

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

<sup>1</sup>М. Д. Середюк\*, <sup>2</sup>С. В. Великий

<sup>1</sup> ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727139, e-mail: [maria.serediuk@nung.edu.ua](mailto:maria.serediuk@nung.edu.ua)

<sup>2</sup> РГК, Івано-Франківськгаз; 76010, м. Івано-Франківськ, вул. Ленкавського, 20; тел. (0342) 586280, e-mail: [Sergii.Velykyi@ifgas.com.ua](mailto:Sergii.Velykyi@ifgas.com.ua)

Останніми роками у вітчизняну практику проєктування та експлуатації систем газопостачання населених пунктів широко впроваджуються сучасні програмні комплекси, прикладом яких є програмний комплекс (ПК) SIMONE. Це робить необхідним і своєчасним вирішення питання відповідності теоретичних положень і результатів, одержаних з використанням зазначеного комплексу, розрахунковій базі та рішенням, отриманих із застосуванням методів, передбачених вітчизняними нормативними документами. Робота присвячена вирішенню зазначеного завдання стосовно газових мереж низького, середнього та високого тиску із сталевих та поліетиленових труб для перекачування як природного газу, так і 20 % газоводневої суміші. Шляхом математичного моделювання встановлено вплив робочого тиску і режиму руху транспортованого середовища на величину газодинамічної енерговитратності газопроводу за двома методами розрахунку. Досліджено вплив матеріалу труб (сталевих і поліетиленових) та фізико-хімічних властивостей транспортованого середовища (природного газу і газоводневої суміші) на величину газодинамічної енерговитратності газопроводу за двома методами розрахунку. Одержано графічні та аналітичні залежності різниці тиску у кінці газопроводу і різниці енергетичного параметра за двома методами розрахунку від числа Рейнольдса. Встановлено, що найбільша різниця газодинамічної енерговитратності (до 160 % за двома методами розрахунку) відповідає мало завантаженим газовим мережам низького тиску, що працюють у ламінарному та перехідному режимах руху природного газу і газоводневої суміші. У всіх інших випадках за застосування ПК SIMONE виявлено завищення або заниження величини газодинамічної енерговитратності до 5 %.

Ключові слова: газові мережі низького, середнього і високого тиску, сталеві і поліетиленові труби, гідравлічний нахил, енергетичний параметр, програмний комплекс, формула Хофера.

*In recent years, modern software systems, such as the SIMONE software complex, have been widely introduced into the domestic practice of designing and operating gas supply systems for populated points. This makes it necessary and timely to resolve the issue of theoretical provisions and results compliance obtained using the above complex with the calculation base and solutions obtained using the methods provided by domestic regulatory documents. The paper is devoted to solving the problem of low, medium, and high-pressure gas networks made of steel and polyethylene pipes for pumping both natural gas and 20 % of a gas-hydrogen mixture. Through mathematical modeling, the influence of the operating pressure and the movement mode of the transported medium on the value of the gas-dynamic energy consumption of the gas pipeline was determined using two calculation methods. The effect of the pipe material (steel and polyethylene) and the physico-chemical properties of the transported medium (natural gas and gas-hydrogen mixture) on the value of gas-dynamic energy consumption of a gas pipeline using two calculation methods is investigated. The graphical and analytical dependences of the pressure difference at the end of the gas pipeline and the energy parameter difference by the two calculation methods on the Reynolds number are obtained. It is established that the largest difference in gas-dynamic energy consumption (up to 160 % according to the two calculation methods) corresponds to lightly loaded low-pressure gas networks operating in laminar and transient modes of natural gas and gas-hydrogen mixture flow. In all other cases, an overestimation or underestimation of the value of gas-dynamic energy consumption by up to 5% was detected using PC SIMONE.*

Key words: low, medium and high-pressure gas networks, steel and polyethylene pipes, hydraulic slope, energy parameter, software complex, Hofer's formula.

### Вступ

Останнім часом у вітчизняній і зарубіжній науковій літературі та засобах масової інформації багато уваги приділяють питанням модернізації (так званому редизайну) розподільних

газових мереж, що пов'язано з переходом від застосування природного газу до альтернативних енергоносіїв, насамперед газоводневих сумішей. Більшість літературних джерел стосуються питань забезпечення герметичності газо-

вих мереж з різним робочим тиском і різним матеріалом труб, можливості застосування наявних конструкцій газорегуляторних об'єктів для редукування тиску газоводневих сумішей, особливостям експлуатації газового обладнання у житлових будівлях тощо [1, 2].

Важливе значення відіграють газодинамічні розрахунки. Так, під час проектування та модернізації газорозподільних газопроводів вони дають можливість обґрунтувати структуру системи газопостачання та здійснити вибір необхідних діаметрів ділянок, які забезпечують подавання споживачам певної кількості енергії за відповідного тиску енергоносія. У ході експлуатації системи газопостачання населених пунктів газодинамічні розрахунки дають можливість прогнозувати розподіл тиску в складній газорозподільній системі у випадку зміни типу енергоносія та обсягів споживання [3–5].

### **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**

Серед значної кількості публікацій з перспектив застосування газоводневих сумішей як альтернативи природному газу, методам газодинамічних розрахунків модернізованих газових мереж присвячено невелику кількість публікацій [6–9].

У роботі [7] шляхом математичного моделювання знайдено закономірності зміни фізико-хімічних властивостей газоводневих сумішей з об'ємною часткою водню від нуля до 100 %. Встановлено закономірності газодинамічних розрахунків сталевих газових мереж низького тиску у разі транспортування газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню при збереженні витрат та енергоємності елементів системи газопостачання, характерних для транспортування природного газу.

Робота [8] висвітлює результати аналогічних досліджень закономірностей газодинамічних процесів у разі транспортування газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню в газових мережах середнього та високого тиску при збереженні витрат та енергоємності системи газопостачання, що мають місце для перекачування природного газу. Одержано прогнозні показники зміни енергетичного параметра газових мереж залежно від об'ємної частки водню у газоводневій суміші.

Оскільки газодинамічний розрахунок газових мереж житлових будинків має низку особливостей порівняно із розрахунком зовнішніх газових мереж, то роботу [9] присвячено дослідженню впливу об'ємної концентрації водню на газодинамічну енерговитратність внутрішніх

газових мереж. Встановлено особливості газодинамічних розрахунків внутрішніх газових мереж при застосуванні замість природного газу газоводневих сумішей з об'ємною часткою до 20 % водню включно. Одержано залежності, що дають змогу оцінити зростання втрат тиску від тертя та гідростатичного тиску у внутрішніх газопроводах за збільшених витрат, що компенсують зменшення теплоти згоряння газоводневої суміші.

У зазначених вище роботах газодинамічні розрахунки газових мереж різного тиску і призначення для випадку застосування як природного газу, так і газоводневих сумішей виконували виключно за методом, що наведений у чинному нормативному документі ДБН В.2.5–20–2018 «ГАЗОПОСТАЧАННЯ» [3]. У той же час розроблені інші, більш сучасні методи виконання газодинамічних розрахунків складних газотранспортних систем. Результати застосування зазначених методів для розрахунку газових мереж населених пунктів за транспортування ними газоводневих сумішей не знайшли поки що відображення у роботах закордонних і вітчизняних вчених.

### **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Метод газодинамічного розрахунку газових мереж, наведений у [3], використовується проєктантами та працівниками експлуатаційних служб системи газопостачання кілька десятків років. Цей метод пропонувався попередніми варіантами зазначеного документа. Тому більшість систем газопостачання населених пунктів України свого часу було запроєктовано відповідно до вимог зазначеного документа [4–6].

Очевидно, що всі роботи, пов'язані з оцінюванням газодинамічних параметрів при модернізації чи редизайні газових мереж в Україні, повинні базуватись на теоретичних засадах і методах розрахунку, що не суперечать нормативному методу, наведеному в [3].

Сьогодні у вітчизняну практику проєктування та експлуатації систем газопостачання успішно впроваджуються сучасні програмні комплекси для математичного моделювання газодинаміки газопровідних систем складної конфігурації. Прикладом такого ресурсу є програмний комплекс (ПК) SIMONE – європейський програмний інструмент для моделювання та оптимізації магістральних і розподільних газопроводів. У цьому зв'язку важливо встановити наскільки результати, одержані з використанням зазначеного комплексу, відповідають

проектним рішенням, отриманим із використанням вітчизняної нормативної методики [3]. Робота присвячена вирішенню зазначеного завдання стосовно газових мереж низького, середнього та високого тиску із сталевих та поліетиленових труб.

**Мета та завдання роботи** – порівняння величин газодинамічної енерговитратності газових мереж населених пунктів, визначених за нормативним методом, і методом, що реалізований в ПК SIMONE.

Мета досліджень реалізується шляхом вирішення таких завдань:

– встановити вплив робочого тиску і режиму руху транспортованого середовища на величину газодинамічної енерговитратності газопровода за двома методами розрахунку;

– виявити вплив матеріалу труб (сталевих і поліетиленових) на величину газодинамічної енерговитратності газопроводу за двома методами розрахунку;

– встановити вплив фізико-хімічних властивостей транспортованого середовища (природного газу і газоводневої суміші) на різницю газодинамічної енерговитратності газопроводів за двома методами газодинамічного розрахунку.

#### Висвітлення основного матеріалу дослідження

Відповідно до вимог нормативного документу [3], газодинамічний розрахунок газових мереж низького тиску за ustalених режимів руху газу передбачає визначення втрат тиску від тертя залежно від режиму руху газу. Режим руху газу характеризується значенням числа Рейнольдса. Розрахункові формули для визначення втрат тиску за ламінарного, перехідного і турбулентного режиму руху газу детально охарактеризовані у роботах [7–9]. Відповідно до вимог [3], при проведенні обчислень фізичні властивості транспортованого газу і його витрата у газопроводі повинна відповідати нормальним фізичним умовам (абсолютному тиску 101325 Па і температурі 0 °C). Величину абсолютної еквівалентної шорсткості приймають для нових сталевих газових труб  $k_e = 0,01$  см, для поліетиленових труб  $k_e = 0,002$  см.

Згідно з нормативним документом [3], при розрахунку газових мереж низького тиску передбачають застосування математичної моделі газопроводу з безперервним і рівномірним відбором газу. Розрахункові витрати газу на ділянках газової мережі визначають за формулою

$$Q_p = Q_T + 0,5Q_{ш}, \quad (1)$$

де  $Q_T$  – транзитна витрата газу на ділянці газової мережі;

$Q_{ш}$  – шляхова витрата газу на ділянці газової мережі.

На відміну від нормативного методу, обчислювальний алгоритм газодинамічного розрахунку ПК SIMONE передбачає розв'язування числовими способами системи таких базових газодинамічних рівнянь:

рівняння нерозривності потоку газу

$$\frac{\partial M}{\partial x} + S \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

де  $M$  – масова витрата газу;

$x$  – лінійна координата;

$S$  – площа перерізу труби;

$\rho$  – густина газу;

$t$  – час;

рівняння імпульсу

$$\frac{1}{S} \frac{\partial M}{\partial t} - 2w \frac{\partial \rho}{\partial t} + w^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + g\rho \frac{dh}{dx} + f_R = 0, \quad (3)$$

де  $w$  – осереднена для перерізу потоку газу швидкість руху;

$P$  – абсолютний тиск газу;

$h$  – геофізична висота;

$g$  – прискорення сили тяжіння;

$f_R$  – втрати тиску від тертя на одиниці довжини трубопроводу;

$$f_R = \lambda \frac{|w|w}{2D} \rho, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$D$  – внутрішній діаметр трубопроводу.

Коефіцієнт гідравлічного опору газових мереж незалежно від режиму руху газу визначають за формулою Колбрука-Уайта або за її апроксимацією – формулою Хофера

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

де  $Re$  – число Рейнольдса;

$$Re = \frac{4M}{\pi \mu D} = \frac{4Q}{\pi \nu D}, \quad (6)$$

$Q$  – об'ємна витрата газу;

$\nu$  – кінематична в'язкість газу.

Обчислювальний алгоритм газодинамічного розрахунку газопроводів будь-якого тиску, наведений у ПК SIMONE, передбачає застосування виключно математичної моделі газотранспортної системи із зосередженим відбором газу.

Шляхом математичного моделювання виконано порівняння результатів розрахунку га-

зодинамічної енерговитратності газових мереж за двома зазначеними вище методами. Дослідження проведено окремо для поліетиленових і сталевих труб низького, середнього і високого тиску за перекачування природного газу та газоводневої суміші, що містить 20 % за об'ємом водню. Використання зазначеної суміші, як альтернативи природному газу, є найбільш ймовірним в найближчі роки [1, 2, 7–9].

Як модельний сталевий газопровід незалежно від тиску вибрано найбільш вживану трубу діаметром 108x3 мм. Для модельного поліетиленового газопроводу низького і середнього тиску використано трубу діаметром 110x6,3 мм, для високого тиску – 110x10 мм. Довжина модельних газопроводів становить 1000 м.

Дослідження проведено для природного газу, що транспортувався газовими мережами Івано-Франківської області в 2021 році, а також для газоводневої суміші, що містить 20 % водню за об'ємом.

Фізико-хімічні властивості енергоносіїв за нормальних фізичних умов, розраховані за методикою, наведеною у [10], такі: для природного газу густина  $\rho_n = 0,778 \text{ кг/м}^3$ , кінематична в'язкість  $\nu_n = 13,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; для газоводневої суміші, що містить 20 % водню,  $\rho_n = 0,640 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu_n = 15,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

При дослідженнях газодинамічної енерговитратності газових мереж низького тиску приймали, що надлишковий тиск на початку модельного газопроводу становить  $P_1 = 3000 \text{ Па}$ . У модельному газопроводі створювали певну витрату газу і за двома методами визначали кінцевий надлишковий тиск  $P_k$ . Досліджувався весь можливий діапазон робочої витрати енергоносія у газопроводі. За малих витрат режим руху енергоносія був ламінарний, із збільшенням витрати – перехідний, і далі – турбулентний. Знаходили відносну різницю результатів розрахунку тиску енергоносія в кінці газопроводу за двома методами

$$\delta_{P_k} = \frac{(P_{k_s} - P_{k_n})}{P_{k_n}} 100, \quad (7)$$

де  $P_{k_s}$  – кінцевий надлишковий тиск енергоносія, розрахований за методом ПК SIMONE;

$P_{k_n}$  – кінцевий надлишковий тиск енергоносія за нормативним методом [3].

За результатами обчислень одержано такі графічні та аналітичні залежності відносної різниці значень кінцевого тиску енергоносія залежно від числа Рейнольдса при застосуванні двох методів газодинамічного розрахунку для

ламінарного, перехідного та турбулентного режиму руху в сталевих газопроводах низького тиску (рис. 1–3).

Відповідно до результатів досліджень, за ламінарного режиму руху природного газу в сталевих газових мережах низького тиску застосування ПК SIMONE на (0–0,4) % залежно від числа Рейнольдса знижує значення кінцевого тиску, порівняно з обчисленим за нормативним методом. У випадку перекачування газоводневої суміші, що містить 20 % водню, застосування ПК SIMONE спричинить зниження кінцевого тиску на (0–0,5) % залежно від числа Рейнольдса (рис. 1).

Для перехідного режиму руху природного газу в сталевих газових мережах низького тиску відносна різниця значень кінцевого тиску за двома методиками газодинамічного розрахунку змінюється від мінус 0,4 % до нуля і залежить від числа Рейнольдса. У випадку перекачування газоводневої суміші, що містить 20 % водню, відносна різниця значень кінцевого тиску за двома методиками змінюється від мінус 0,5 % до нуля і залежить від числа Рейнольдса (рис. 2).

Як бачимо, за турбулентного режиму транспортування в сталевих газових мережах низького тиску застосування ПК SIMONE на (0–3) % завищує значення кінцевого тиску як для природного газу, так і для газоводневої суміші, що містить 20 % водню (рис. 3).

Аналогічні дослідження проведено для поліетиленових газових мереж низького тиску. Шляхом опрацювання графічних залежностей одержані такі аналітичні вирази, що прогнозують різницю значень кінцевого тиску енергоносія (%) від числа Рейнольдса при застосуванні двох методів газодинамічного розрахунку:

для ламінарного режиму руху природного газу

$$\delta_{P_k} = -2,196 \cdot 10^{-4} Re; \quad (8)$$

для ламінарного режиму руху газоводневої суміші з 20 % водню

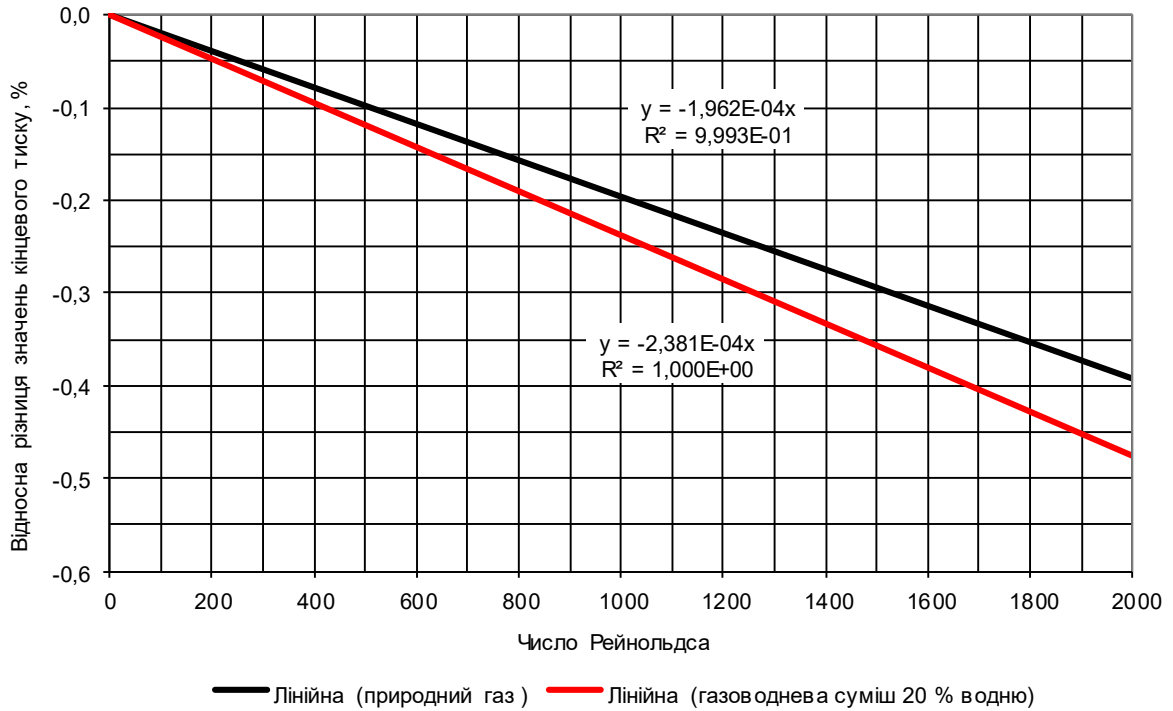
$$\delta_{P_k} = -2,607 \cdot 10^{-4} Re; \quad (9)$$

для перехідного режиму руху природного газу

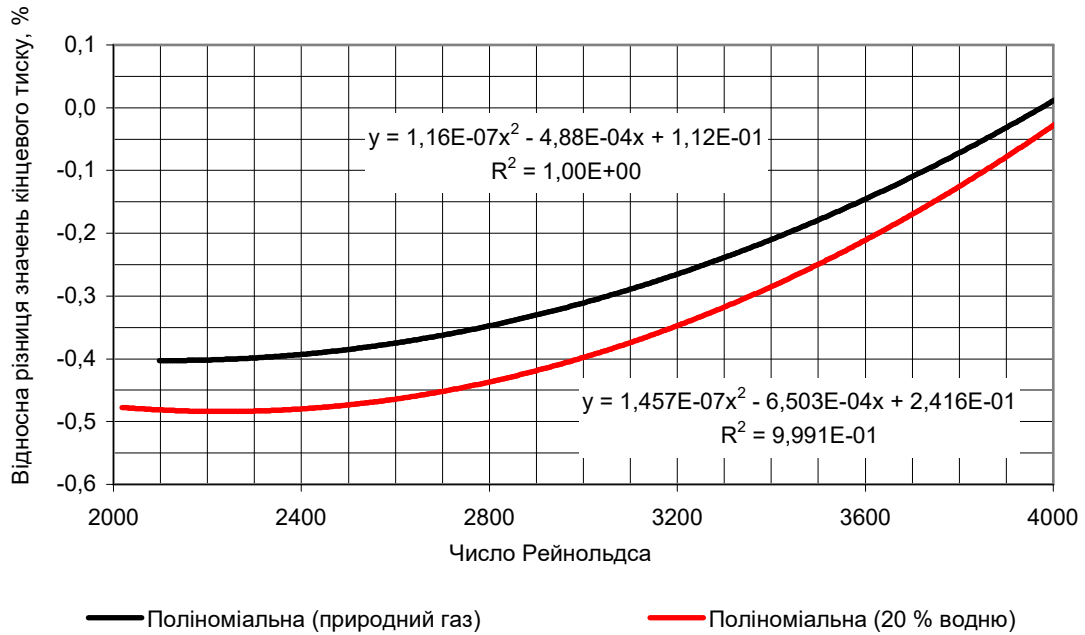
$$\delta_{P_k} = 1,394 \cdot 10^{-7} Re^2 - 5,950 \cdot 10^{-4} Re + 1,988 \cdot 10^{-1}; \quad (10)$$

для перехідного режиму руху газоводневої суміші з 20 % водню

$$\delta_{P_k} = 1,580 \cdot 10^{-7} Re^2 - 6,858 \cdot 10^{-4} Re + 2,122 \cdot 10^{-1}; \quad (11)$$



**Рисунок 1 – Відносна різниця значень надлишкового кінцевого тиску енергоносія залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для сталевих газопроводів низького тиску (ламінарний режим)**



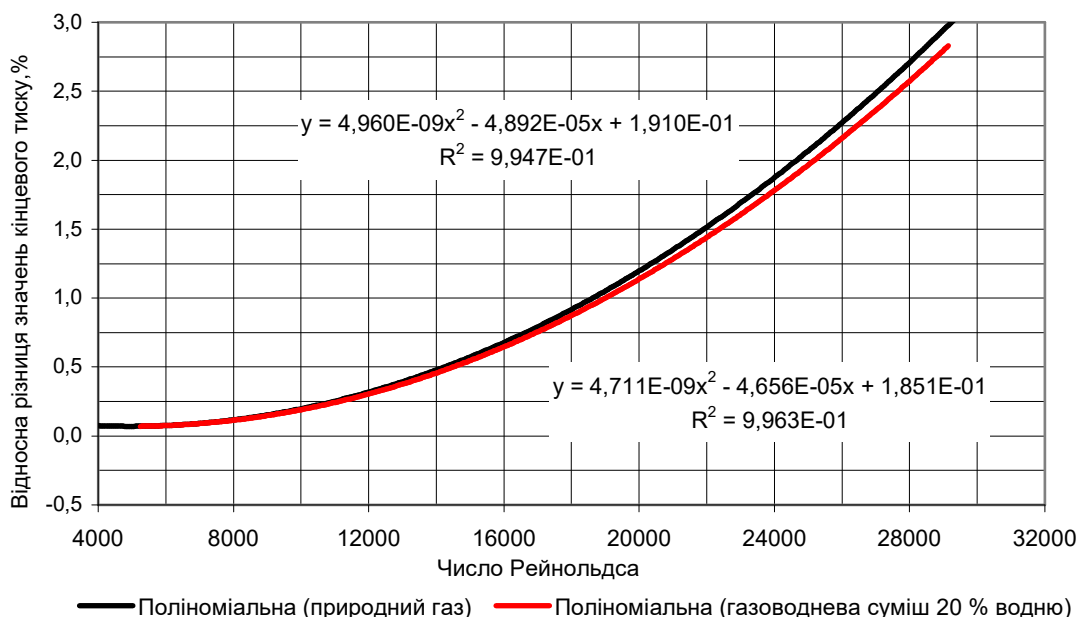
**Рисунок 2 – Відносна різниця значень надлишкового кінцевого тиску енергоносія залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для сталевих газопроводів низького тиску (перехідний режим)**

для турбулентного режиму руху природного газу

$$\delta_{P_k} = 8,173 \cdot 10^{-9} Re^2 - 8,211 \cdot 10^{-5} Re + 3,195 \cdot 10^{-1}; \quad (12)$$

для турбулентного режиму руху газоводневої суміші з 20 % водню

$$\delta_{P_k} = 7,990 \cdot 10^{-9} Re^2 - 7,774 \cdot 10^{-5} Re + 2,961 \cdot 10^{-1}. \quad (13)$$



**Рисунок 3 – Відносна різниця значень надлишкового кінцевого тиску енергоносія залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для сталевих газопроводів низького тиску (турбулентний режим)**

Вірогідність апроксимації одержаних математичних моделей (8)–(13) перевищує 99 %.

Порівняння методів визначення тиску газу у кінці газопроводу можна здійснювати за умови однакового початкового тиску. У системах газопостачання населених пунктів така умова часто не виконується. Тому газодинамічну енерговитратність газових мереж низького тиску будемо оцінювати за величиною енергетичного параметра – гідравлічного нахилу

$$I = \frac{(P_1 - P_k)}{l} \quad (14)$$

Зазначений енергетичний параметр десяти років успішно застосовується при проєктних та експлуатаційних розрахунках газових мереж низького тиску. Встановлено, що параметри газової мережі низького тиску близькі до оптимальних, якщо її елементи характеризуються приблизно однаковим значенням гідравлічного нахилу [4, 5].

Для співставлення газодинамічної енерговитратності газових мереж низького тиску за двох методів її визначення використано таку формулу:

$$\delta_I = \frac{(I_S - I_H)}{I_H} 100, \quad (15)$$

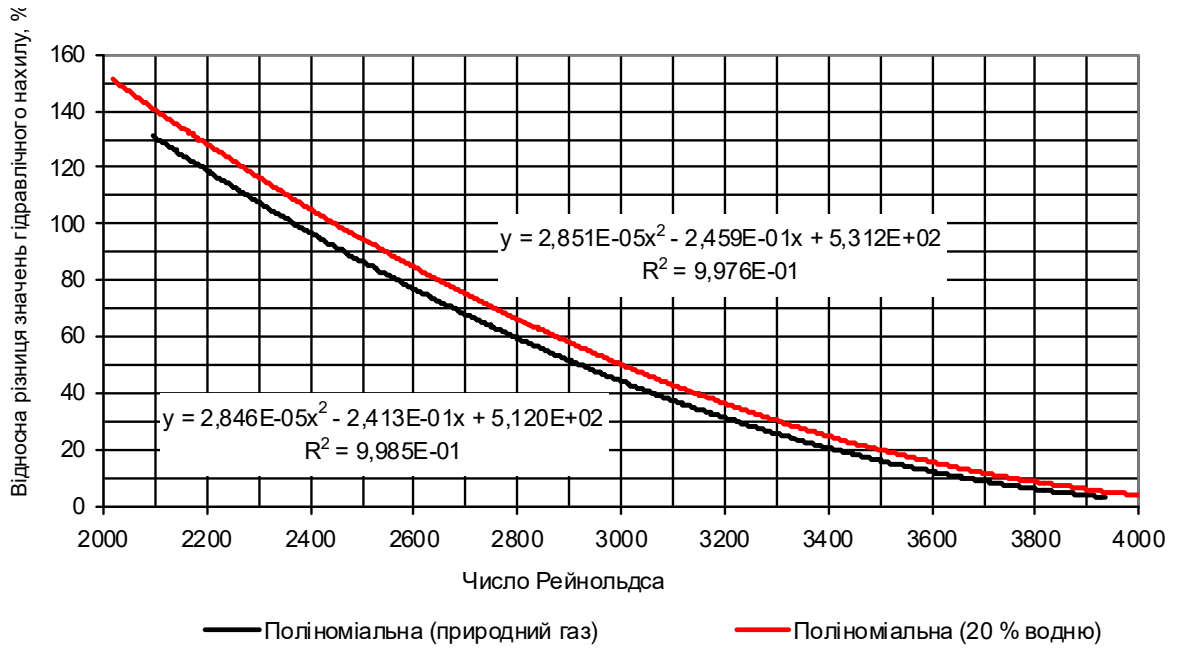
де  $I_S$  – результати обчислення енергетичного параметра газопроводу низького тиску за методом ПК SIMONE;  $I_H$  – результати обчислення енергетичного параметра газопроводу низького тиску за методом [3].

Як показали результати досліджень, за ламінарного режиму руху природного газу в сталевих газових мережах низького тиску застосування ПК SIMONE на (141–145) % завищує значення гідравлічного нахилу порівняно із розрахованим за нормативною методикою. У випадку перекачування газоводневої суміші, що містить 20 % водню, застосування ПК SIMONE спричинить завищення гідравлічного нахилу на (151–156) %. Результати аналогічних досліджень для перехідного режиму ілюструє рисунок 4.

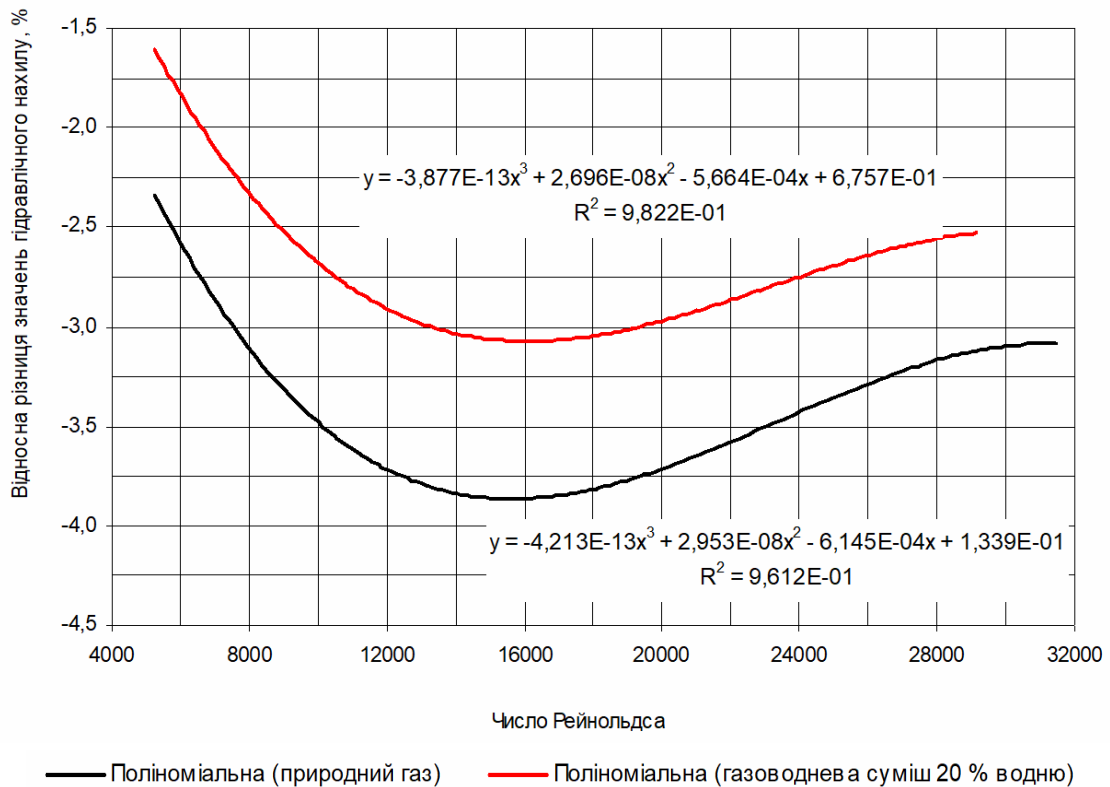
За перехідного режиму руху газу природного газу в сталевих газових мережах низького тиску застосування ПК SIMONE на (140 – 2) % завищує значення гідравлічного нахилу залежно від числа Рейнольдса. У випадку перекачування газоводневої суміші, що містить 20 % водню, використання ПК SIMONE спричинить завищення гідравлічного нахилу на (150 – 3) % залежно від числа Рейнольдса (рис. 4).

Рисунок 5 ілюструє результати досліджень різниці значень гідравлічного нахилу залежно від числа Рейнольдса при застосуванні двох методів розрахунку сталевих газопроводів низького тиску, що працюють за турбулентного режиму.

За турбулентного режиму руху газу природного газу в сталевих газових мережах низького тиску застосування ПК SIMONE на (2–4) % занижує значення гідравлічного нахилу залежно від числа Рейнольдса. У випадку транспор-



**Рисунок 4 – Відносна різниця значень гідравлічного нахилу залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для сталевих газопроводів низького тиску (перехідний режим)**



**Рисунок 5 – Відносна різниця значень гідравлічного нахилу залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для сталевих газопроводів низького тиску (турбулентний режим)**

тування газоводневої суміші, що містить 20 % водню, використання ПК SIMONE спричинить зниження гідравлічного нахилу на (1–3) % залежно від числа Рейнольдса.

Нижче наведено результати аналогічних досліджень для поліетиленових газових мереж низького тиску. За ламінарного режиму рух природного газу в поліетиленових газових ме-

режах низького тиску застосування ПК SIMONE на 139 % завищує значення гідравлічного нахилу, порівняно із розрахованим за нормативним методом. У випадку перекачування газоводневої суміші, що містить 20 % водню, застосування ПК SIMONE замість нормативного методу спричинить завищення гідравлічного нахилу на 149 %.

Аналітичні залежності відносної різниці значень гідравлічного нахилу (%) за двома методами розрахунку від числа Рейнольдса мають такий вигляд:

для перехідного режиму руху природного газу

$$\delta_I = 2,795 \cdot 10^{-5} Re^2 - 2,400 \cdot 10^{-1} Re + 515,1; \quad (16)$$

для перехідного режиму руху газоводневої суміші з 20 % водню

$$\delta_I = 2,636 \cdot 10^{-5} Re^2 - 2,119 \cdot 10^{-1} Re + 423,0; \quad (17)$$

для турбулентного режиму руху природного газу

$$\delta_I = -5,040 \cdot 10^{-13} Re^3 + 3,487 \cdot 10^{-8} Re^2 - 7,195 \cdot 10^{-4} Re - 7,729 \cdot 10^{-1}; \quad (18)$$

для турбулентного режиму руху газоводневої суміші з 20 % водню

$$\delta_I = -4,602 \cdot 10^{-13} Re^3 + 3,171 \cdot 10^{-8} Re^2 - 6,559 \cdot 10^{-4} Re - 2,582 \cdot 10^{-1}. \quad (19)$$

Вірогідність апроксимації математичних моделей (16–19) перевищує 97 %.

Газові мережі середнього і високого тиску здійснюють транспортування енергоносіїв виключно за турбулентного режиму. Для характеристики їх газодинамічної енерговитратності, на відміну від газових мереж низького тиску, використовують такий енергетичний параметр [4, 5]:

$$A = \frac{P_{1a}^2 - P_{ka}^2}{l}, \quad (20)$$

де  $P_{1a}$  – абсолютний тиск енергоносія на початку газопроводу;

$P_{ka}$  – абсолютний тиск енергоносія у кінці газопроводу.

Рисунок 6 ілюструє відносну різницю значень кінцевого тиску за двох методів газодинамічного розрахунку поліетиленових газових мереж середнього тиску.

На рисунку 7 зображено відносну різницю значень енергетичного параметра  $A$  за двох методів газодинамічного розрахунку поліетиленових газових мереж середнього тиску.

Рисунки 8 і 9 ілюструють відносну різницю значень кінцевого тиску та значень енергетичного параметра  $A$  за двох методів газоди-

намічного розрахунку поліетиленових газових мережах високого тиску.

Як свідчать рисунки 6 і 7, застосування для газодинамічних розрахунків ПК SIMONE замість нормативної методики спричинює зміну відносної різниці значень абсолютного кінцевого тиску для поліетиленового газопроводу середнього тиску від нуля до мінус 4,5 % у діапазоні чисел від 20000 до 700000. Відносна різниця значень енергетичного параметра  $A$  при цьому змінюється від мінус 2,5 % до плюс 3,5 %.

Для сталевих труб середнього тиску при перекачуванні як природного газу, так і газоводневої суміші, що містить 20 % водню, застосування методу ПК SIMONE завищує кінцевий тиск від нуля до 0,5 % і занижує енергетичний параметр  $A$  від 0,2 % до 1 % залежно від числа Рейнольдса.

Як свідчать рисунки 8 і 9, застосування методу газодинамічного розрахунку, наведеного у ПК SIMONE, спричинює заниження тиску у кінці поліетиленового газопроводу високого тиску до 1,5 % і відповідне завищення енергетичного параметра  $A$  до величини 1,2 %.

Для сталевих газових мереж високого тиску аналітичні залежності відносної різниці абсолютного кінцевого тиску (%) від числа Рейнольдса за двома методами газодинамічного розрахунку мають такий вигляд:

$$\delta_{P_k} = 7,980 \cdot 10^{-19} Re^3 - 1,671 \cdot 10^{-12} Re^2 + 1,440 \cdot 10^{-6} Re - 2,902 \cdot 10^{-1}; \quad (21)$$

для газоводневої суміші, що містить 20 % водню

$$\delta_{P_k} = 1,064 \cdot 10^{-18} Re^3 - 2,179 \cdot 10^{-12} Re^2 + 1,740 \cdot 10^{-6} Re - 3,243 \cdot 10^{-1}. \quad (22)$$

Аналітичні залежності відносної різниці енергетичного параметра  $A$  (%) від числа Рейнольдса за двома методами розрахунку сталевих газових мереж високого тиску мають такий вигляд:

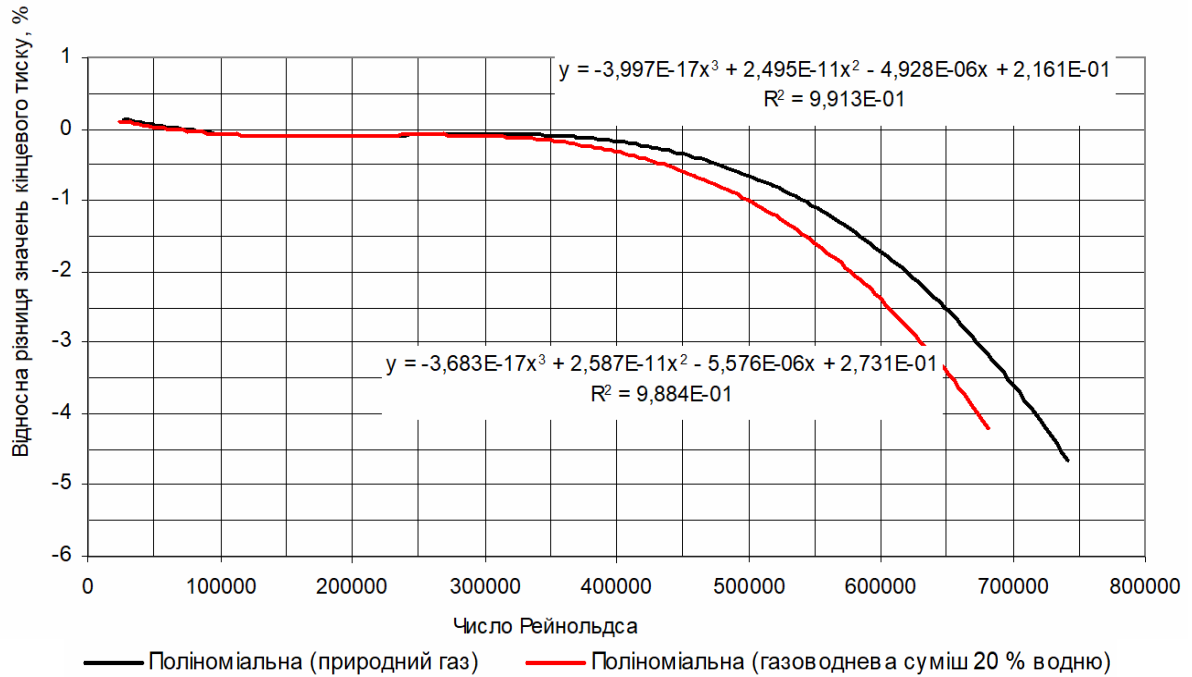
$$\delta_I = -1,614 \cdot 10^{-19} Re^3 + 1,051 \cdot 10^{-12} Re^2 - 1,606 \cdot 10^{-6} Re - 2,613; \quad (23)$$

для газоводневої суміші, що містить 20 % водню

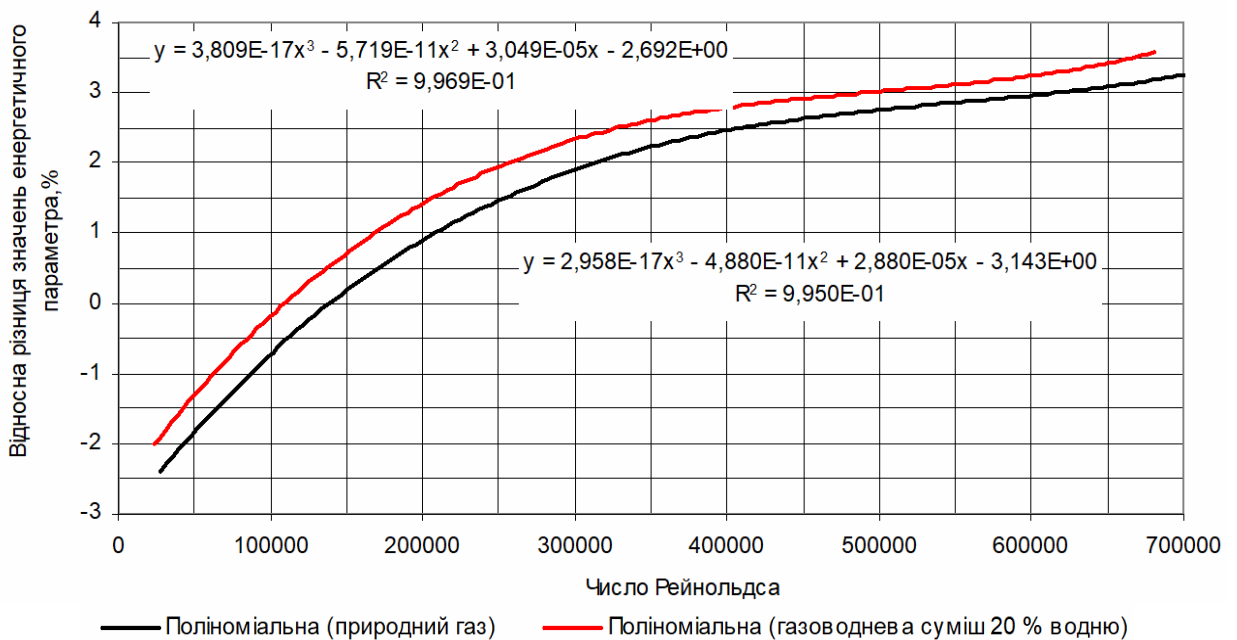
$$\delta_I = -2,071 \cdot 10^{-19} Re^3 + 1,294 \cdot 10^{-12} Re^2 - 1,965 \cdot 10^{-6} Re - 2,426. \quad (24)$$

Вірогідність апроксимації математичних моделей (21)–(24) перевищує 98 %.





**Рисунок 6 – Відносна різниця значень абсолютного кінцевого тиску енергоносія залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для поліетиленового газопроводу середнього тиску**

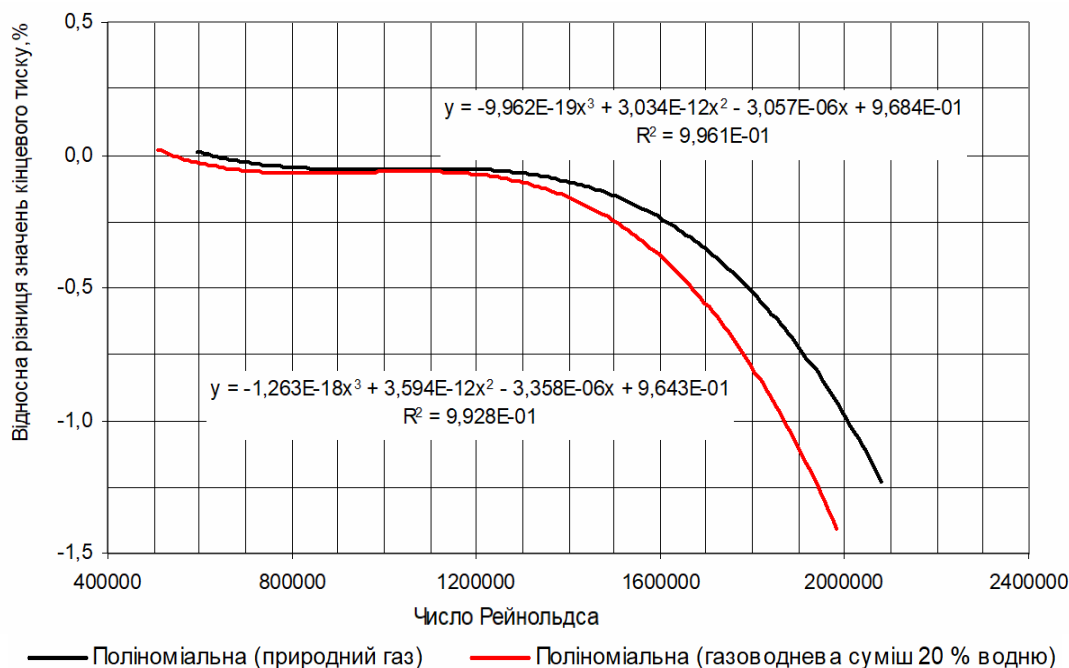


**Рисунок 7 – Відносна різниця значень енергетичного параметра A залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів розрахунку для поліетиленового газопроводу середнього тиску**

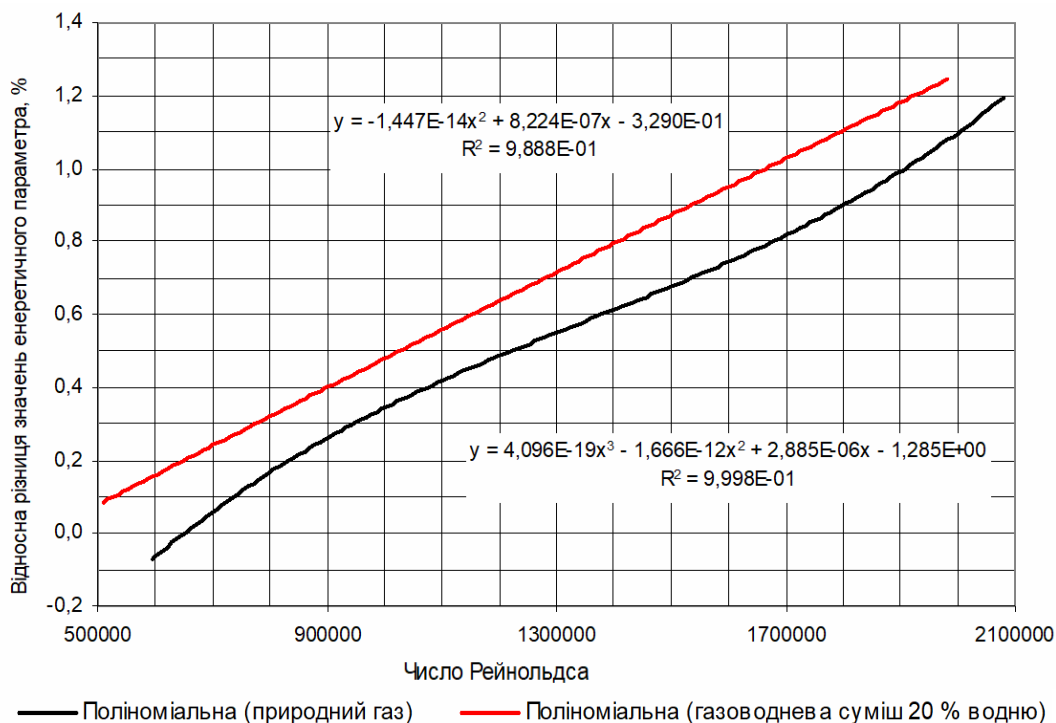
**Висновки**

Встановлено, що у випадках використання ПК SIMONE для проектних та експлуатаційних розрахунків як сталевих, так і поліетиленових газових мереж низького тиску, що працюють за ламінарного та перехідного режимів, одержують завищену до 160 % величину газодинамічної енерговитратності порівняно з ре-

зультатами обчислень за нормативною методикою. Це характерно як для природного газу, так і для газоводневої суміші, що містить 20 % водню. Таке відхилення пояснюється тим, що в обчислювальному алгоритмі ПК SIMONE відсутні математичні моделі коефіцієнта гідравлічного опору для ламінарного і перехідного режимів руху.



**Рисунок 8 – Відносна різниця значень абсолютного кінцевого тиску енергоносія залежно від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів для поліетиленового газопроводу високого тиску**



**Рисунок 9 – Відносна різниця значень енергетичного параметра A від числа Рейнольдса у разі застосування двох методів розрахунку для поліетиленового газопроводу високого тиску**

При застосуванні ПК SIMONE для розрахунків газових мереж низького тиску, що працюють за турбулентного режиму, одержують занижену на (2–4) % залежно від числа Рейнольдса величину газодинамічної енерговитратності, порівняно з результатами за методикою,

яка рекомендована чинним нормативним документом.

Використання ПК SIMONE для розрахунків газових мереж середнього тиску, замість нормативної методики, спричинює завищення для поліетиленових труб до 3,5 % залежно від

числа Рейнольдса і зниження для сталевих труб до 0,6 % величини їх газодинамічної енерговитратності. Це встановлено як для природного газу, так і для газоводневої суміші, що містить 20 % водню за об'ємом.

При застосуванні ПК SIMONE для розрахунків газових мереж високого тиску одержують занижену до 3,3 % для сталевих труб і завищену до 1,2 % для поліетиленових труб величину газодинамічної енерговитратності, порівняно з результатами обчислень за нормативною методикою.

Одержані результати доцільно враховувати за застосування ПК SIMONE для проектних та експлуатаційних розрахунків систем газопостачання населених пунктів при транспортуванні як природного газу, так і газоводневих сумішей.

### Література

1. Станіслав Казда, Леонід Уніговський. Наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2020. № 5 (47). С. 9–14.
2. Кирило Костогриз. Перші випробування українських газових мереж на водні. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2020. № 5 (47). С. 24–28.
3. ДБН В.2.5–20–2018. Газопостачання.
4. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: Сімик, 2006. 1313 с.
5. Середюк М. Д., Малик В. Я., Болонний В. Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів: навч. посіб. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 435 с.
6. Ксеніч А. І. Середюк М. Д. Порівняння енерговитратності транспортування газу в сталевих і поліетиленових газопроводах систем газопостачання населених пунктів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, 2009. № 3(21). С. 20–25.
7. Середюк М.Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, 2021. № 1 (101). Т.1. С. 52–62.
8. Середюк М. Д. Особливості газодинамічних процесів у газових мереж середнього і високого тиску за транспортування газо-водневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, 2021. № 2 (102). С.87–95.
9. Середюк М. Д. Особливості газодинамічного розрахунку внутрішніх газових мереж при застосуванні газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, 2021. № 11 (111). С. 73–80.
10. DSTU EN ISO 6976:2020 Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу.

### References

1. Stanislav Kazda, Leonid Unighovsjkyj. Naukove suprovodzhennja eksperymentiv transportuvannja sumishej vodnju ta pryrodnogho ghazu rozpodiljnymy ghazoprovodamy. *Nafto-ghazova ghaluzj Ukrainy*. Kyjiv, 2020. No 5 (47). P. 9–14. [in Ukrainian]
2. Kyrylo Kostoghryz. Pershi vyprobuvannja ukrajinsjkykh ghazovykh merezh na vodni. *Naftogazova ghaluzj Ukrainy*. Kyjiv, 2020. No 5 (47). P. 24–28. [in Ukrainian]
3. DBN V.2.5–20–2018 Ghazopostachannja. [in Ukrainian]
4. Ghoncharuk M. I., Seredjuk M. D., Sheludchenko V. I. Dovidnyk z ghazopostachannja naselenykh punktiv Ukrainy. Ivano-Frankivsjk: Simyk, 2006. 1313 p. [in Ukrainian]
5. Seredjuk M. D., Malyk V. Ja., Bolonnyj V. T. Proektuvannja ta ekspluatacija system ghazopostachannja naselenykh punktiv: navch. posib. Ivano-Frankivsjk: Fasel, 2003. 435 p. [in Ukrainian]
6. Ksenych A. I. Seredjuk M. D. Porivnjannja energhovytratnosti transportuvannja ghazu v stalevykh i polietylenovykh ghazoprovodakh system ghazopostachannja naselenykh punktiv. *Naukovyj visnyk Ivano-Frankivsjkogho nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu nafty i ghazu*, 2009. No 3(21). P. 20–25. [in Ukrainian]
7. Seredjuk M.D. Ghazodynamichni rezhy my ekspluataciji ghazovykh merezh nyzjkogho tysku. 2021. Vol.1. P. 52–62. [in Ukrainian]
8. Seredjuk M. D. Osoblyvosti ghazodynamichnykh procesiv u ghazovykh merezh serednjogho i vysokogho tysku za transportuvannja ghazovodnevnykh sumishej. *Internauka*. 2021. No 2 (102). P. 87–95. [in Ukrainian]
9. Seredjuk M. D. Osoblyvosti ghazodynamichnogho rozrakhunku vnutrishnikh ghazovykh merezh pry zastosuvanni ghazovodnevnykh sumishej. *Internauka*. 2021. No 11 (111). P. 73–80. [in Ukrainian]
10. DSTU EN ISO 6976:2020 Pryrodnyj ghaz. Obchyslennja teploty zhorjannja, ghustyny, vidnosnoji ghustyny ta chysla Vobbe na osnovi komponentnogho skladu. [in Ukrainian]