

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ ТА ГАЗОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ

М. Д. Середюк¹, С. В. Великий²

¹ ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 72-71-39,
e-mail: maria.serediuk@nung.edu.ua

² РГК, Івано-Франківськгаз; 76010, м. Івано-Франківськ, вул. Ленкавського 20;
тел. (0342) 58-62-80, e-mail: Sergii.Velykyi@ifgas.com.ua

Метою роботи є уточнення закономірностей впливу об'ємної концентрації водню на фізичні та термодинамічні властивості газоводневої суміші, газодинамічні режими експлуатації розподільчих газових мереж та обсяги передачі ними енергії до споживачів. На базі сучасних методів врахування реальних властивостей газів досліджено вплив об'ємної концентрації водню у діапазоні (0-100) % на густину, вищу і нижчу теплоту згоряння, вище і нижче число Воббе, кінематичну в'язкість газоводневих сумішей за стандартних умов, що встановлені для розподільчих газових мереж України. Побудовано графічні залежності, виконано їх математичне моделювання. Результати уточненого розрахунку властивостей газоводневих сумішей використані для проведення багатоваріантних газодинамічних розрахунків газопроводу низького тиску за повного діапазону його завантаження. Одержано уточнені результати щодо впливу об'ємної концентрації водню на газодинамічну енерговитратність газових мереж низького тиску за витрат, що мали місце для природного газу. Уточнено значення коефіцієнтів збільшення витрат в газопроводі низького тиску для компенсації зменшення вищої та нижчої об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші. Визначено ступінь зростання гідравлічної енерговитратності газопроводу низького тиску для передачі ним енергії, яку забезпечував природний газ. Всі результати досліджень відповідають стандартній температурі 0 °С. У практиці експлуатації розподільчих газових мереж є випадки зміни стандартної температури з 0 °С до 20 °С. Це зробило доцільним проведення додаткових досліджень властивостей газоводневих сумішей і газодинамічної енерговитратності газопроводу низького тиску за стандартної температури 20 °С.

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

The purpose of the work is to clarify the regularities of the influence of the volume concentration of hydrogen on the physical and thermodynamic properties of the gas-hydrogen mixture, the gas-dynamic modes of operation of distribution gas networks and the volumes of their energy transfer to consumers. On the basis of modern methods of taking into account the real properties of gases, the influence of the volume concentration of hydrogen in the range (0-100) % on the density, gross and net calorific value, gross and net Wobbe index, viscosity of gas-hydrogen mixtures under the standard conditions established for distribution gas networks of Ukraine. Graphical dependencies were constructed, and their mathematical modeling was performed. The results of the refined calculation of the properties of gas-hydrogen mixtures were used to perform multivariate gas-dynamic calculations of the low-pressure gas pipeline over the full range of its loading. Refined results were obtained regarding the influence of volume concentration of hydrogen on the gas-dynamic energy consumption of low-pressure gas networks at the costs that occurred for natural gas. The value of the coefficients of the increase in costs in the low-pressure gas pipeline to compensate for the decrease in the gross and net calorific value heat of combustion of the gas-hydrogen mixture has been specified. The degree of increase in the hydraulic energy consumption of the low-pressure gas pipeline for the transmission of energy supplied by natural gas was determined. All research results correspond to the standard temperature of 0 °C. In the practice of operation of distribution gas networks, there are cases of a change in the standard temperature from 0 °C to 20 °C. This made it necessary to carry out additional research on the properties of gas-hydrogen mixtures and the gas-dynamic energy consumption of a low-pressure gas pipeline at a standard temperature of 20 °C.

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

Вступ

Водень є енергоносієм, який може відіграти важливу роль у вирішенні проблеми декарбонізації, включаючи житлове, комерційне та промислове опалення. Одним із практичних підходів до декарбонізації розглядають змішування водню з природним газом у газопроводах для досягнення короткострокового скорочення викидів і оперативного доступу на ринок водневих технологій [1]. Змішування водню з природним газом в магістральних та розподільних трубопроводах дасть змогу одержати певний екологічний ефект без значних витрат на будівництво нової інфраструктури. Зазначений підхід має багато потенційних переваг, але також спричинює численні проблеми. Стосовно розподільних газових мереж змішування водню і природного газу створює такі проблеми, що вимагають вирішення [2, 3, 4]:

- посилений розвиток втомних тріщин в трубопровідній сталі;
- знижена стійкість до руйнування трубопровідної сталі;
- знижена пропускна здатність передачі енергії трубопроводами;
- підвищений перепад тиску при задоволенні потреби в енергії;
- надмірна динаміка горіння, підйом полум'я, зворотний спалах;
- забезпечення точності обліку та довговічності;
- забезпечення точності аналізу складу газу та його властивостей;
- витік водню в полімерних трубопроводах.

Оцінка можливості домішування водню певної концентрації до природного газу є специфічною для кожної трубопровідної системи: вона повинна враховувати технічний стан і технічні характеристики лінійної частини трубопроводу, компресорів, двигунів, лічильників, регуляторів тиску, клапанів, кінцевих споживачів енергоносія [1].

На сьогодні в Україні питання технологічної та екологічної ефективності застосування газозводневих сумішей як альтернативи природному газу знаходяться ще на стадії вивчення. Більшість уваги приділяється питанням впливу водню на матеріал сталевих та поліетиленових труб, на забезпечення процесів редукування, обліку та ефективного згоряння газозводневих сумішей [4]. Зазначені вище проблеми, пов'язані з особливостями властивостей сумішей і впливом їх на газодинамічні режими газопроводів, вимагають додаткового з'ясування. Цим питанням стосовно газових мереж присвячена дана робота.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

На дивлячись на значну кількість зарубіжних публікацій щодо перспектив реалізації водневих технологій в магістральному та розподільному трубопроводному транспорті, у них міститься здебільшого загальна інформація про можливість застосування газозводневих сумішей з різною концентрацією водню. Так, результати досліджень американських вчених засвідчили, що додавання до природного газу (5-15) % за об'ємом водню в систему газопроводів США не повинно збільшуватися ризику, пов'язані з пристроями кінцевого використання, громадською безпекою чи довговічністю. У першу чергу це стосується розподільних газових мереж. У звіті фахівців британських газових мереж стверджується, що додавання водню до 20 % за об'ємом у розподільні газові мережі низького тиску навряд чи збільшить небезпечний ризик для кінцевих користувачів. У той же час австралійські фахівці ставлять під сумнів застосовність існуючої нормативно-правової бази Австралії до транспортування газопроводами газозводневих сумішей, навіть, з вмістом водню до 10 % [1, 2, 3]. Наведені результати досліджень зарубіжних фахівців не завжди можна застосувати для вітчизняних газових мереж, так як вітчизняні трубопровідні системи характеризуються іншими технічними характеристиками газових труб, технологічного обладнання, працюють за інших робочих тисків.

Особливості технічного обладнання, режимів експлуатації, наявної нормативної бази системи вітчизняних газових мереж, які будуть впливати на впровадження водневих технологій, розглянуті у роботах [5, 6, 7]. У них встановлено, що додавання водню до природного газу суттєво змінює такі властивості, як густина та в'язкість, що, в свою чергу, впливає на газодинамічну енерговитратність газових мереж низького, середнього та високого тисків. Окремо досліджено особливості використання газозводневих сумішей для внутрішніх газових мереж житлових будинків. Виявлено, що через зменшення об'ємної теплоти згоряння газозводневих сумішей для збереження передачі енергії прийдеться збільшувати витрати газу у газових мережах, що, в свою чергу, призведе до зростання гідравлічних втрат. Всі дослідження базуються на застосуванні рекомендацій чинного нормативного документа ДБН В.2.5-20:2018 [8], що враховує специфіку вітчизняних газових мереж.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Як зазначено у [1], у процесі експлуатації газопроводів, що транспортують газоводневі суміші, можуть виникнути проблеми через зміни властивостей газової суміші, таких як густина, динамічна в'язкість, коефіцієнт Джоуля-Томсона, теплоємність, теплопровідність, теплота згоряння тощо. Розподільні газові мережі України працюють при надлишкових тисках – до 1,2 МПа, безпосередньо пов'язані із процесами згоряння енергоносія. Тому для газодинамічних розрахунків та аналізу енергоефективності експлуатації таких газопроводів важливе значення має достовірне визначення густини, в'язкості, теплоти згоряння та числа Воббе.

З жовтня 2021 р. в Україні набув чинності стандарт ДСТУ EN ISO 6976:2020 «Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу», який уточнює методи розрахунку низки властивостей газових сумішей за стандартних умов [9].

Сучасні методи розрахунку властивостей природного газу і газоводневих сумішей, наведені у зазначеному стандарті, не враховані у наявних роботах. Крім того, у роботах [5, 6, 7] враховувалась тільки величина нижчої теплоти згоряння газоводневої суміші. Сьогодні якість енергоносія передбачає аналіз вищої та нижчої теплоти згоряння, вищого та нижчого чисел Воббе.

Мета та завдання дослідження – уточнення закономірностей впливу об'ємної концентрації водню на фізичні та термодинамічні властивості газоводневої суміші, газодинамічні режими розподільних газових мереж та обсяги передачі ними енергії до споживачів.

Мета досліджень реалізується шляхом вирішення таких завдань:

- уточнити вплив об'ємної концентрації водню на густину, відносну густину, вищу та нижчу об'ємну теплоту згоряння, вище та нижче число Воббе, кінематичну в'язкість газоводневої суміші за стандартних умов стосовно газових мереж України;

- скоригувати вплив об'ємної концентрації водню на газодинамічну енерговитратність газових мереж низького тиску за витрат, що мали місце для природного газу;

- встановити коефіцієнти збільшення витрат газоводневої суміші та гідравлічної енерговитратності газопроводу низького тиску для передачі ним енергії, яку забезпечував природ-

ний газ, із врахуванням вищої та нижчої об'ємної теплоти згоряння;

- встановити вплив зміни стандартної температури з 0 °С до 20 °С на результати газодинамічних розрахунків газових мереж низького тиску за перекачування природного газу та газоводневих сумішей.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для досліджень впливу об'ємної концентрації водню на властивості газоводневої суміші застосуємо методи, наведені в [9]. Цей державний стандарт встановлює методи обчислення вищої і нижчої теплоти згоряння, густини, відносної густини, вищого та нижчого числа Воббе природних газів, замінників природних газів за стандартних умов. Застосування методів розрахунку обмежується сумішами, для яких коефіцієнт реального стану (коефіцієнт стисливості) за стандартних умов перевищує 0,9. Вихідними даними для зазначених розрахунків є склад енергоносія в молярних частках за даними газової хроматографії [9].

Для дослідження впливу об'ємної концентрації водню на характеристики газоводневої суміші та газодинамічні процеси її транспортування в газорозподільних мережах розроблено наведений нижче обчислювальний алгоритм.

Коефіцієнт реального газу (коефіцієнт стисливості) газової суміші за стандартних умов знаходимо за формулою:

$$Z(t_2, p_2) = 1 - \frac{p_2}{p_o} \left[\sum_{j=1}^N x_j \cdot s_j(t_2, p_2) \right]^2, \quad (1)$$

де t_2, p_2 – стандартна температура та стандартний тиск, за яких здійснюють вимірювання об'єму газової суміші, $p_o = 101,325$ кПа [1];

s_j – коефіцієнт підсумовування j -ого компонента суміші газів залежно від стандартної температури згідно з [9].

В Україні згідно з чинним нормативним документом [8], обсяги транспортування газу газовими мережами населених пунктів зводять до таких стандартних умов: тиск $p_2 = 101,325$ кПа, температура $t_2 = 0$ °С. В той же час ряд підприємств, що займаються експлуатацією газових мереж, при розрахунках використовують стандартну температуру $t_2 = 20$ °С, яка відповідає стандартам експлуатації магістральних газопроводів України.

Наведений нижче алгоритм відповідає двом зазначеним значенням стандартної температури.

Реальний молярний об'єм газової суміші за стандартних умов дорівнює

$$V(t_2, p_2) = \frac{R \cdot (273,15 + t_2) \cdot Z(t_2, p_2)}{p_2}, \quad (2)$$

де $R = 8,3144621 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – універсальна газова стала [9].

Відносну густину газової суміші, як реального газу, знаходимо за формулою

$$\Delta(t_2, p_2) = \frac{M \cdot Z_{air}(t_2, p_2)}{M_{air} Z(t_2, p_2)}, \quad (3)$$

де M – молярна маса газової суміші;

Z_{air} – коефіцієнт реального стану для сухого повітря стандартного складу;

для $t_2 = 0^\circ\text{C}$, $p_2 = 101,325 \text{ кПа}$

$$Z_{air} = 0,999419;$$

для $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $p_2 = 101,325 \text{ кПа}$

$$Z_{air} = 0,999645 [9];$$

M_{air} – молярна маса сухого повітря стандартного складу, $M_{air} = 28,96546 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ [9].

Густину газової суміші, як реального газу, за стандартних умов, обчислюємо так:

$$\rho(t_2, p_2) = \frac{M}{V(t_2, p_2)}. \quad (4)$$

Для визначення кількості енергії, що транспортується газопроводом у вигляді газоподібного енергоносія, застосовують об'ємну теплоту згоряння та число Воббе. При аналізі деяких технологічних процесів, наприклад процесів згоряння, застосовують масову теплоту згоряння газової суміші. Базою для визначення зазначених властивостей згідно з [9] є молярна теплота згоряння газової суміші.

Вищу молярну теплоту згоряння газової суміші знаходимо за формулою

$$(Hc)_G(t_1) = (Hc)_G^o(t_1) = \sum_{j=1}^N x_j \cdot [(Hc)_G^o]_j(t_1), \quad (5)$$

де t_1 – температура згоряння газової суміші, приймаємо $t_1 = 0^\circ\text{C}$;

$[(Hc)_G^o]_j(t_1)$ – ідеальна вища молярна теплота згоряння j -ого компонента суміші газів залежно від температури t_1 згідно з [9].

Нижча молярна теплота згоряння газової суміші дорівнює

$$\begin{aligned} (Hc)_N(t_1) &= (Hc)_N^o(t_1) = \\ &= (Hc)_G^o(t_1) - \sum_{j=1}^N x_j \cdot \frac{b_j}{2} L^o(t_1), \end{aligned} \quad (6)$$

де b_j – число атомів водню у кожній молекулі компонента j ;

$L^o(t_1)$ – стандартна ентальпія випаровування води за температури t_1 ,

для температури $t_1 = 0^\circ\text{C}$

$$L^o(t_1) = 45,064 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

для температури $t_1 = 20^\circ\text{C}$

$$L^o(t_1) = 44,222 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} [9].$$

Вища і нижча масова теплота згоряння газової суміші за температури t_1 дорівнює відповідно

$$(Hm)_G(t_1) = (Hm)_G^o(t_1) = \frac{(Hc)_G^o(t_1)}{M}, \quad (7)$$

$$(Hm)_N(t_1) = (Hm)_M^o(t_1) = \frac{(Hc)_N^o(t_1)}{M}. \quad (8)$$

Вищу та нижчу об'ємну теплоту згоряння газової суміші як реального газу визначаємо так:

$$(Hv)_G(t_1, t_2, p_2) = \frac{(Hc)_G^o(t_1)}{V}, \quad (9)$$

$$(Hv)_N(t_1, t_2, p_2) = \frac{(Hc)_N^o(t_1)}{V}. \quad (10)$$

Вище та нижче число Воббе газової суміші як реального газу знаходимо за формулами

$$W_G(t_1, t_2, p_2) = \frac{(Hv)_G(t_1, t_2, p_2)}{\sqrt{\Delta(t_2, p_2)}}, \quad (11)$$

$$W_N(t_1, t_2, p_2) = \frac{(Hv)_N(t_1, t_2, p_2)}{\sqrt{\Delta(t_2, p_2)}}. \quad (12)$$

Для проведення газодинамічних розрахунків газових мереж необхідно визначити динамічну та кінематичну в'язкість газових сумішей за умов транспортування. Згідно з нормативним документом [8] в'язкість газової суміші при гідравлічних розрахунках розподільних газових мереж слід приймати за тиску $p_2 = 101,325 \text{ кПа}$ і температури $t_2 = 0^\circ\text{C}$.

При проведенні практичних розрахунків газових мереж динамічну в'язкість газової суміші за зазначених умов, зазвичай, обчислюють за наближеною формулою:

$$\eta(t_2, p_2) \approx \sum_{j=1}^N x_j \cdot \eta_j(t_2, p_2), \quad (13)$$

де η_j – динамічна в'язкість j -ого компонента газової суміші за зазначених вище умов.

Практичне застосування одержала така формула для динамічної в'язкості суміші газів:

$$\eta(t_2, p_2) = \frac{M}{\sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j} \cdot \quad (14)$$

Більш точною для природного газу вважають таку формулу для динамічної в'язкості газової суміші за нормальних фізичних умов

$$\eta(t_2, p_2) = \frac{\sum_{j=1}^N x_j \cdot \eta_j(t_2, p_2) \cdot \sqrt{M_j T_{крj}}}{\sum_{j=1}^N x_j \cdot \sqrt{M_j T_{крj}}}, \quad (15)$$

де $T_{кр}$ – критична температура j -ого компонента газової суміші.

Якщо попередньо визначена динамічна в'язкість газової суміші, то коефіцієнт кінематичної в'язкості за температури t_2 і тиску p_2 дорівнює

$$\nu(t_2, p_2) = \frac{\eta(t_2, p_2)}{\rho(t_2, p_2)}. \quad (16)$$

У роботі [10] пропонують такий метод обчислення динамічної в'язкості газової суміші за стандартних умов з попереднім визначенням кінематичної в'язкості компонентів

$$\nu_j(t_2, p_2) = \frac{\eta_j(t_2, p_2)}{\rho_j(t_2, p_2)}, \quad (17)$$

$$\nu(t_2, p_2) = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{x_j}{\nu_j(t_2, p_2)}}, \quad (18)$$

$$\eta(t_2, p_2) = \rho(t_2, p_2) \cdot \nu(t_2, p_2). \quad (19)$$

Для урахування впливу температури на динамічну в'язкість газів будемо застосовувати формулу Сатерленда:

$$\eta_j(t_2, p_2) = \eta_j(0^\circ C, p_0) \times \frac{273,15 + C_j}{273,15 + t_2 + C_j} \left(\frac{273,15 + t_2}{273,15} \right)^{1,5}, \quad (20)$$

де C_j – стала Сатерленда для j -ого компонента газової суміші.

Наведені вище формули, крім наближеної формули (13), не застосовувались раніше для розрахунку динамічної в'язкості газових сумішей зі значною часткою водню, тому наперед було незрозуміло, якій з них віддати перевагу. Для вирішення цього питання нами проведені розрахунки динамічної в'язкості за всіма формулами для різних концентрацій водню у газодневі суміші.

Для досліджень взято склад природного газу, який у 2022 році застосовувався при газо-

постачанні споживачів Івано-Франківської області (таблиця 1).

Таблиця 1 – Склад природного газу для проведення досліджень

Назва компонента	Об'ємна частка, %
Метан	94,1545
Етан	3,1397
Пропан	0,8704
Ізобутан	0,1224
н-Бутан	0,1389
нео-Пентан	0,0004
Ізопентан	0,0345
н-Пентан	0,0264
Генсан	0,0412
Кисень	0,0026
Азот	0,8460
Діоксид вуглецю	0,6230

На базі наведеного вище складу природного газу формувались газодневі суміші з такою об'ємною часткою водню, % : 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100.

Для кожної газодневої суміші з певною об'ємною часткою водню здійснювали перехід від об'ємних часток до молярних з урахуванням реальних властивостей газів. Після цього з використанням комп'ютерної програми виконували розрахунки властивостей газодневих сумішей згідно з наведеним вище алгоритмом. Результати обчислення тих властивостей газодневих сумішей, які необхідні для газодинамічних розрахунків газових мереж, наведено у таблицях 2-5.

Для встановлення закономірностей впливу водню на фізичні та термодинамічні властивості газодневих сумішей за даними таблиць 2-5 побудовано графічні залежності та виконано їх математичне моделювання. На рисунку 1 наведено залежність густини як реального газу за стандартних умов ($p_2 = 101,325$ кПа, $t_2 = 0^\circ C$) від об'ємної частки водню у газодневі суміші. Як свідчить рисунок 1, із збільшенням частки водню у газодневі суміші її густина за стандартних умов, розрахована як для реального газу, зменшується практично за лінійним законом.

На рисунку 2 наведено залежність вищої та нижчої об'ємної теплоти згоряння газодневої суміші за стандартних умов ($p_2 = 101,325$ кПа, $t_2 = 0^\circ C$, $t_1 = 0^\circ C$) від об'ємної частки водню.

Таблиця 2 – Результати розрахунку густини газоводневої суміші за стандартних умов

Об'ємна частка водню, %	Коефіцієнт стисливості за стандартних умов	Густина газоводневої суміші, кг/м ³ за стандартних умов	Відносна густина газоводневої суміші за стандартних умов
0	0,99730	0,76924	0,59491
5	0,99761	0,73517	0,56856
10	0,99790	0,70113	0,54223
15	0,99817	0,66711	0,51592
20	0,99843	0,63310	0,48962
30	0,99888	0,56514	0,43706
40	0,99926	0,49723	0,38454
50	0,99956	0,42936	0,33205
60	0,99978	0,36150	0,27957
70	0,99993	0,29364	0,22709
80	0,99999	0,22578	0,17461
90	0,99999	0,15788	0,12210
100	1,00060	0,08988	0,06951

Таблиця 3 – Результати розрахунку об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші за стандартних умов

Об'ємна частка водню, %	Об'ємна теплота згоряння, МДж/м ³	
	вища	нижча
0	41,22480	37,12622
5	39,79717	35,80361
10	38,37065	34,48201
15	36,94516	33,16134
20	35,52061	31,84152
30	32,67402	29,20415
40	29,83023	26,56929
50	26,98859	23,93633
60	24,14844	21,30469
70	21,30914	18,67374
80	18,47002	16,04288
90	15,63044	13,41150
100	12,78079	10,77146

Аналіз рисунка 2 засвідчує, що із збільшенням частки водню у газоводневій суміші вища та нижча об'ємна теплота згоряння суттєво зменшуються за нелінійним законом. Цю залежність можна адекватно описати поліномом другого порядку.

Рисунок 3 ілюструє одержану залежність вищого та нижчого числа Воббе газоводневої суміші за стандартних умов ($p_2 = 101,325$ кПа, $t_2 = 0$ °С, $t_1 = 0$ °С) від об'ємної частки водню. Рисунок 3 показує, що із збільшенням об'ємної частки водню у газоводневій суміші до 80 % спостерігається зниження числа Воббе за нелінійним законом, подальше збільшення частки водню призведе до деякого його зростання.

Таблиця 4 – Результати розрахунку числа Воббе газоводневої суміші за стандартних умов

Об'ємна частка водню, %	Число Воббе, МДж/м ³	
	вища	нижча
0	41,22480	37,12622
5	39,79717	35,80361
10	38,37065	34,48201
15	36,94516	33,16134
20	35,52061	31,84152
30	32,67402	29,20415
40	29,83023	26,56929
50	26,98859	23,93633
60	24,14844	21,30469
70	21,30914	18,67374
80	18,47002	16,04288
90	15,63044	13,41150
100	12,78079	10,77146

Аналіз даних таблиці 4 свідчить, що максимальні значення динамічної в'язкості газоводневих сумішей за стандартних умов ($p_2 = 101,325$ кПа, $t_2 = 0$ °С) відповідають формулі (15). Перевагою зазначеної формули є врахування критичних параметрів компонентів газової суміші. Тому для подальших досліджень використані результати обчислень динамічної в'язкості за формулою (15).

Рисунки 4 і 5 ілюструють закономірність впливу водню на кінематичну в'язкість газоводневої суміші за стандартних умов.

Таблиця 5 – Вплив об’ємної частки водню на динамічну в’язкість газоводневої суміші за стандартної температури 0 °С

Об’ємна частка водню, %	Коефіцієнт динамічної в’язкості газоводневої суміші за стандартної температури 0 °С, мкПа·с, обчислений за формулами			
	(13)	(14)	(15)	(17)-(19)
0	103,783	102,969	103,845	102,750
5	102,797	102,827	103,699	102,580
10	101,811	102,672	103,540	102,400
15	100,824	102,501	103,365	102,207
20	99,838	102,313	103,172	101,999
30	97,863	101,872	102,719	101,526
40	95,887	101,316	102,146	100,950
50	93,909	100,593	101,402	100,220
60	91,930	99,615	100,393	99,251
70	89,950	98,218	98,948	97,885
80	87,968	96,061	96,708	95,787
90	85,985	92,288	92,767	92,125
100	84,000	84,000	84,000	84,000

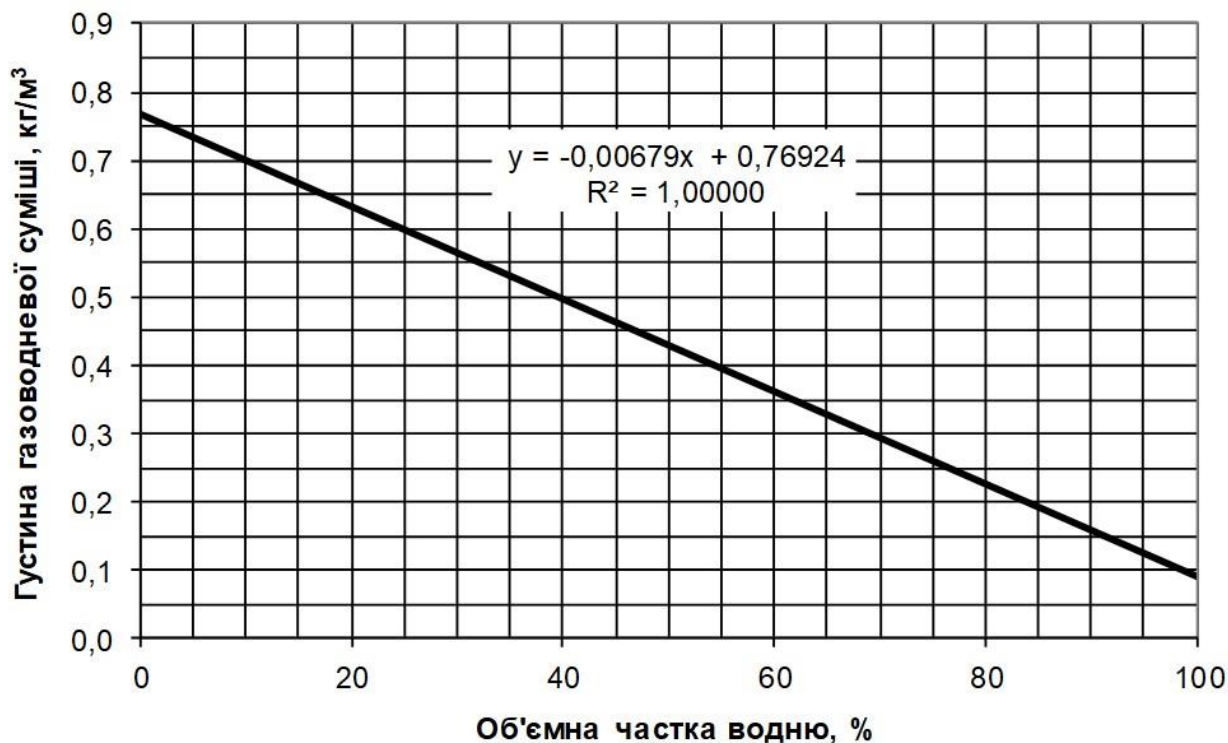


Рисунок 1 – Залежність густини як реального газу за стандартних умов від об’ємної частки водню у газоводневій суміші

Кінематична в’язкість якраз визначає газодинамічну енерговитратність транспортування газової суміші в газопроводі. Як свідчать рисунки 4 і 5, при додаванні водню до природного газу кінематична в’язкість суміші зростає нелінійно за складним законом, який можна достовірно описати поліномами другого і четвертого порядку.

Таким чином, застосування сучасних методів визначення фізичних та термодинамічних властивостей газових сумішей [9] дали можливість уточнити низку параметрів, необхідних для газодинамічних розрахунків газових мереж при транспортуванні газоводневих сумішей з різною об’ємною концентрацією водню.

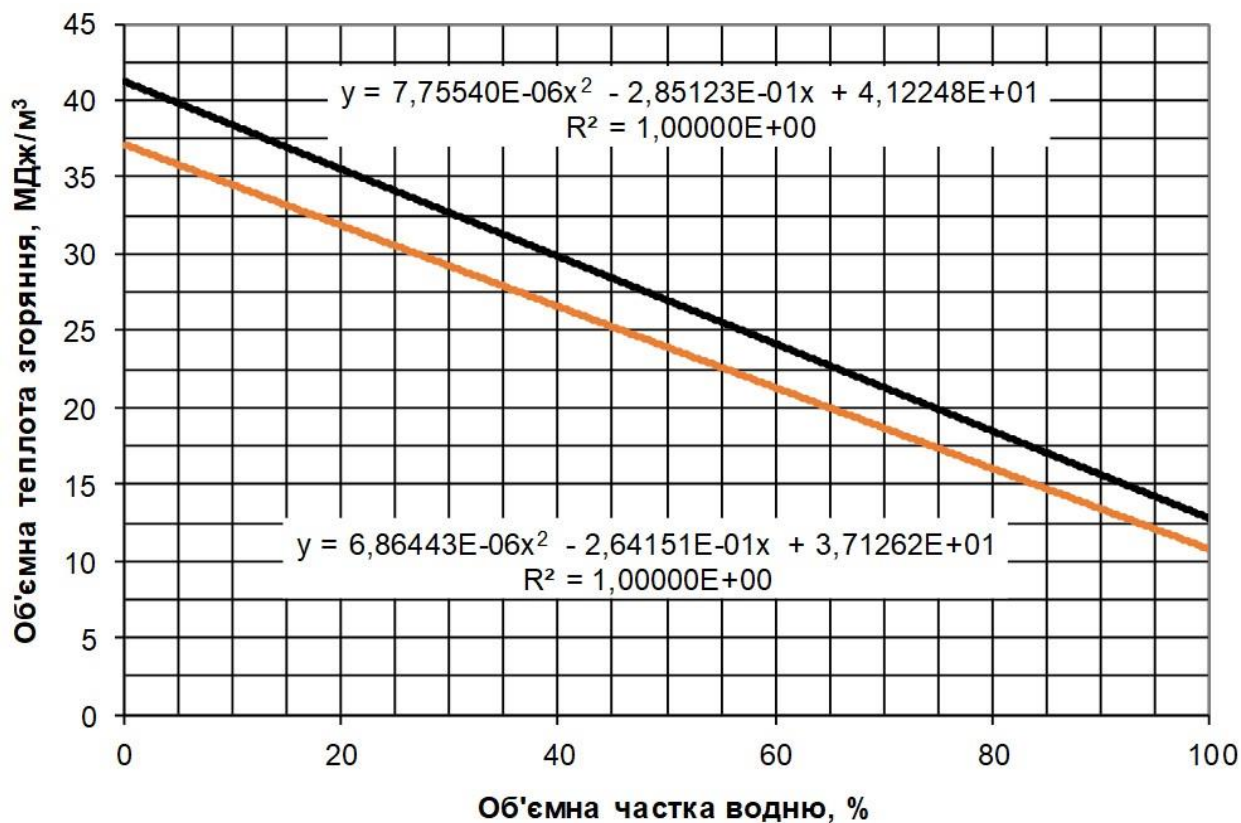
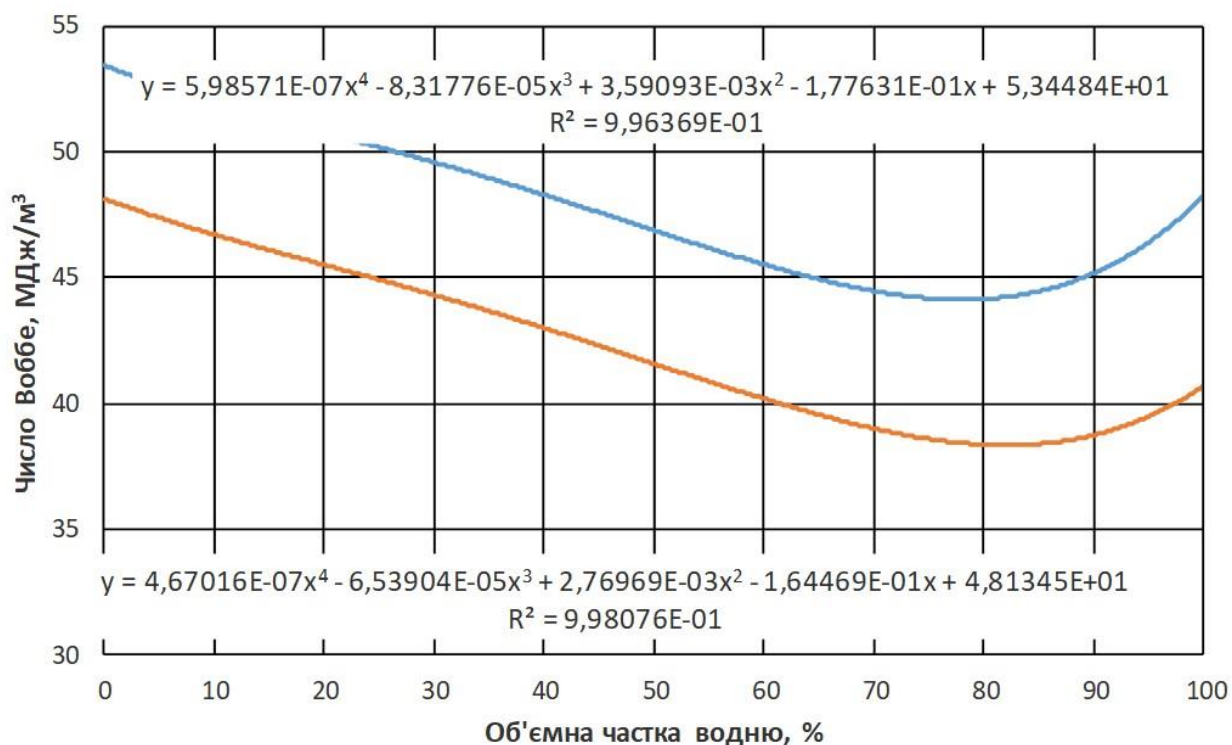


Рисунок 2 – Залежність об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші за стандартних умов від об'ємної частки водню



— Поліноміальна (вище) — Поліноміальна (нижче)

Рисунок 3 – Залежність числа Воббе газоводневої суміші за стандартних умов від об'ємної частки водню

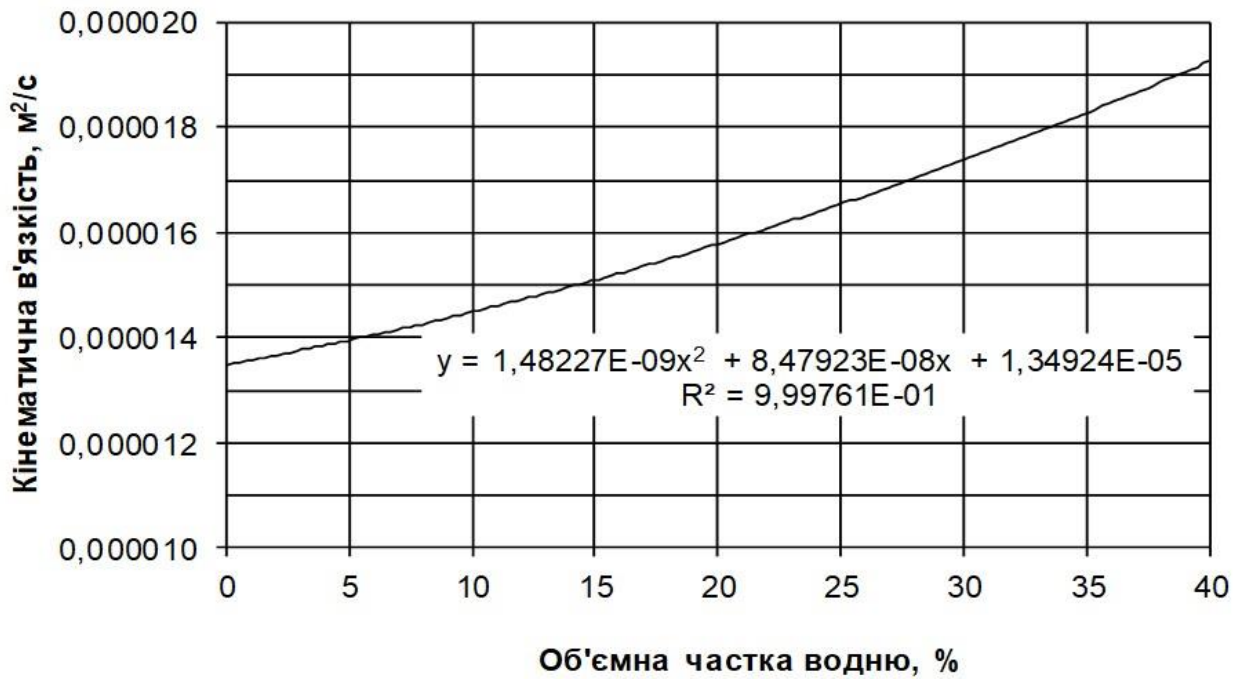


Рисунок 4 – Залежність кінематичної в'язкості газоводневої суміші за стандартних умов від об'ємної частки водню у діапазоні (0 – 40) %

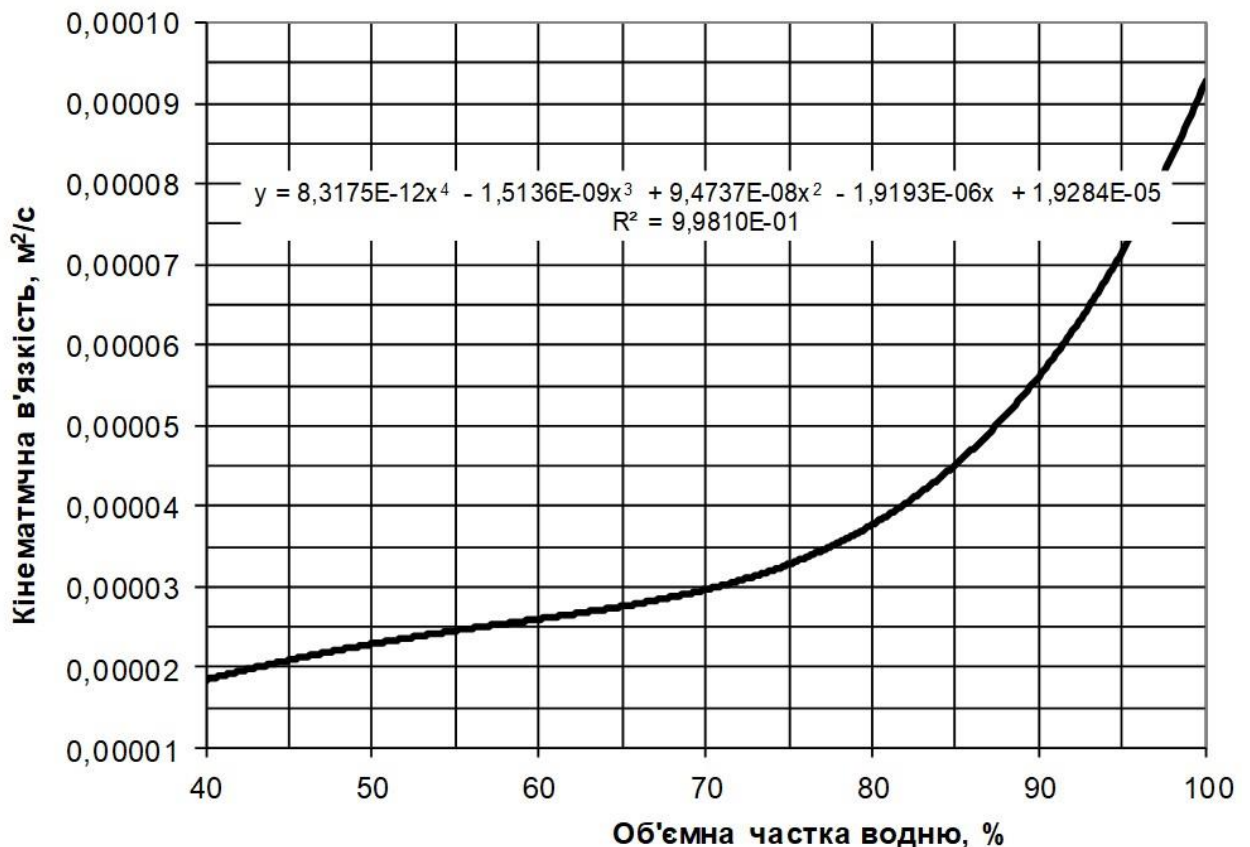


Рисунок 5 – Залежність кінематичної в'язкості газоводневої суміші за стандартних умов від об'ємної частки водню у діапазоні (40 – 100) %

Таблиця 6 – Зменшення газодинамічної енерговитратності сталевих газових мереж низького тиску за перекачування газоводневих сумішей з витратами, які були для природного газу

Об'ємна частка водню, %	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Зміна газодинамічної енерговитратності газопроводу, %	0	-3,6	-7,3	-11,0	-14,7	-22,2	-29,9	-37,8	-45,8	-54,1	-63,2	-73,3	-84,3

Підвищення достовірності прогнозування властивостей газоводневих сумішей стало базою для уточнення одержаних нами раніше результатів газодинамічної енерговитратності газових мереж низького тиску при транспортуванні газоводневих сумішей [5].

Як модельний трубопровід вибрано сталевий газопровід низького тиску діаметром 108x3 мм довжиною 100 м. Діапазон витрат газоводневих сумішей повністю перекривав можливий діапазон завантаження газопроводу. Багатоваріантні газодинамічні розрахунки сталевого газопроводу низького тиску виконано за методикою, що рекомендована чинним нормативним документом [8]. Витрату енергоносія та його властивості відповідно до вимог [8] зводили до таких стандартних умов: $p_2 = 101,325$ кПа, $t_2 = 0$ °С.

Газодинамічну енерговитратність газових мереж низького тиску оцінювали за величиною енергетичного параметра – гідравлічного нахилу [11,12]

$$I = \frac{\Delta p}{L}, \quad (21)$$

де Δp – втрати тиску від тертя в трубопроводі;

L – довжина трубопроводу.

Першим етапом досліджень було уточнення впливу концентрації водню у газоводневій суміші на газодинамічну енерговитратність газопроводу за умови збереження витрат, що мали місце для природного газу. У результаті підтверджено, що для зазначеного випадку має місце зменшення газодинамічної енерговитратності газопроводу із збільшенням об'ємної концентрації водню. Для раціонального завантаження газопроводу, якому відповідає турбулентний режим руху газоводневої суміші, відносне зменшення енергетичного параметра, порівняно з перекачуванням у газопроводі природного газу, практично не залежить від витрати, і визначається об'ємною концентрацією водню (див. таблицю 6).

При малих витратах газоводневих сумішей у газопроводі реалізується ламінарний або перехідний режими їх перекачування. При збільшенні концентрації водню у суміші відбувається зсув у бік більших витрат початку реалізації зазначених режимів у газопроводі (табл. 7).

Таблиця 7 – Витрати початку реалізації режимів перекачування газоводневих сумішей

Об'ємна частка водню, %	Витрата початку реалізації режиму перекачування	
	перехідного	турбулентного
0	7,8	15,6
5	8,2	16,3
10	8,5	17,0
15	9,0	17,9
20	9,4	18,8
30	10,5	21,0
40	11,8	23,7
50	13,6	27,2
60	16,0	32,0
70	19,5	38,9
80	24,7	49,5
90	34,0	67,8
100	54,0	107,8

Якщо витрати в газопроводі залишити такими, які були при перекачуванні природного газу, то при застосуванні газоводневих сумішей, що характеризуються меншим значенням об'ємної теплоти згоряння, споживачі не одержать необхідної кількості енергії. Для збереження енергії, яку забезпечував природний газ, доведеться збільшити витрати в газорозподільних мережах відповідно до такого виразу [5]:

$$Q_{2g} = \frac{Q_2}{\alpha_{2g}}, \quad (22)$$

де Q_2 – витрата природного газу в газопроводі;

α_{2g} – коефіцієнт зменшення вищої або нижчої об'ємної теплоти згоряння енергоносія.

Таблиця 8 містить розраховані нами коефіцієнти зменшення вищої і нижчої об'ємної теплоти згоряння газоводневих сумішей для різних об'ємних концентрацій водню.

Таблиця 8 – Коефіцієнт зменшення об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші для стандартних умов

Об'ємна частка водню, %	Коефіцієнт зменшення об'ємної теплоти згоряння	
	вищої	нижчої
0	1	1
5	0,96537	0,96438
10	0,93077	0,92878
15	0,89619	0,89321
20	0,86163	0,85766
30	0,79258	0,78662
40	0,72360	0,71565
50	0,65467	0,64473
60	0,58577	0,57384
70	0,51690	0,50298
80	0,44803	0,43212
90	0,37915	0,36124
100	0,31003	0,29013

Для кожної газоводневої суміші з певною об'ємною часткою водню виконано багатоваріантні газодинамічні розрахунки модельного газопроводу за збільшених відповідно до формули (22) і таблиці 8 витрат, які забезпечують передачу енергії, що мала місце за транспортування природного газу. Вимушене збільшення витрат для компенсації меншої теплоти згоряння спричинює зростання газодинамічної енерговитратності газопроводу низького тиску на величину, яка залежить від об'ємної частки водню у газоводневій суміші (див. таблицю 9).

Як зазначалось вище, деякі підприємства відходять від чинного нормативного документа і виконують газодинамічні розрахунки газових мереж за стандартної температури $t_2 = 20$ °С. Це об'єктивно впливає на результати газодинамічних розрахунків газових мереж.

З метою встановлення ступеня впливу зміни стандартної температури нами виконано аналогічні дослідження властивостей природного газу і газоводневих сумішей за стандартної температури $t_2 = 20$ °С. Проведено також повний комплекс газодинамічних розрахунків модельного газопроводу за перекачування газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню при збереженні витрат та енергії, що мали місце при перекачуванні природного газу.

Таблиця 9 – Зростання газодинамічної енерговитратності газових мереж при збільшенні витрат

Об'ємна частка водню, %	Збільшення газодинамічної енерговитратності газопроводу при збереженні передачі енергії, %	
	вищої	нижчої
0	0	0
5	2,7	2,9
10	5,6	6,0
15	8,6	9,2
20	11,7	12,6
30	18,4	20,0
40	25,7	28,3
50	33,7	37,4
60	42,0	47,3
70	50,0	57,7
80	56,5	67,0
90	57,5	71,6
100	41,4	59,2

Дослідження встановили, що при застосуванні стандартної температури 20 °С замість 0 °С за однакових об'ємних витрат і турбулентного режиму газодинамічна енерговитратність газопроводу низького тиску зменшиться на 4,5 % як для природного газу, так і для газоводневих сумішей незалежно від об'ємної частки водню. Таблиця 10 ілюструє величини газодинамічної енерговитратності модельного газопроводу для природного газу за однакових витрат для двох значень стандартної температури.

Таблиця 10 – Газодинамічна енерговитратність газопроводу для природного газу за різних стандартних температур

Об'ємна витрата, м ³ /год	Газодинамічна енерговитратність газопроводу, Па/м, за однакових витрат і стандартній температурі	
	0 °С	20 °С
20	0,06640	0,06377
30	0,13614	0,13063
40	0,22708	0,21769
50	0,33824	0,32397
60	0,46896	0,44880
70	0,61878	0,59173
80	0,78735	0,75238
90	0,97442	0,93050
100	1,17976	1,12585
120	1,64467	1,56761
140	2,18105	2,07658
160	2,78820	2,65199
180	3,46559	3,29327
200	4,21284	4,00000

У той же час, як показали розрахунки, зміна стандартної температури не впливає на відносну зміну газодинамічної енерговитратності газопроводу при переході від природного газу до газоводневих сумішей з будь-якою часткою водню. Тобто дані, наведені у таблицях 6 і 9, справедливі також для стандартної температури 20 °С.

Висновки

На базі сучасних методів урахування законів реального газу уточнено закономірності впливу додавання водню до природного газу на низку фізичних та термодинамічних властивостей газоводневих сумішей за стандартних умов. Встановлено, що із збільшенням частки водню у газоводневій суміші її густина за стандартних умов, розрахована як для реального газу, зменшується за лінійним законом. Залежність вищої та нижчої об'ємної теплоти згоряння газоводневої суміші від об'ємної частки водню достовірно описує поліном другого порядку.

Для розрахунку динамічної в'язкості газоводневих сумішей за стандартних умов перевагу доцільно віддавати формулі, яка враховує критичні параметри компонентів і забезпечує одержання результатів, яким відповідає максимальна прогнозована величина газодинамічної енерговитратності газових мереж. Це створить резерв тиску у процесі експлуатації систем газопостачання. При збільшенні концентрації водню у суміші її кінематична в'язкість суттєво зростає за нелінійним законом, неоднаковим для малих і великих концентрацій.

З використанням більш точних властивостей газоводневих сумішей скориговано закономірності впливу концентрації водню на газодинамічну енерговитратність газопроводу низького тиску за умови збереження витрат, що мали місце для природного газу. У результаті встановлено, що для зазначеного випадку має місце зменшення газодинамічної енерговитратності газопроводу до 84 % із збільшенням об'ємної концентрації водню до 100 %. Для раціонального завантаження газопроводу відносно зменшення енергетичного параметра, порівняно з перекачуванням природного газу, практично не залежить від витрати, і визначається об'ємною концентрацією водню.

Для збереження енергії, яку подавав газопроводом природний газ, необхідно збільшити витрати газоводневих сумішей залежно від об'ємної частки водню. Це призведе до зростання газодинамічної енерговитратності газопроводу залежно від об'ємної частки водню та

використання вищої чи нижчої об'ємної теплоти згоряння.

Встановлено, що застосування стандартної температури 20 °С замість 0 °С за однакових об'ємних витрат і турбулентного режиму спричинить зменшення газодинамічної енерговитратності газопроводу низького тиску на 4,5 % як для природного газу, так і для газоводневих сумішей. У той же час зазначена зміна стандартної температури не впливає на відносну зміну газодинамічної енерговитратності газопроводу при переході від природного газу до газоводневих сумішей з будь-якою часткою водню.

Література

1. Kevin Topolski, Evan P. Reznicek, Burcin Cakir Erdener, Chris W. San Marchi, Joseph A. Ronevich, Lisa Fring, Kevin Simmons, Omar Jose Guerra Fernandez, Bri-Mathias Hodge, and Mark Chung. Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. URL: <https://doi.org/10.2172/1893355>.
2. Transporting Pure Hydrogen by Repurposing Existing Gas Infrastructure: Overview of existing studies and reflections on the conditions for repurposing. URL: https://acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/Transporting_Pure_Hydrogen_by_Repurposing_Existing_Gas_Infrastructure_Overview_of_studies.pdf
3. Yue Su, Jingfa Li, Wangyi Guo, Yanlin Zhao, Jianli Li, Jie Zhao and Yusheng Wang Prediction of Mixing Uniformity of Hydrogen Injection in Natural Gas Pipeline Based on a Deep Learning Model. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8694>.
4. Проект дорожньої карти для виробництва та використання водню в Україні. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/Hydrogen_Roadmap_Draft_Report_UKR_March_2021.pdf
5. 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. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-1-6822>.
6. 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. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-2-6887>.
7. Середюк М. Д. Особливості газодинамічного розрахунку внутрішніх газових мереж при застосуванні газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2021.

№ 11 (111). С. 73–80. DOI: [10.25313/2520-2057-2021-11-7484](https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-11-7484).

8. ДБН В.2.5-20-2018. Газопостачання.

9. ДСТУ EN ISO 6976:2020 Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу.

10. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: Сімик, 2006. 313 с.

11. 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).

12. Середюк М. Д. Проектування та експлуатація газових мереж: навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. 144 с. ISBN 978-966-694-409-5.

References

1. Kevin Topolski, Evan P. Reznicek, Burcin Cakir Erdener, Chris W. San Marchi, Joseph A. Ronevich, Lisa Fring, Kevin Simmons, Omar Jose Guerra Fernandez, Bri-Mathias Hodge, and Mark Chung. Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. URL: <https://doi.org/10.2172/1893355>.

2. Transporting Pure Hydrogen by Repurposing Existing Gas Infrastructure: Overview of existing studies and reflections on the conditions for repurposing. URL: https://acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/Transporting_Pure_Hydrogen_by_Repurposing_Existing_Gas_Infrastructure_Overview_of_studies.pdf

3. Yue Su, Jingfa Li, Wangyi Guo, Yanlin Zhao, Jianli Li, Jie Zhao and Yusheng Wang Prediction of Mixing Uniformity of Hydrogen Injection in Natural Gas Pipeline Based on a Deep Learning Model. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8694>.

4. Proekt dorozhnoi karty dlia vyrobnytstva ta vykorystannia vodniu v Ukrayini. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/Hydrogen_Roadmap_Draft_Report_UKR_March_2021.pdf [in Ukrainian]

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

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

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

8. DBN V.2.5-20-2018. Hazopostachannia. [in Ukrainian]

9. DSTU EN ISO 6976:2020 Pryrodnyi haz. Obchyslennia teploty zghoriannia, hustyny, vidnosnoi hustyny ta chysla Vobbe na osnovi komponentnoho skladu. [in Ukrainian]

10. Honcharuk M. I., Serediuk M. D., Sheludchenko V. I. Dovidnyk z hazopostachannia naselenykh punktiv Ukrainy. Ivano-Frankivsk: Simyk, 2006. 313 p. [in Ukrainian]

11. 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]

12. Serediuk M. D. Proiektuvannya ta ekspluatatsiia hazovykh merezh: navch. posib. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2022. 144 p. ISBN 978-966-694-409-5. [in Ukrainian]