом Рейнольдса (рис.5).

Як свідчить рисунок 5, для ділянки газових мереж низького тиску діаметром 108x3 мм величина коефіцієнта K_g у формулі (38) з достовірністю апроксимації понад 99 % також виражається степеневою функцією від числа Рейнольдса

$$K_g = 2,597 \cdot 10^{10} \cdot Re^{-1,799} \quad (41)$$

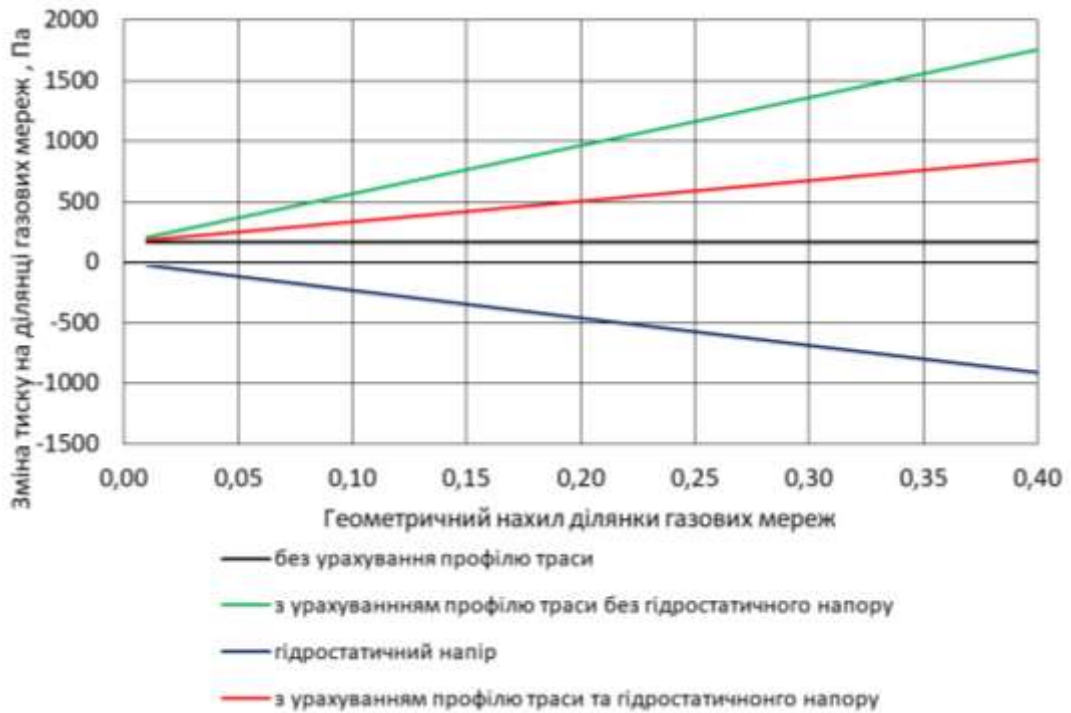


Рисунок 4 – Вплив двох чинників, пов’язаних з профілем траси, на перепад тиску на ділянці газових мереж низького тиску діаметром 108x3 мм за витрати 50 м³/год

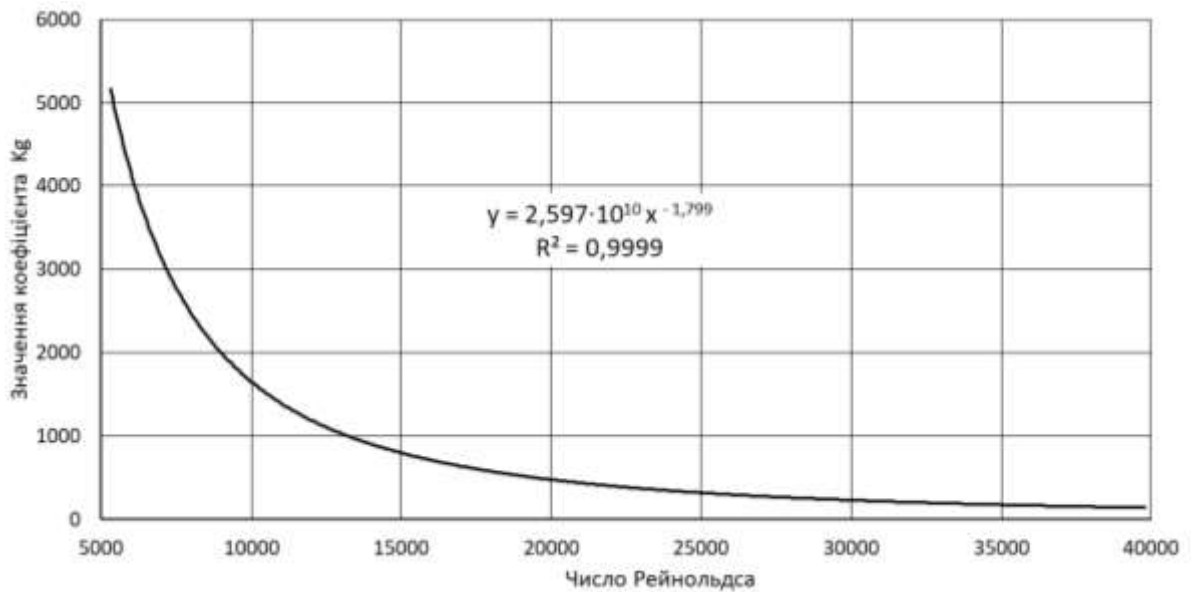


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта Kg від числа Рейнольдса для ділянки газових мереж низького тиску діаметром 108x3мм

Висновки

1. Одержано аналітичні вирази для газодинамічної енерговитратності газорозподільних мереж високого, середнього та низького тисків із урахуванням впливу профілю траси. Розрахункові формули враховують фізичні та термодинамічні властивості природного газу, як реального газу, за стандартних та робочих умов, передбачають застосування універсальної формули Хофера для визначення коефіцієнта гідравлічного опору.

2. Для газових мереж низького тиску передбачено додаткове урахування гідростатичного напору на результати газодинамічного розрахунку. Для цього запропоновано удосконалену барометричну формулу, що враховує реальні властивості природного газу та повітря.

3. Методом математичного моделювання встановлено, що для газових мереж всіх категорій тиску при фіксованій витраті газу величина уточнення газодинамічних втрат тиску врахуванням профілю траси лінійно залежить

від геометричного нахилу ділянки. Коефіцієнт пропорційності в лінійній залежності з достовірністю апроксимації понад 99 % описується степеневією функцією від числа Рейнольдса.

4. Розрахунки з урахуванням профілю траси засвідчили, що для ділянки газопроводу діаметром 108x3 мм та геометричним нахилом від 0,01 до 0,4 уточнення газодинамічної енерговитратності становить: за високого тиску і витраті газу 1500 м³/год відповідно від 2 % до 249 %; за середнього тиску і витраті газу 500 м³/год відповідно від 4 % до 195 %; за низького тиску, витраті газу 50 м³/год і додатковому врахуванні гідростатичного напору відповідно від 10 % до 404 %.

5. Результати досліджень довели необхідність врахування профілю траси при проектних та експлуатаційних розрахунках газорозподільних мереж всіх категорій тиску. Особливо це важливо для газорозподільних мереж низького тиску, допустимий перепад тиску в яких обмежений і дорівнює лише (1200-1500) Па.

6. Запропонований метод врахування профілю траси може бути застосований при розробленні обчислювальних алгоритмів та програмного забезпечення газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж населених пунктів.

Література

1. Група Нафтогаз [Електронний ресурс]: Група Нафтогаз на 12 % збільшила видобуток газу в I кварталі 2024-го порівняно з аналогічним періодом минулого року. URL: <https://www.naftogaz.com/news/naftogaz-group-increased-gas-production-by-12>.

2. Ксеніч А. І. Розрахунок газових мереж з використанням формули Колбрука. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 4(5). С. 81-85.

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

4. Кодекс газорозподільних мереж. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> (дата звернення: 01.10.2024).

5. 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.

6. 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).

7. Ксеніч А. І, Середюк М. Д. Урахування впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску. *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ*. 2010. № 1(34). С. 138-143.

8. Середюк М. Д., Ксеніч А. І. Використання барометричної формули для врахування впливу профілю траси на результати гідравлічного розрахунку газових мереж. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 3(25). С. 97-101.

9. Szoplik J. Changes in gas flow in the pipeline depending on the network foundation in the area. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 43. P.1-12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.03.020>.

10. González A. H., Jesús Manuel de la Cruz, De Andrés-Toro B., Risco-Martín J.L. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33. No. 3. P. 1584-1600. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.02.012>.

11. Касперович В. К. Трубопровідний транспорт газу. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1999. 198 с.

12. Загальносоюзні норми технологічного проектування. Магістральні газопроводи : ОНТП 51-1-85. Частина 1. Газопроводи, 1986. 221 с.

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

14. ДСТУ EN ISO 6976:2020. Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу. [Чинний від 2021-10-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 56 с.

References

1. Hrupa Naftohaz [Elektronnyi resurs]: Hrupa Naftohaz na 12 % zbilshyla vydobutok hazu v I kvartali 2024-ho porivniano z analogichnym periodom mynuloho roku. URL: <https://www.naftogaz.com/news/naftogaz-group-increased-gas-production-by-12>. [in Ukrainian].

2. Ksenych A. I. Rozrakhunok hazovykh merezh z vykorystanniam formuly Kolbruka. *Naftohazova enerhetyka*. 2007. No 4(5). P. 81-85. [in Ukrainian].

3. DBN V.2.5-20:2018. Hazopostachannia. [Chynnyi vid 2019-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2019. 113 p. [in Ukrainian].

4. Kodeks hazorozpodilnykh mrezh. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> (data zvernennia: 01.10.2024). [in Ukrainian].
5. Serediuk M. D. Rozrakhunok koefitsiienta hidravlichnoho oporu v hazovykh mrezhakh nasele-nykh punktiv. Mizhnarodnyi naukovyi 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). [in Ukrainian].
6. Serediuk M. D., Velykyi S. V. Analiz metodiv vyznachennia hazodynamichnoi enerh-?vytratnosti hazovykh mrezh naselenykh punktiv. *Naftohazova enerhetyka*, 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].
7. Ksenych A. I., Serediuk M. D. Urakh-?vannia vplyvu profilu trasy na rezultaty hidravlichnykh rozrakhunkiv hazovykh mrezh nyzkoho tysku. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh ta hazovykh rodovyshch*. 2010. No 1(34). P. 138-143. [in Ukrainian].
8. Serediuk M. D., Ksenych A. I. Vykor-?stannia barometrychnoi formuly dlia vrakhuva- nia vplyvu profilu trasy na rezultaty hidra-?lichnoho rozrakhunku hazovykh mrezh. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsi-?nalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2010. No 3(25). P. 97-101. [in Ukrainian].
9. Szoplik J. Changes in gas flow in the pipe- line depending on the network foundation in the area. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. Vol. 43. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.03.020>.
10. González A. H., Jesús Manuel de la Cruz, De Andrés–Toro B., Risco–Martín J.L. Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network. *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33. No. 3. P. 1584–1600. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.02.012>.
11. Kasperovych V. K. Truboprovodnyi transport hazu. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH.1999. 198 p. [in Ukrainian].
12. Obschesoyuznyie normyi tehnologi- cheskogo proektirovaniya. Magistralnyie truboprovodyi. Chast 1. Gazoprovodyi: ONTP 51- 1-85. VNIIEgazprom, 1986. [in Russian]
13. Serediuk M. D. Proiektuvannia ta ekspluatatsiia hazovykh mrezh: navch. posib. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2022. 144 p. [in Ukrainian].
14. DSTU EN ISO 6976:2020. Pryrodnyi haz. Obchyslennia teploty zghoriannia, hustyny, vidnosnoi hustyny ta chysla Vobbe na osnovi komponentnoho skladu. [Chynnyi vid 2021-10-01]. Vyd. ofits. Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2021. 56 p. [in Ukrainian].