

## ЗМІНА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ПРИ ПЕРЕВЕДЕННІ ЇХ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

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

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 72-71-39,  
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) 58-62-80,  
e-mail: [Sergii.Velykyi@ifgas.com.ua](mailto:Sergii.Velykyi@ifgas.com.ua)

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу властивостей газоводневих сумішей на режими експлуатації існуючих газорозподільних мереж низького тиску, які раніше працювали на природному газі. З урахуванням реальних властивостей газів знайдено величину густини та вищої теплоти згоряння для природного газу та створених на його базі газоводневих сумішей відповідно до вимог чинних стандартів та Кодексу газорозподільних мереж за стандартних умов вимірювання об'єму, а саме, тиску 101,325 кПа і температури 0 °С, та стандартної температури згоряння 25 °С. Встановлено закономірності зміни розрахункових витрат, втрат тиску від тертя та кінцевого тиску у сталевому та поліетиленовому газопроводі низького тиску залежно від його завантаження та молярної концентрації водню у газоводневій суміші. За результатами математичного моделювання одержано аналітичні залежності втрат тиску від тертя у сталевому та поліетиленовому газопроводі низького тиску як функцію числа Рейнольдса та молярної концентрації водню у газоводневій суміші. За результатами досліджень одержано графічні та аналітичні залежності величини початкового тиску у сталевій та поліетиленовій газорозподільній мережі для повного діапазону зміни молярних концентрацій водню у газоводневій суміші. Як засвідчили дослідження, прогнозована величина початкового надлишкового тиску не перевищить 4000 Па, тобто буде меншою за значення 5000 Па, що є максимальним надлишковим тиском у газопроводах низького тиску. Тим самим встановлено можливість транспортування газоводневих сумішей, що містять довільну молярну частку водню, газопроводами низького тиску при збільшених витратах шляхом підвищення тиску на початку мережі після газорегуляторного пункту. Це вимагатиме відповідного налаштування регуляторів тиску та запобіжних клапанів.

Ключові слова: газові мережі низького тиску, реальний газ, стандартні умови, густина, об'ємна теплота згоряння, газодинамічний розрахунок.

*The purpose of the work is to establish the regularities of the influence of the properties of gas-hydrogen mixtures on the modes of operation of existing low-pressure gas distribution networks, which previously operated on natural gas. The density and higher heat of combustion for natural gas and gas-hydrogen mixtures created on its basis are determined in accordance with the requirements of current standards and the Code of Gas Distribution Networks under standard volume measurement conditions, namely, a pressure of 101.325 kPa and a temperature of 0 °C, and a standard combustion temperature of 25 °C, taking into account the real properties of gases. The regularities of changes in calculated costs, pressure losses from friction and final pressure in a low-pressure steel and polyethylene gas pipeline depending on its load and the molar concentration of hydrogen in the gas-hydrogen mixture have been established. According to the results of mathematical modeling, analytical dependences of pressure losses due to friction in low-pressure steel and polyethylene gas pipelines were obtained as a function of the Reynolds number and the molar concentration of hydrogen in the gas-hydrogen mixture. According to the research results, graphic and analytical dependences of the initial pressure value in the steel and polyethylene gas distribution network were obtained for the full range of changes in molar concentrations of hydrogen in the gas-hydrogen mixture. As research has shown, the predicted value of the initial excess pressure does not exceed 4000 Pa, that is, it is less than the value of 5000 Pa, which is the maximum pressure in low-pressure gas pipelines. Thus, the possibility of transporting gas-hydrogen mixtures containing an arbitrary molar fraction of hydrogen through low-pressure gas pipelines at increased costs by increasing the pressure at the beginning of the network after the gas control point has been established. This will require proper adjustment of the pressure regulators and relief valves.*

Keywords: low-pressure gas networks, real gas, standard conditions, density, volumetric heat of combustion, gas dynamic calculation.

## Вступ

У світі швидкими темпами зростає попит на енергію. Трубопровідний транспорт і надалі відіграватиме важливу роль у безпечному та ефективному транспортуванні як традиційних вуглеводнів, так і альтернативних енергоносіїв. Водень вважають важливим і надійним носієм енергії в майбутньому енергетичному суспільстві. Оскільки будівництво трубопроводів, спеціально призначених для транспортування водню, вимагає тривалого часу і значних коштів, в останні роки у більшості країн світу інтенсивно працюють над розробленням та впровадженням технологій використання існуючих магістральних та розподільних газопроводів для транспортування газоводневих сумішей з різним вмістом водню. Певні здобутки в цьому напрямку є в Україні. В п'яти областях на підприємствах з експлуатації газорозподільних мереж були створені полігони, на яких виконано промислові дослідження впливу вмісту водню на герметичність мережі, на механічні характеристики металу труб, на ефективність роботи газових приладів тощо. Проведено випробування режиму роботи обладнання газорегуляторних пунктів у процесі редукування тиску газоводневих сумішей. Лабораторні дослідження газодинамічних процесів при транспортуванні газоводневих сумішей у сталевих та поліетиленових газопроводах не були проведені ні в Україні, ні, судячи з наявних робіт, за кордоном. Для розгляду особливостей режимів роботи існуючих газопроводів при переході на транспортування газоводневих сумішей виконують, зазвичай, теоретичні дослідження або застосовують методи математичного моделювання термодинамічних та газодинамічних процесів.

## Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

За останні роки в Європі, США, Китаї та інших країнах проведено широкомасштабні дослідження різноманітних аспектів технологій виробництва, транспортування та зберігання водню і його сумішей з метаном. Більшість робіт стосується технологій виробництва водню, аналізу їх техніко-економічних показників. Однак є роботи, що розглядають питання, безпосередньо пов'язані з різними способами транспортування водню. При цьому всі автори робіт вважають, що найбільш ефективним способом переміщення значних обсягів водню від місця виробництва до споживачів є трубопровідний транспорт. У низці робіт досліджують різноманітні аспекти застосування існуючих магістральних газопроводів і розподільних газових ме-

реж для транспортування водню та сумішей водню з природним газом. У роботі [1] зазначають, що підмішування водню до природного газу зменшує втомний ресурс трубопроводу, але для зменшення негативних наслідків можна реалізувати режими перекачування з обмеженими робочими тисками. Автори роботи [2] розглядають газодинамічні та термодинамічні особливості експлуатації лінійної частини та компресорних станцій магістральних газопроводів Польщі при перекачуванні замість природного газу газоводневих сумішей. У роботі [3] досліджені питання зміни витрати, швидкості та інших газодинамічних параметрів при транспортуванні водню та газоводневих сумішей в існуючих трубопроводах. Акценти зроблено на трубопроводах з величиною робочого тиску, що відповідає умовам експлуатації магістральних газопроводів. Автори вважають, що перепрофілювання існуючих газопроводів як альтернатива будівництву нової інфраструктури є реальною стратегією заміни природного газу на водень. Результатами досліджень встановлено, що для доставки еквівалентної кількості енергії, як для природного газу, у трубопроводі, що транспортує водень, необхідно збільшити об'ємну витрату в три рази. У роботі [4], крім розгляду газодинамічних процесів при транспортуванні водню і газоводневих сумішей в газопроводах, аналізується вплив водню на матеріал труб. Автори стверджують, що зазначений вплив залежить не тільки від матеріалу труби, але і режиму її попередньої експлуатації. Чим більше коливання тиску у минулому, тим вищий ризик виникнення водневої втоми матеріалу. Дифузія водню через поліетиленові труби для водню у 5 разів вища, ніж для природного газу, але при цьому не є значною. У роботі також відзначають значний вплив домішування водню до природного газу на густину, об'ємну теплоту згоряння, індекс Воббе енергоносія, а також на втрати тиску у газопроводі при збереженні передачі енергії, яку забезпечував природний газ [4]. Робота [5] також стосується особливостей газодинамічних процесів транспортування водню і його сумішей в трубопроводах, параметри яких виходять за межі режимних параметрів газорозподільних мереж України. Робочий тиск модельного газопроводу прийнято 24 бар. Тому для математичної моделі застосовано рівняння, які використовують для характеристики газодинамічних процесів у магістральних газопроводах. Одержано, що для суміші 85 % метану і 15 % водню тиск на початку газопроводу повинен на 10 % перевищувати величину, що була при транспортуванні мета-

ну. Автори роботи стверджують, що максимальна частка водню в природному газі не повинна перевищувати (15–20) %, інакше вона матиме негативний вплив на якість природного газу [5].

Особливості газодинамічних процесів в газових мережах низького, середнього і високого тисків під час транспортуванні газоводневих сумішей з різним вмістом водню детально досліджено у роботах [6-8]. Тут враховано специфіку параметрів газорозподільних мереж України, а саме: відповідні діаметри; робочі тиски; витрати та характеристики природного газу, на базі яких шляхом підмішування водню можуть у майбутньому формуватися газоводневі суміші. Газодинамічні розрахунки газорозподільних мереж виконано згідно з вимогами чинних нормативних вітчизняних документів. У роботі [9] виконано порівняння методів визначення газодинамічної енерговитратності газових мереж, що рекомендовані вітчизняними стандартами, та методів, що закладені у сучасні комп'ютерні комплекси.

### Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Результати досліджень, наведені у низці зазначених вище робіт, довели, що газоводневі суміші характеризуються суттєво меншими значеннями об'ємної теплоти згоряння, порівняно з природним газом. Тому для подачі споживачам такого ж обсягу енергії, яку забезпечував природний газ, доведеться збільшувати витрати газу на ділянках газової мережі, що, у свою чергу, помітно збільшить втрати тиску. Однак наявні роботи не дають прямої відповіді на такі питання: як вплине застосування газоводневої суміші з певною молярною концентрацією водню на режим експлуатації газорозподільних мереж, які раніше працювали на природному газу; як зміниться при цьому початковий і кінцевий тиск в газовій мережі; за яких умов можлива практична реалізація даної технології без суттєвої реконструкції системи; як це вплине на режим експлуатації газорегуляторних пунктів. У всіх наявних роботах не використано нові методи розрахунку фізико-хімічних та термодинамічних властивостей газоводневих сумішей відповідно до вимог міжнародних стандартів, що розроблені за ostatні роки. Вирішенню зазначених питань загальної проблеми присвячено дану роботу.

### Мета та завдання досліджень

Мета роботи – встановлення закономірностей впливу властивостей газоводневих сумішей

на режими експлуатації існуючих газорозподільних мереж низького тиску, які до того працювали на природному газі.

Мета досліджень реалізується шляхом вирішення таких завдань:

- встановити закономірності змін розрахункових витрат, втрат тиску від тертя та кінцевого тиску у модельному газопроводі низького тиску залежно від його завантаження та молярної концентрації водню у газоводневій суміші;
- виконати математичне моделювання залежності втрат тиску від тертя у сталевому та поліетиленовому газопроводах низького тиску як функцію числа Рейнольдса та молярної концентрації водню у газоводневій суміші;
- встановити можливість транспортування газоводневих сумішей із збільшеними витратами газопроводами низького тиску для компенсації зменшення об'ємної теплоти згоряння шляхом підвищення тиску на початку мережі після газорегуляторного пункту.

### Висвітлення основного матеріалу дослідження

Дослідження проведено для природного газу, що забезпечував газопостачання західних областей України в 2023 році. Використаний компонентний склад газу у молярних відсотках згідно з паспортом фізико-хімічних показників. Газ містить 12 компонентів, молярна концентрація метану становить 94,3 %. На основі зазначеного природного газу за принципом пропорційності сформовано компонентний склад газоводневих сумішей за домішування такого вмісту водню (у молярних відсотках): 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 і 100.

Газодинамічні режими газорозподільних мереж залежать від фізико-хімічних властивостей природного газу та газоводневих сумішей за стандартних та робочих умов. В Україні згідно з чинним нормативним документом [10] обсяги транспортування газу газорозподільними мережами зводять до таких стандартних умов: тиск:  $p_n = 101,325$  кПа; температура  $t_n = 0$  °С. Приймають, що стандартна температура згоряння газової суміші дорівнює 25 °С [11].

Для визначення низки параметрів транспортованої газопроводом газової суміші за наведених вище стандартних умов застосовано метод, наведений у ДСТУ EN ISO 6976:2020 [12]. Вихідними даними для розрахунків був компонентний склад газової суміші в молярних частках за даними газової хроматографії. За результатами розрахунків з урахуванням реальних

**Таблиця 1 – Втрати тиску в сталевому газопроводі низького тиску при витраті газоводневої суміші, яка забезпечує передачу енергії, що відповідає витраті 50 м<sup>3</sup>/год для природного газу**

Молярна концентрація водню у газоводневій суміші, %	Коефіцієнт зменшення вищої об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші	Збільшена витрата газоводневої суміші у газопроводі, м <sup>3</sup> /год	Число Рейнольдса	Втрати тиску від тертя у газопроводі низького тиску, Па	Відносне зростання втрат тиску у газопроводі порівняно з транспортуванням природного газу, %
0	1,0000	50,0	12879	169	0,0
10	0,9302	53,8	12652	178	5,7
20	0,8606	58,1	12389	189	12,0
30	0,7911	63,2	12080	201	18,9
40	0,7217	69,3	11712	213	26,5
50	0,6524	76,6	11266	227	34,8
60	0,5832	85,7	10715	242	43,5
70	0,5141	97,3	10015	257	52,2
80	0,4451	112,3	9100	269	59,6
90	0,3760	133,0	7852	273	61,7
100	0,3070	162,9	6052	248	47,0

властивостей газів знаходили густину, вищу і нижчу молярну теплоту згоряння, вищу і нижчу об'ємну теплоту згоряння, вище та нижче число Воббе природного газу і створених на його базі газоводневих сумішей. Згідно з вимогами нормативних документів [10,11], проектні та експлуатаційні розрахунки газорозподільних мереж необхідно виконувати за наведених вище стандартних умов, що відповідають нормальним фізичним умовам.

Динамічну в'язкість газової суміші за зазначених вище умов знаходили за формулою, що враховує критичні параметри компонентів:

$$\eta_n = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \eta_i \cdot \sqrt{M_i T_{c_i}}}{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sqrt{M_i T_{c_i}}}, \quad (1)$$

де  $x_i$  – молярна частка  $i$ -го компонента газової суміші;

$\eta_i$  – динамічна в'язкість  $i$ -ого компонента газової суміші при 0 °С;

$M_i$  – молярна маса  $i$ -ого компонента газової суміші;

$T_c$  – критична температура  $i$ -ого компонента газової суміші.

Як модельний трубопровід вибрали сталевий газопровід низького тиску діаметром 108x3 мм довжиною 500 м. Спочатку газодинамічні розрахунки виконали для випадку транспортування природного газу у діапазоні витрат, що відповідають можливому завантаженню газопроводу у процесі його експлуатації. Позначимо витрату в газопроводі, що транспортує природ-

ний газ з вищою об'ємною теплотою згоряння  $(Hv)_g$ , як  $Q_g$ . Для транспортування такої ж кількості енергії у випадку застосування газоводневої суміші з молярною концентрацією водню  $k_g$  необхідно збільшити витрату у газопроводі за умовою

$$Q_{g\delta} = \frac{Q_g}{\alpha_{k\delta}}, \quad (2)$$

де  $\alpha_{k\delta}$  – коефіцієнт зменшення вищої об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші, порівняно з аналогічним показником для базового природного газу,

$$\alpha_{k\delta} = \frac{(Hv)_{g\delta}}{(Hc)_g}, \quad (3)$$

де  $(Hv)_{g\delta}$  – вища об'ємна теплота згоряння газоводневої суміші з молярною часткою водню  $k_g$ .

Збільшення витрати газоводневої суміші у газопроводі спричинить зростання втрат тиску від тертя, що змінить режим експлуатації газорозподільної мережі.

При проведенні газодинамічних розрахунків модельного газопроводу число Рейнольдса і втрати тиску визначали за методом, який рекомендує нормативний документ [10]. Одержані результати, що відповідають витраті 50 м<sup>3</sup>/год для природного газу, при різних значеннях молярного вмісту водню у газоводневій суміші показано у таблиці 1.

При транспортуванні газоводневої суміші із збільшеною витратою  $Q_{g\delta}$  надлишковий тиск у кінці модельного газопроводу дорівнює

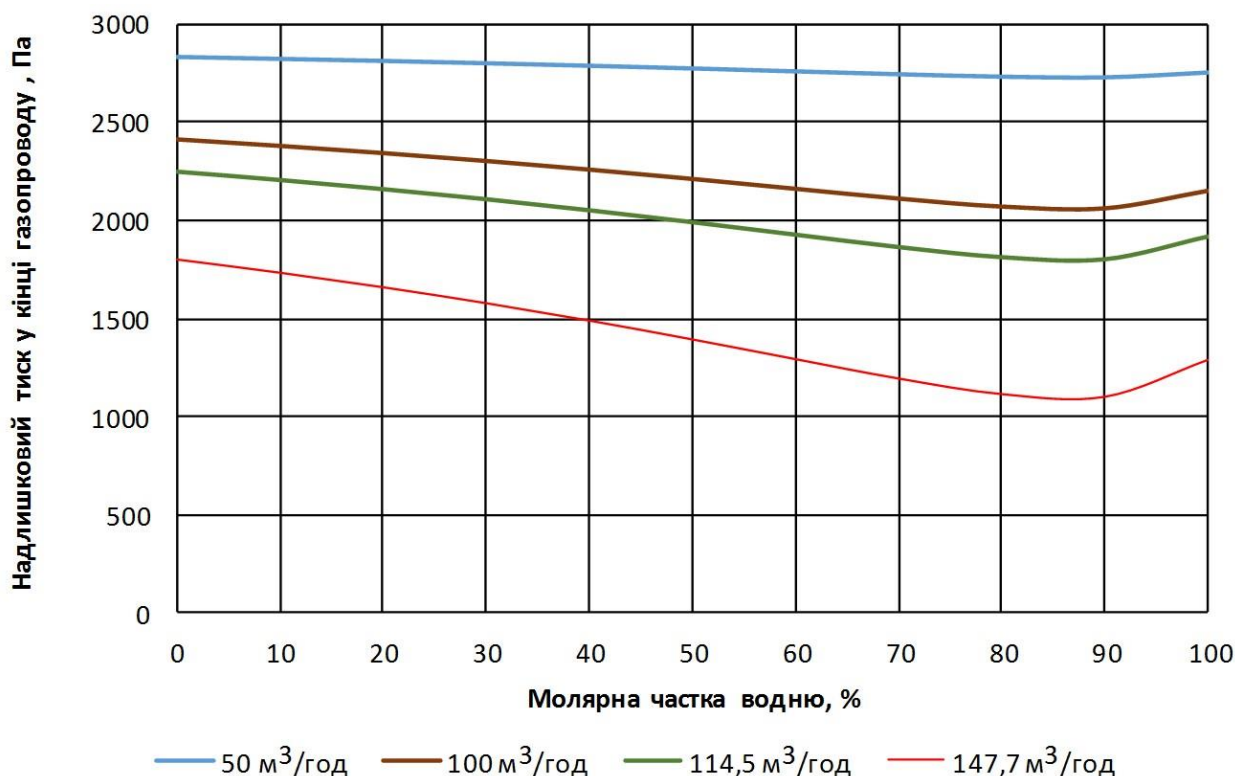


Рисунок 1 – Тиск у кінці модельного газопроводу залежно від завантаження та молярної частки водню у газоводневій суміші

$$p_k = p_{нач} - \Delta p, \quad (4)$$

де  $p_{нач}$  – надлишковий тиск газової суміші на початку газопроводу;

$\Delta p$  – втрати тиску у газопроводі за витрати  $Q_{гв}$  і молярної концентрації газоводневої суміші  $k_g$ .

Приймаємо, що початок модельного газопроводу знаходиться на виході газорегуляторного пункту (ГРП), який підтримує незалежно від величини витрати сталий тиск. Нормативне значення надлишкового тиску на виході ГРП при газопостачанні природним газом дорівнює 3000 Па, максимально допустимі втрати тиску у розподільних газопроводах низького тиску становлять  $\Delta p_{дон} = 1200$  Па. Як виняток, при садибній забудові допускається приймати  $\Delta p_{дон} = 1500$  Па [10]. Приймаємо ці значення також при використанні для газопостачання газоводневих сумішей.

Застосовуючи результати газодинамічних розрахунків модельного сталевого газопроводу низького тиску, знаходимо величину кінцевого надлишкового тиску у модельному газопроводі залежно від завантаження і молярної концентрації водню у газоводневій суміші. Результати досліджень наведено на рисунку 1.

Слід зазначити, що витрати у газопроводі, наведені на рисунку 1, відповідають умовам

перекачування природного газу, а кінцеві тиски розраховані для збільшених витрат газоводневої суміші у газопроводі відповідно до формули (2).

Результати досліджень засвідчили, що за конкретного завантаження газопроводу, що відповідає певній витраті природного газу, мінімальне значення кінцевого тиску відповідає молярній концентрації водню у газоводневій суміші  $k_g = 85$  %. Із збільшенням завантаження модельного газопроводу кінцевий тиск газоводневої суміші зменшується. За витрати природного газу  $Q_g = 114,5$  м³/год кінцевий тиск для природного газу  $p_k = 2247$  Па, а для газоводневої суміші з молярною концентрацією водню  $k_g = 85$  % він знизиться до мінімально допустимого значення  $p_k = 1800$  Па. За витрати природного газу  $Q_g = 147,7$  м³/год кінцевий тиск для природного газу ще знаходиться у межах норми  $p_k = 1800$  Па, а для газоводневої суміші з будь-якою молярною концентрацією він нижчий від норми. За концентрації водню у газоводневій суміші  $k_g = 85$  % кінцевий тиск буде значно меншим за норму, а саме,  $p_k = 1100$  Па, що неприпустимо, з точки зору забезпечення нормальних умов експлуатації газових приладів споживачів.

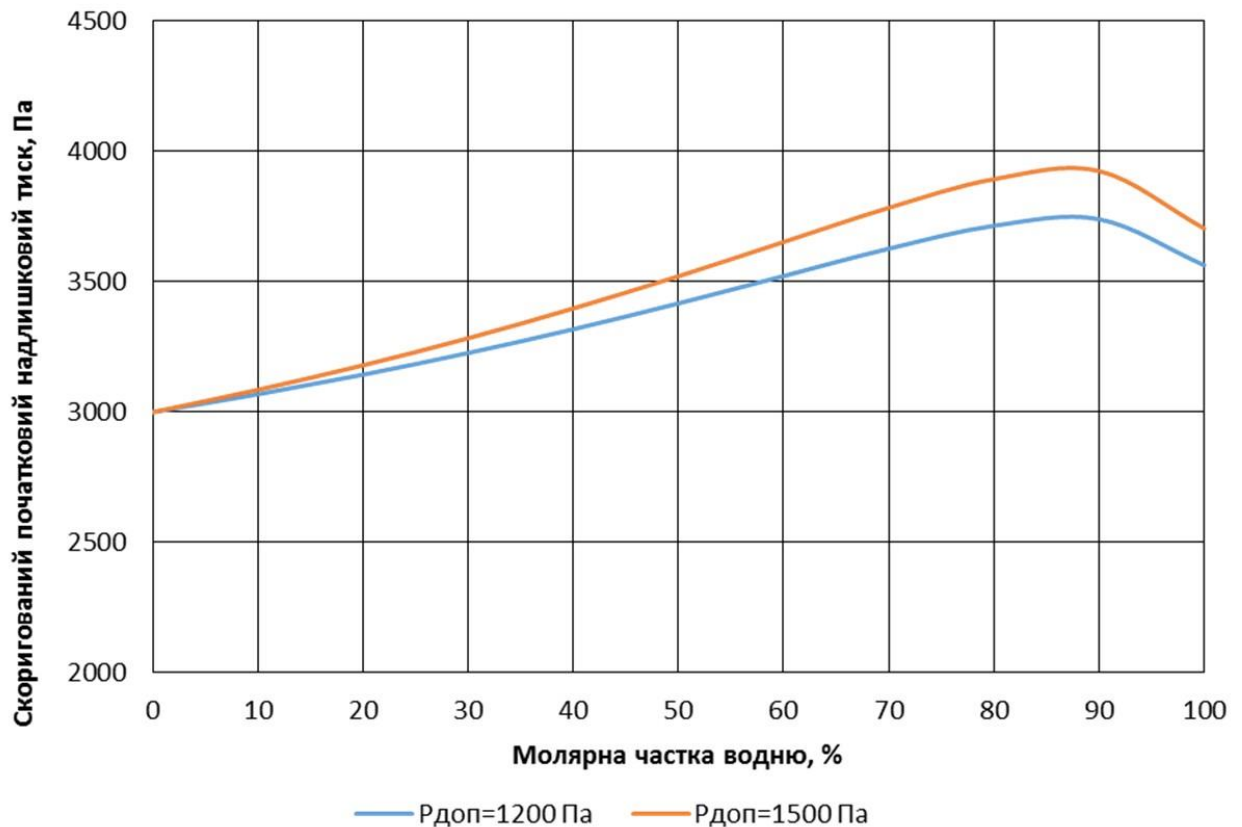


Рисунок 2 – Скоригований початковий надлишковий тиск у сталевій газорозподільній мережі низького тиску при транспортуванні газоводневих сумішей

Газорозподільна мережа населених пунктів зазвичай складається не з однієї, а з десятків або сотень ділянок, які геометрично та газодинамічно зв'язані між собою. При проектуванні існуючих газорозподільних мереж діаметри ділянок розраховувались із умови, щоб втрати тиску на всіх напрямках руху природного газу не перевищувати значення  $\Delta p_{\text{доп}} = 1200$  Па або були близькі до вказаного значення. Цьому принципу відповідають також режимні параметри експлуатації газорозподільних мереж, які сьогодні працюють на природному газі.

Як показали наведені вище розрахунки, перехід на транспортування газоводневих сумішей без зменшення обсягу передачі енергії споживачам об'єктивно вимагає збільшення витрат на ділянках газової мережі, що спричинює зростання витрат тиску. При збереженні нормативного значення кінцевого тиску у газовій мережі, для практичної реалізації даної технології доведеться збільшити величину початкового надлишкового тиску газу.

На рисунку 2 наведено результати розрахунку необхідного початкового тиску в сталевих газорозподільних мережах низького тиску при транспортуванні газоводневих сумішей за збільшених витрат з метою збереження обсягів енергії, яку забезпечував природний газ.

За результатами математичного моделювання графіків, наведених на рисунку 2, одержані такі аналітичні залежності надлишкового тиску на початку газової мережі (Па) із сталевих труб від молярної концентрації водню у газоводневій суміші (%):

– якщо мережа розрахована на перепад тиску  $\Delta p_{\text{доп}} = 1200$  Па

$$p_{\text{поч}} = -5,688 \cdot 10^{-5} \cdot k_g^4 + 8,458 \cdot 10^{-3} \cdot k_g^3 - 3,360 \cdot 10^{-1} \cdot k_g^2 + 13,08 \cdot k_g + 3000, \quad (5)$$

– якщо мережа розрахована на перепад тиску  $\Delta p_{\text{доп}} = 1500$  Па

$$p_{\text{поч}} = -4,549 \cdot 10^{-5} \cdot k_g^4 + 6,767 \cdot 10^{-3} \cdot k_g^3 - 2,688 \cdot 10^{-1} \cdot k_g^2 + 10,46 \cdot k_g + 3000. \quad (6)$$

Для математичних моделей (5) і (6) вірогідність апроксимації перевищує 99 %.

Газорозподільні мережі з поліетиленових труб характеризуються абсолютною еквівалентною шорсткістю поверхні, яка у 5 менша, ніж для сталевих труб [10]. Оскільки газові мережі працюють при турбулентному режимі, то така різниця спричинює відмінність режиму перекачування як природного газу, так і газоводневих сумішей.

Таблиця 2 – Втрати тиску в поліетиленовому газопроводі низького тиску при витраті газоводневої суміші, яка забезпечує передачу енергії, що відповідає витраті 40 м<sup>3</sup>/год для природного газу

Молярна концентрація водню у газоводневій суміші, %	Коефіцієнт зменшення вищої об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші	Збільшена витрата газоводневої суміші у газопроводі, м <sup>3</sup> /год	Число Рейнольдса	Втрати тиску від тертя у газопроводі низького тиску, Па	Відносне зростання втрат тиску у газопроводі порівняно з транспортуванням природного газу, %
0	1,0000	40,0	10790	137	0,0
10	0,9302	43,0	10600	145	5,8
20	0,8606	46,5	10379	154	12,1
30	0,7911	50,6	10121	164	19,1
40	0,7217	55,4	9812	174	26,9
50	0,6524	61,3	9438	186	35,3
60	0,5832	68,6	8976	198	44,3
70	0,5141	77,8	8391	210	53,3
80	0,4451	89,9	7624	221	61,1
90	0,3760	106,4	6578	225	63,7
100	0,3070	130,3	5070	205	49,6

З цієї причини нами виконано аналогічні дослідження для поліетиленового газопроводу низького тиску діаметром 110x6,3 мм довжиною 500 м у діапазоні витрат, що відповідають його можливому завантаженню при транспортуванні природного газу. Результати розрахунку втрат тиску у поліетиленовому газопроводі низького тиску при витраті газоводневої суміші, яка забезпечує передачу енергії, що відповідає витраті 40 м<sup>3</sup>/год для природного газу, наведено у таблиці 2.

За результатами багатоваріантних газодинамічних розрахунків одержано такі аналітичні залежності надлишкового тиску на початку газової мережі (Па) із поліетиленових труб від молярної концентрації водню у газоводневій суміші (%):

– якщо мережа розрахована на перепад тиску  $\Delta p_{дон} = 1200$  Па

$$p_{ноч} = -5,712 \cdot 10^{-5} \cdot k_g^4 + 8,539 \cdot 10^{-3} \cdot k_g^3 - 3,389 \cdot 10^{-1} \cdot k_g^2 + 13,21 \cdot k_g + 3000, \quad (7)$$

– якщо мережа розрахована на перепад тиску  $\Delta p_{дон} = 1500$  Па

$$p_{ноч} = -4,570 \cdot 10^{-5} \cdot k_g^4 + 6,831 \cdot 10^{-3} \cdot k_g^3 - 2,711 \cdot 10^{-1} \cdot k_g^2 + 10,57 \cdot k_g + 3000. \quad (8)$$

Для математичних моделей (7) і (8) вірогідність апроксимації перевищує 99 %.

Опрацювання результатів газодинамічних розрахунків модельного газопроводу як із сталевих, так і поліетиленових труб показало, що відносна величина зростання втрат тиску від

тертя суттєво залежить від молярної частки водню у газоводневій суміші і значно менше – від ступеня завантаження газопроводу. При цьому при збільшенні завантаження відносна величина зростання газодинамічних втрат у газопроводі низького тиску, порівняно з перекачуванням природного газу, дещо зменшується.

Ступінь завантаження газопроводу за всіх інших сталих параметрів характеризується величиною числа Рейнольдса. Для того, щоб результати досліджень, що виконані для модельних газопроводів певного діаметра, використати для прогнозування режимних параметрів транспортування газоводневих сумішей у газопроводах будь-якого діаметра, необхідно розробити аналітичні залежності зміни газодинамічної енерговитратності від числа Рейнольдса.

Відносне збільшення втрат тиску від тертя (%) як функцію числа Рейнольдса  $Re$  у газопроводі при транспортуванні газоводневої суміші представимо у такому вигляді:

$$\delta p = A(k_g) \cdot Re^2 + B(k_g) \cdot Re + C(k_g), \quad (9)$$

де  $A(k_g), B(k_g), C(k_g)$  – коефіцієнти математичної моделі, які залежать від молярної концентрації водню у газоводневій суміші  $k_g$ ;

$$A(k_g) = a_1 \cdot k_g^2 + b_1 \cdot k_g, \quad (10)$$

$$B(k_g) = a_2 \cdot k_g^2 + b_2 \cdot k_g, \quad (11)$$

$$C(k_g) = a_3 \cdot k_g^4 + b_3 \cdot k_g^3 + c_3 \cdot k_g^2 + d_4 \cdot k_g. \quad (12)$$

Для газорозподільних мереж із сталевих труб одержано такі математичні вирази ( $k_g$  у частках одиниці):

$$A(k_g) = 3,052 \cdot 10^{-4} \cdot k_g^2 - 3,936 \cdot 10^{-5} \cdot k_g, \quad (13)$$

$$B(k_g) = 1,919 \cdot 10^{-9} \cdot k_g^2 - 1,729 \cdot 10^{-10} \cdot k_g, \quad (14)$$

$$C(k_g) = -380,9 \cdot k_g^4 + 570,1 \cdot k_g^3 - 226,2 \cdot k_g^2 + 88,2 \cdot k_g. \quad (15)$$

Для поліетиленових газових мереж математичні вирази для коефіцієнтів моделі мають такий вигляд ( $k_g$  у частках одиниці):

$$A(k_g) = 1,158 \cdot 10^{-10} \cdot k_g^2 + 1,710 \cdot 10^{-12} \cdot k_g, \quad (16)$$

$$B(k_g) = 6,463 \cdot 10^{-5} \cdot k_g^2 - 6,326 \cdot 10^{-6} \cdot k_g, \quad (17)$$

$$C(k_g) = -381,2 \cdot k_g^4 + 570,4 \cdot k_g^3 - 226,2 \cdot k_g^2 + 88,3 \cdot k_g. \quad (18)$$

Для всіх запропонованих математичних моделей (9)-(18) вірогідність апроксимації перевищує 99 %. Ці формули дають можливість достовірно прогнозувати збільшення втрат тиску від тертя у газопроводі низького тиску у процесі транспортування газоводневих сумішей з будь-якою молярною концентрацією водню із збереженням обсягу передачі енергії для різного ступеня завантаження.

### Висновки

Відповідно до Кодексу газорозподільних мереж в системі газопостачання енергоносіями характеризується вищою об'ємною теплотою згоряння, яка відповідає стандартній температурі згоряння 25 °С. Досліджено вплив молярної концентрації водню на даний показник, що дало можливість уточнити ступінь збільшення витрат газоводневих сумішей у газопроводі низького тиску для передачі енергії, яку забезпечував природний газ. У випадку застосування водню витрати на ділянках газових мереж низького тиску необхідно збільшити у 3,3 рази, порівняно з газопостачанням природним газом.

Для окремо працюючого газопроводу за сталого тиску на його початку і певного завантаженні із збільшенням молярної концентрації водню від 0 до 85 % кінцевий тиск буде зменшуватись за нелінійним законом; подальше збільшення вмісту водню призведе до деякого його зростання. Чим більше завантаження газопроводу, тим менші значення кінцевого тиску для певної молярної концентрації водню.

Результати досліджень підтвердили той факт, що транспортування газоводневих сумішей без зменшення обсягів передачі енергії споживачам вимагає збільшення витрат на ді-

лянках існуючої газорозподільної мережі, що спричинює зміну режиму експлуатації через зростання гідравлічних втрат. При збереженні нормативного значення кінцевого надлишкового тиску у газовій мережі низького тиску 1800 Па, для практичної реалізації даної технології доведеться збільшити величину початкового надлишкового тиску газу на виході газорегуляторного пункту.

За результатами досліджень одержано графічні та аналітичні залежності величини початкового тиску у сталевій та поліетиленовій газорозподільній мережі для повного діапазону можливої зміни молярних концентрацій водню у газоводневій суміші. Як засвідчили дослідження, прогнозована величина початкового надлишкового тиску не перевищує 4000 Па, тобто менша за значення 5000 Па, що є максимальним надлишковим тиском у газопроводах низького тиску.

Відносну зміну втрат тиску у газопроводі низького тиску можна описати поліноміальною функцією другого порядку від числа Рейнольдса за умов перекачування природного газу, та коефіцієнтів, які, у свою чергу, нелінійно залежать від молярної концентрації водню у газоводневій суміші. Запропоновані формули дають можливість з достовірністю понад 99 % прогнозувати зміну втрат тиску, значень початкового та кінцевого тиску та інших режимних параметрів газорозподільної мережі низького тиску при переведенні її на транспортування газоводневих сумішей.

### Література

1. Lipiainen S, Lipiainen K., Ahola A., Vakkilainen E. Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No 80. P. 31317–31329. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.283> (дата звертання 14.04.2024)
2. Zabrzski Ł., Janusz P., Liszka K., Łaciak M., Szurlej A. Hydrogen-Natural Gasmixture compression in case of transporting through high-pressure gas pipelines. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2019. DOI: [10.1088/1755-1315/214/1/012137](https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012137)
3. Abbas A.J., Hassani H., Burby M., John I.J. An Investigation into the Volumetric Flow Rate Requirement of Hydrogen Transportation in Existing Natural Gas Pipelines and Its Safety Implications. *Gases*. 2021. No 1. P. 156–179. <https://doi.org/10.3390/gases1040013> (дата звертання 14.04.2024)
4. Haeseldonckx D., D'haeseleer W. The use of natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen



transport in a changing market structure. *Hydrogen energy*. 2007. No 32. P. 1381–1386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.018> (дата звертання 14.04.2024)

5. Kuczyński S., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T. Thermodynamic and Technical Issues of Hydrogen and Methane-Hydrogen Mixtures Pipeline Transmission. *Energies*. 2019, No 12, P. 569. <https://doi.org/10.3390/en12030569> (дата звертання 14.04.2024).

6. Середюк М. Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2021. № 1 (101). Т. 1. С. 52–62. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-1-6822>.

7. Середюк М. Д. Особливості газодинамічних процесів у газових мереж середнього і високого тиску за транспортування газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2021. № 2 (102). С. 87–95. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-2-6887>.

8 Середюк М. Д. Особливості газодинамічного розрахунку внутрішніх газових мереж при застосуванні газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2021. № 11 (111). С. 73–80. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-11-7484>.

9. 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).

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

11. Кодекс газорозподільних мереж. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> (дата звернення: 12.04.2024)

12. DSTU 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. Lipiainen S, Lipiainen K., Ahola A., Vakkilainen E. Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No 80. P. 31317–31329. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.283> (дата звертання 14.04.2024)

2. Zabrzęski Ł., Janusz P., Liszka K., Łaciak M., Szurlej A. Hydrogen-Natural Gas mixture compression in case of transporting through high-pressure gas pipelines. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2019. DOI: [10.1088/1755-1315/214/1/012137](https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012137)

3. Abbas A.J., Hassani H., Burby M., John I.J. An Investigation into the Volumetric Flow Rate Requirement of Hydrogen Transportation in Existing Natural Gas Pipelines and Its Safety Implications. *Gases*. 2021. No 1. P. 156–179. <https://doi.org/10.3390/gases1040013> (дата звертання 14.04.2024)

4. Haeseldonckx D., D'haeseleer W. The use of natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure. *Hydrogen energy*. 2007. No 32. P. 1381–1386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.018> (дата звертання 14.04.2024)

5. Kuczyński S., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T. Thermodynamic and Technical Issues of Hydrogen and Methane-Hydrogen Mixtures Pipeline Transmission. *Energies*. 2019, No 12, P. 569. <https://doi.org/10.3390/en12030569> (дата звертання 14.04.2024).

6. Serediuk M.D. Hazodynamichni rezhymy ekspluatatsii hazovykh merezh nyzkoho tysku pry transportuvanni hazovodnevyykh sumishei. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka»*. 2021. No 1 (101). Vol. 1. P. 52–62. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-1-6822> [in Ukrainian]

7. Serediuk M. D. Osoblyvosti hazodynamichnykh protsesiv u hazovykh merezh serednoho i vysokoho tysku za transportuvannia hazovodnevyykh sumishei. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka»*. 2021. No 2 (102). P. 87–95. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-2-6887> [in Ukrainian]

8. Serediuk M. D. Osoblyvosti hazodynamichnoho rozrakhunku vnutrishnikh hazovykh merezh pry zastosuvanni hazovodnevyykh sumishei. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka»*. 2021. No 11 (111). P. 73–80. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-11-7484> [in Ukrainian]

9. Serediuk M.D., Velykyi S.V. Analiz metodiv vyznachennia hazodynamichnoi enerhovytatnosti hazovykh merezh 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]

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

11. Kodeks hazorozpodilnykh merezh. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> [in Ukrainian]

12. 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]