

ВИКОРИСТАННЯ БАРОМЕТРИЧНОЇ ФОРМУЛИ ДЛЯ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПРОФІЛЮ ТРАСИ НА РЕЗУЛЬТАТИ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

М.Д. Середюк, А.І. Ксенич

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

Обґрунтована доцільність використання барометричної формули з метою врахування профілю траси при гідравлічних розрахунках газових мереж низького тиску. Одержані аналітичні залежності ступеня уточнення гідростатичного перепаду тиску від різниці геодезичних позначок кінців газопроводу та середньої температури газу.

Ключові слова: газові мережі низького тиску, профіль траси, гідравлічний розрахунок, барометрична формула.

Обоснована целесообразность использования барометрической формулы с целью учета профиля трассы при гидравлических расчетах газовых сетей низкого давления. Получены аналитические зависимости степени уточнения гидростатического перепада давления от разности геодезических высот конечных точек газопровода и средней температуры газа.

Ключевые слова: газовые сети низкого давления, профиль трассы, гидравлический расчет, барометрическая формула.

Suitability of using the barometric formula to account for the influence of the profile trace for hydraulic calculations of gas networks of low pressure has been substantiated. The analytic dependence of degree correction of the hydrostatic pressure drop on the difference of geodetic heights of endpoints of pipeline and the average temperature of the gas has been obtained.

Keywords: gas networks, coefficient of hydraulic resistance, steel pipe, polyethylene pipe, surface roughness, loss of energy.

В Україні не припиняється розвиток та реконструкція систем газопостачання населених пунктів на базі природних газів. Насамперед, це стосується систем газопостачання сільських населених пунктів, проектування та експлуатація яких має ряд особливостей. Значна кількість сільських населених пунктів розміщена на територіях зі складними топографічними умовами, що спричинює різноманітність профілю траси газових мереж систем газопостачання.

Як зазначалось у роботах [1, 2], чинні нормативні документи не передбачають урахування впливу профілю траси газопроводів у процесі виконання гідравлічних розрахунків зовнішніх газових мереж високого, середнього і низького тиску. У роботі [2] нами доведено, що нехтування впливом профілю траси може призвести до значних похибок під час проектних та експлуатаційних розрахунків газових мереж низького тиску. Пропонуємо методику, яка уможливило виконання гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску кільцевої та розгалуженої структури з урахуванням впливу профілю траси. При цьому для врахування впливу профілю траси на гідравлічний розрахунок ділянки газової мережі використана спрощена лінійна залежність зміни гідростатичного тиску газу від висоти над рівнем моря. Метою досліджень, що наведені нижче, є удосконалення методики урахування впливу особливостей профілю траси на результати гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску шляхом використання більш точної фор-

мули, яка описує зміну тиску газу у полі сили тяжіння.

Удосконалення методології гідравлічних розрахунків газових мереж сприяє підвищенню якості проектування та ефективності експлуатації систем газопостачання населених пунктів, що визначає важливість та актуальність наведених у даній роботі досліджень.

У роботі [2] для врахування впливу профілю траси на гідравлічні параметри газових мереж використана спрощена лінійна залежність зміни гідростатичного тиску газу від різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки

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

де: g – прискорення сили тяжіння;

h_n – геодезична позначка початку ділянки газопроводу;

h_k – геодезична позначка кінця ділянки газопроводу;

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

ρ_n – густина газу за нормальних умов.

Залежність тиску газу від висоти можна описати більш точно барометричною формулою. Ця залежність зумовлена дією поля тяжіння Землі і тепловим рухом молекул газу (повітря). Для ідеального газу за сталої температури для однорідного поля тяжіння Землі барометрична формула має такий вигляд:

$$P = P_o \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right), \quad (2)$$

де: P_o – абсолютний тиск газу на нульовому рівні (біля поверхні Землі, на рівні моря тощо);

P – абсолютний тиск газу на висоті h ;

m – маса молекули;

k – стала Больцмана;

T – термодинамічна температура газу.

Стала Больцмана – це фізична стала, що визначає зв'язок між температурою та енергією. Її значення у системі SI дорівнює

$$k = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}. \quad (3)$$

Виражаємо масу молекули ідеального газу через молярну масу і кількість молекул, що міститься в одному кіломолі будь-якого газу

$$m = \frac{\mu}{N}, \quad (4)$$

де: μ – молярна маса газу;

N – кількість молекул, що міститься в одному кіломолі будь-якого газу,

$$N = 6,022045 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}. \quad (5)$$

Формула (2) з урахуванням (3)-(5) набуває вигляду

$$P = P_o \exp\left(-\frac{\mu gh}{kNT}\right). \quad (6)$$

Після введення у формулу (5) газової сталої за умовою

$$R = \frac{kN}{\mu} \quad (7)$$

барометрична формула для ідеального газу набуває вигляду

$$P = P_o \exp\left(-\frac{gh}{RT}\right). \quad (8)$$

Для реального газу барометрична формула може бути записана так:

$$P = P_o \exp\left(-\frac{gh}{zRT}\right). \quad (9)$$

де z – середнє значення коефіцієнта стисливості газу.

Використаємо барометричну формулу (9) для врахування впливу профілю траси під час гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску.

Для вертикальної чи нахиленої ділянки газових мереж зміна тиску природного газу, спричинена дією сили тяжіння Землі, може бути обчислена за формулою

$$P_{k_2} = P_n \exp\left[-\frac{g(h_k - h_n)}{z_2 RT}\right], \quad (10)$$

де: P_n – абсолютний тиск газу на початку ділянки газових мереж;

P_k – абсолютний тиск газу у кінці ділянки газових мереж;

T – середня температура газу на ділянці газових мереж;

z_2 – середнє значення коефіцієнта стисливості природного газу на ділянці газових мереж.

Аналогічно описуємо зміну атмосферного тиску у кінці ділянки газових мереж

$$P_{k_{нов}} = P_{n_0} \exp\left[-\frac{g(h_k - h_n)}{z_{нов} R_{нов} T}\right], \quad (11)$$

де: P_{n_0} – барометричний тиск повітря на початку ділянки, за відсутності інших даних слід приймати $P_{n_0} = 101325$ Па;

$R_{нов}$ – газова стала повітря, $R_{нов} = 287,1$ Дж/(кг·К);

$z_{нов}$ – коефіцієнт стисливості повітря, приймаємо $z_{нов} = 1$.

Зміна гідростатичного тиску, спричинена значною різницею газових сталей природного газу і повітря, може бути визначена за формулою

$$\Delta P_{2c} = (P_{n_2} - P_{n_{нов}}) - (P_{k_2} - P_{k_{нов}}) \quad (12)$$

або з урахуванням виразів (10) і (11)

$$\Delta P_{2c_0} = (P_{n_2} - P_{n_{нов}}) - P_n \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{z_2 RT}\right] + P_{n_0} \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{R_{нов} T}\right]. \quad (13)$$

Уточнена формула (13) замість спрощеної формули (1) може бути використана для врахування впливу профілю траси при гідравлічних розрахунках газових мереж низького тиску населених пунктів.

Дослідимо вплив різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки газопроводу, а також середньої температури газу на ділянці на величину уточнення зміни гідростатичного тиску за рахунок використання замість спрощеної формули запропонованої нами уточненої формули (13).

Для цього розробляємо комп'ютерну програму BarF, яка дає можливість для ділянки газопроводу з довільною різницею геодезичних позначок початку і кінця у разі використання природного газу із заданим складом компонентів визначити зміну гідростатичного напору за спрощеною і запропонованою методикою.

У процесі комп'ютерного моделювання різницю геодезичних позначок початку і кінця ділянки газопроводу приймаємо у діапазоні від 10 м до 500 м. Середню температуру газу на ділянці газопроводу змінюємо від 0°C до 30°C.

Приймаємо абсолютний тиск на початку модельного газопроводу рівним максимальному значенню для газових мереж низького тиску $P_{n_2} = 104325$ Па.

Для визначення доцільності застосування більш точних, але у той же час більш складних розрахункових формул, введемо поняття відносного уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці газопроводу низького тиску за умовою

$$\delta = \frac{(\Delta P_{2c_0} - \Delta P_{2c})}{\Delta P_{2c}} 100, \quad (14)$$

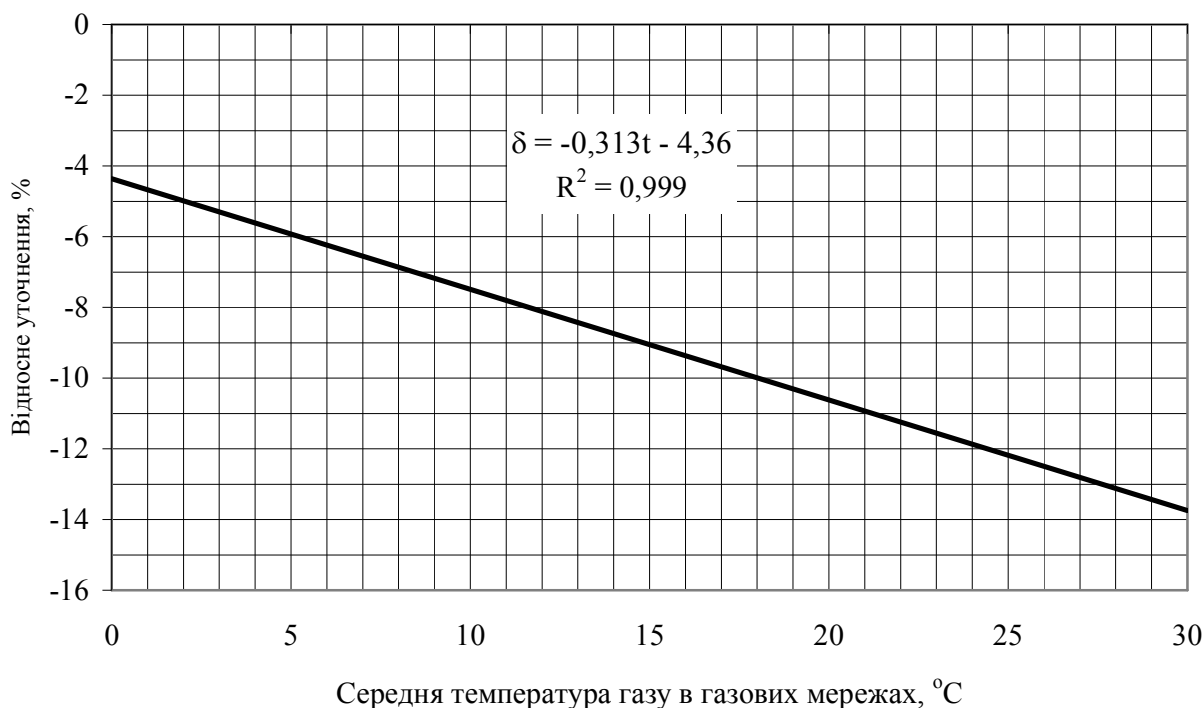


Рисунок 1 – Залежність відносного уточнення гідростатичного перепаду тиску від температури газу (різниця геодезичних позначок кінців ділянки 10 м)

де: ΔP_{zcb} – зміна гідростатичного тиску газу на ділянці, знайдена за барометричною формулою (13);

ΔP_{zc} – зміна гідростатичного тиску газу на ділянці, визначена за спрощеною формулою.

У результаті багатоваріантних розрахунків одержуємо графічні залежності відносного уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці як функцію середньої температури газу для різних значень різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки. Приклад однієї із графічних залежностей наведений на рисунку 1.

Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання зазначених графічних залежностей. У результаті одержуємо такі аналітичні залежності відносного уточнення зміни гідростатичного тиску у відсотках від середньої температури газу на ділянці газової мережі низького тиску t (°C):

$$\text{для } h_k - h_n = 10 \text{ м} \quad \delta = -0,313 \cdot t - 4,36;$$

$$\text{для } h_k - h_n = 50 \text{ м} \quad \delta = -0,310 \cdot t - 4,74;$$

$$\text{для } h_k - h_n = 100 \text{ м} \quad \delta = -0,308 \cdot t - 5,22;$$

$$\text{для } h_k - h_n = 200 \text{ м} \quad \delta = -0,302 \cdot t - 6,16;$$

$$\text{для } h_k - h_n = 300 \text{ м} \quad \delta = -0,296 \cdot t - 7,10;$$

$$\text{для } h_k - h_n = 400 \text{ м} \quad \delta = -0,290 \cdot t - 8,02;$$

$$\text{для } h_k - h_n = 500 \text{ м} \quad \delta = -0,285 \cdot t - 8,93.$$

Результати дослідження засвідчили, що відносне уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску можна описати функцією різниці геодезичних

позначок початку і кінця ділянки та середньої температури газу

$$\delta = A \cdot t + B, \quad (15)$$

де A, B – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежать від різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки газової мережі низького тиску.

Використовуючи Microsoft Excel, будемо графічні залежності коефіцієнтів A і B від різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки газової мережі низького тиску (рис. 2 і 3).

Виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей. У результаті одержуємо такі аналітичні вирази для коефіцієнтів моделі

$$A = -5,78 \cdot 10^{-5} (h_n - h_k) - 0,313; \quad (16)$$

$$B = 9,336 \cdot 10^{-3} (h_n - h_k) - 4,280. \quad (17)$$

Дослідження засвідчили, що похибка результатів у разі використання математичних моделей (16) і (17) не перевищує 1%.

За наявності таких точних моделей відпадає необхідність закладати в обчислювальні алгоритми газових мереж низького тиску досить складну барометричну формулу (13). Розрахунок можна вести за спрощеною формулою, увівши до неї коригувальний коефіцієнт, що включає відносне уточнення зміни гідростатичного тиску, розраховане за формулами (16)-(17).

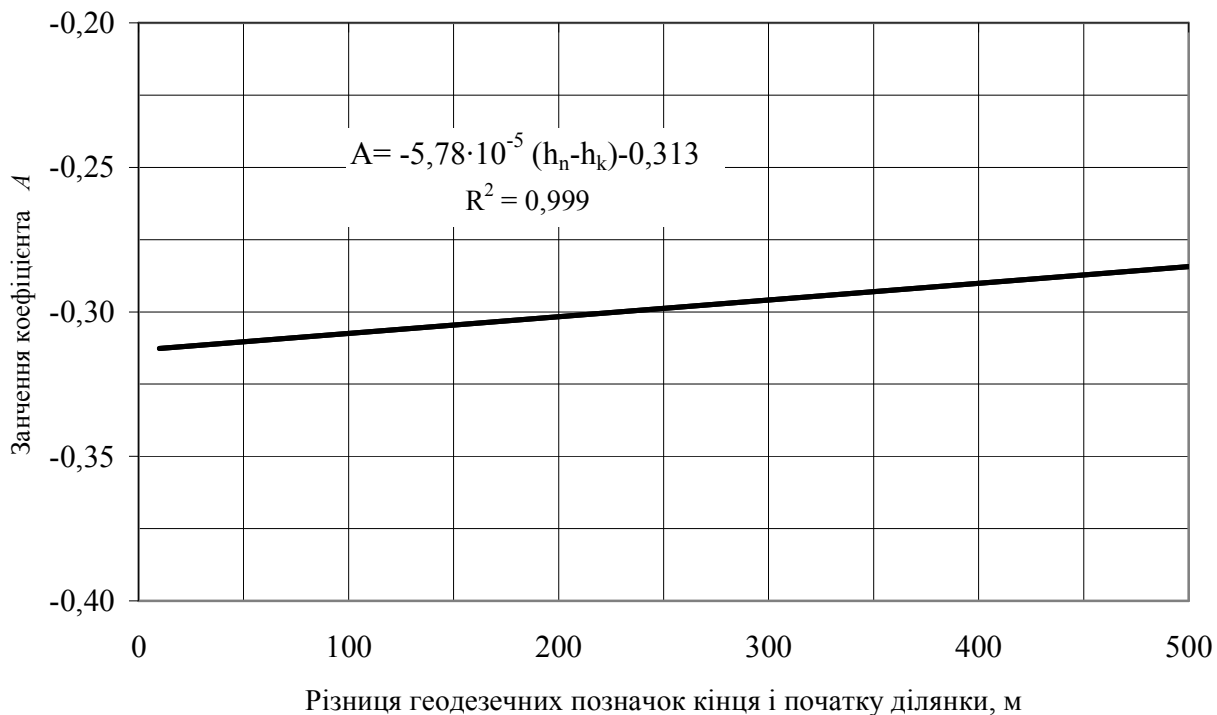


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта моделі А від різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки низького тиску

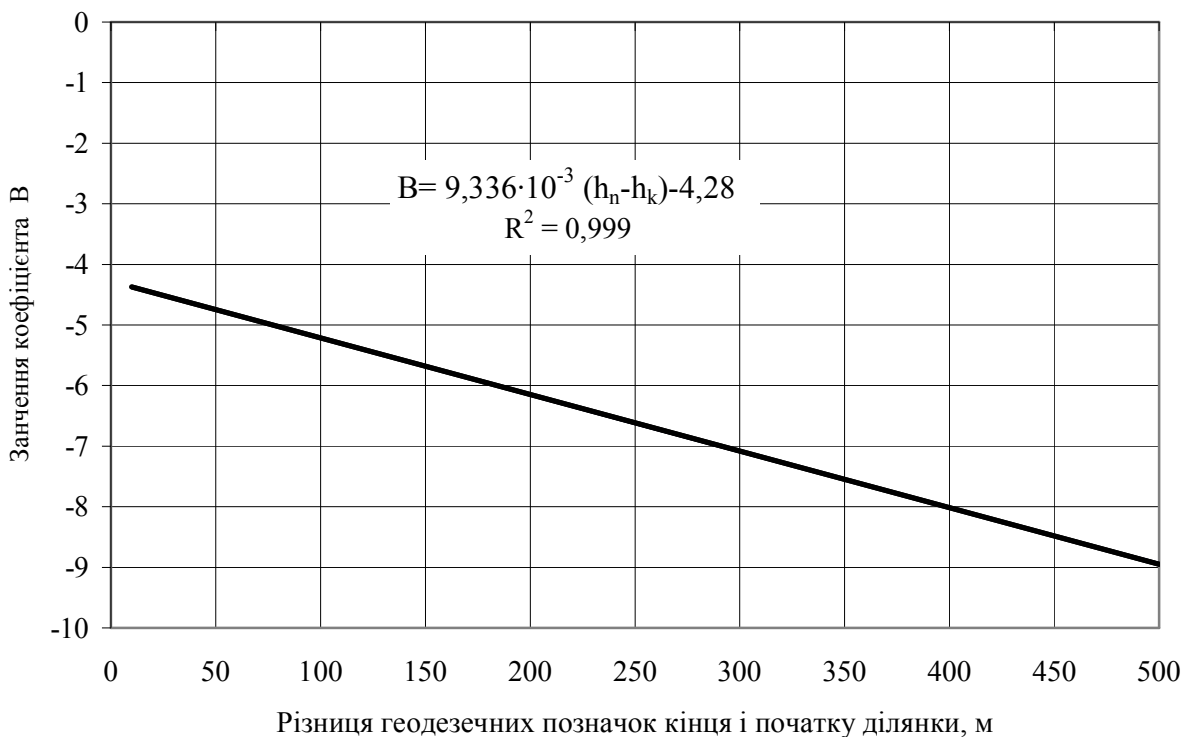


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнта моделі В від різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки низького тиску

Уточнене значення зміни гідростатичного тиску на ділянці газових мереж низького тиску з точністю до 1% буде дорівнювати

$$\Delta P_{z\sigma} = (1 + \delta) \cdot \Delta P_{z\sigma} \cdot \quad (18)$$

Покажемо приклад використання запропонованих розрахункових формул. Нехай необхідно визначити зміну гідростатичного тиску на ділянці газопроводу низького тиску за таких умов: геодезична позначка початку ділянки $h_n = 42$ м, геодезична позначка кінця ділянки $h_k = 105$ м, газова стала $R = 511,5$ Дж/(кг·К), густина газу за нормальних умов $\rho_n = 0,7256$ кг/м³, середня температура газу на ділянці 12°C.

За спрощеною формулою (1) визначимо зміну гідростатичного тиску газу на ділянці газової мережі низького тиску

$$\Delta P_{z\sigma} = 9,81 \cdot (42 - 105) \cdot (1,293 - 0,7256) = -350,7 \text{ Па}$$

За формулами (16) і (17) обчислюємо значення коефіцієнтів математичної моделі

$$A = -5,78 \cdot 10^{-5} (42 - 105) - 0,313 = -0,309 ;$$

$$B = 9,336 \cdot 10^{-3} (42 - 105) - 4,280 = -4,868 .$$

За формулою (15) знаходимо значення відносного уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску

$$\delta = -0,309 \cdot 12 - 4,868 = -8,6 \text{ \%}$$

За формулою (18) обчислюємо уточнене значення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску

$$\Delta P_{z\sigma} = -(1 - 0,086) \cdot 350,7 = -320,5 \text{ Па}$$

Одержане значення практично збігається зі значенням зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску, обчисленим за барометричною формулою (13) $\Delta P_{z\sigma} = -320,2$ Па. Це свідчить про адекватність запропонованих математичних моделей і можливість їх застосування проєктних та експлуатаційних розрахунках газових мереж населених пунктів.

У результаті досліджень доведено, що використання барометричної формули замість спрощеної лінійної залежності для врахування профілю траси дає можливість на 10-15 % уточнити результати гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску, що підвищує ефективність проєктування та експлуатації систем газопостачання населених пунктів.

Література

1 Газопостачання: ДБН В 2 5. – 20 – 2001. – [Чинний від 2001-08-01]. – К.: Держбуд України, 2001. – 286 с. – [Державні будівельні норми України].

2 Ксенич А.І. Урахування впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску / А.І. Ксенич, М.Д. Середюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 1(34). – С. 138-143.

Стаття поступила в редакційну колегію
29.06.10

Рекомендована до друку професором
В. Я. Грудзом