

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

доктор технических наук,

профессор кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Serediuk Mariia

Doctor of Technical Sciences,

Professor of the Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ГАЗОДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ
НИЗЬКОГО ТИСКУ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗО-ВОДНЕВИХ
СУМІШЕЙ**

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВЫХ
СЕТЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ
ГАЗО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ**

**GAS DYNAMIC OPERATING MODES OF LOW PRESSURE GAS
NETWORKS DURING TRANSPORT GAS-HYDROGEN MIXTURES**

Анотація. Шляхом математичного моделювання знайдено закономірності зміни фізико-хімічних властивостей, необхідних для розрахунків газових мереж низького тиску, для газо-водневих сумішей з об'ємною часткою водню від нуля до 100 %. Встановлені закономірності газодинамічних розрахунків сталевих газових мереж низького тиску у разі

транспортування газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню при збереженні витрат та енергосмності елементів системи газопостачання, характерних для транспортування природного газу.

Ключові слова: природний газ, водень, газо-воднева суміш, газопровід низького тиску, нижча об'ємна теплота згорання, витрата, втрати тиску від тертя.

Аннотація. Путем математического моделирования установлены закономерности изменения физико-химических свойств, необходимых для расчетов газовых сетей низкого давления, для газо-водородных смесей с объемной долей от нуля до 100 %. Установлены закономерности газодинамических расчетов стальных газовых сетей низкого давления при транспортировании газо-водородных смесей с различной объемной долей водорода при сохранении расхода и теплоемкости элементов системы газоснабжения, характерных для транспортирования природного газа.

Ключевые слова: природный газ, водород, газо-водородная смесь, газопровод низкого давления, низшая объемная теплота сгорания, расход, потери давления от трения

Summary. By means of mathematical modeling the patterns of change the physical and chemical properties, necessary for calculations the gas networks of low pressure, for gas-hydrogen mixtures with volume fraction of hydrogen from zero to 100 % were found. The regularities of gas-dynamic calculations of low-pressure steel gas networks in the case of transportation of gas-hydrogen mixtures with different volume fraction of hydrogen while maintaining the costs and energy consumption of the elements of the gas supply system, typical for the transportation of natural gas were established.

Key words: natural gas, hydrogen, gas-hydrogen mixture, low gas pipeline pressure, lower volumetric heat of combustion, flow, pressure loss from friction.

Вступ. Ще п'ятдесят років тому в США з'явився термін "воднева економіка" – тобто економіка, в основі якої лежить використання водню як основного джерела енергії [1]. Сьогодні, коли наслідки глобальних змін клімату досягли значних масштабів, низка країн декларувала рух до декарбонізації економіки, насамперед, шляхом сприяння розвитку технологій генерації електроенергії із відновлюваних джерел. Зниження вартості одержання енергії із відновлюваних джерел зробило дешевшим виробництво «зеленого водню». Якраз водень може стати одним із основних напрямків успішної реалізації «Європейської зеленої угоди», ухваленої країнами ЄС. Для цього необхідно відшукувати шляхи зменшення вартості виробництва, удосконалення технологій транспортування, зберігання і застосування водню у всіх сферах економіки [1].

Як свідчать результати проектів, що реалізуються у світі, додавання до природного газу від 1 % до 20 % (технологія power-to-gas) не вимагає модернізації газотранспортних систем, у той же час сприяє зменшенню викидів вуглецю. Приклади реалізації зазначеної технології є у Франції, Великобританії, Німеччині та інших країнах Європи [1].

Найдешевшим способом транспортування як водню, так і сумішей природного газу з воднем, є трубопроводи. В 2020 р. газові компанії з дев'яти країн ЄС презентували план створення мережі транспортування водню European Hydrogen Backbone. На 75 % зазначена мережа буде складатися із переобладнаних газопроводів. Ця мережа трубопроводів потрібна для транспортування «зеленого» водню, виробленого в ЄС, а також для імпорту водню з-за меж Європи. До 2030 р. передбачається, що потужність станцій для генерації «зеленого» водню на території країн ЄС досягне

40 ГВт. Ще 40 ГВт потужностей планують одержати з інших країн, із них 10 ГВт пропонують реалізувати Україні [2].

За оцінками експертів, Україна має другий у Європі потенціал відновлюваної енергетики. Чотири області - Херсонська, Одеська, Миколаївська і Запорізька – здатні забезпечити половину потреб країн Євросоюзу в енергії. Вважається, що газотранспортна система України може бути придатна для транспортування газової суміші з вмістом до 20 % водню [3].

Протягом двох останніх років в Україні проводять дослідження можливості використання існуючих газових мереж для транспортування газо-водневих сумішей. На п’яти полігонах у Житомирській, Івано-Франківській, Дніпропетровській, Волинській та Харківській областях виконують комплексні дослідження поведінки водню у газорозподільній системі України. Проект унікальний тим, що для експериментів використали суміш, що містить 99 % водню. Перший етап досліджень засвідчив, що газопроводи, які забезпечують герметичність при транспортуванні природного газу, не можна застосовувати для транспортування водню, оскільки за 14 діб виявлено втрати 46 % початкового тиску [4]. На наступних етапах досліджень концентрацію водню у суміші планують знижувати. Кінцева мета досліджень – встановлення можливості застосування газових мереж низького і середнього тиску для транспортування газо-водневих сумішей з точки зору забезпечення герметичності системи, нормального режиму експлуатації технологічного обладнання газорегуляторних пунктів, приладів обліку витрати енергоносія, газових приладів споживачів тощо [4].

У той же на сьогодні не встановлено, як залежать фізико-хімічні властивості енергоносія від концентрації водню в газо-водневій суміші, як зміниться газодинамічна енерговитратність газових мереж при транспортуванні газо-водневої суміші. Висвітленню зазначених питань стосовно газових мереж низького тиску із сталевих труб присвячена дана робота.

Мета роботи – встановлення впливу об'ємної концентрації водню на основні фізико-хімічні властивості та газодинамічну енерговитратність енергоносія (газо-водневої суміші) в умовах газових мереж низького тиску із сталевих труб.

У процесі експлуатації газових мереж первинною інформацією щодо енергоносія, зазвичай, є склад природного газу в об'ємних частках за результатами лабораторних досліджень. Фізико-хімічні властивості газо-водневої суміші, які необхідні для проведення газодинамічних розрахунків газових мереж, визначаємо за методикою, як наведена у [5].

Переходимо від об'ємних часток j -го компонента газо-водневої суміші y_j до молярних x_j за формулою

$$x_j = \frac{\frac{y_j}{z_j}}{\sum_{j=1}^N \frac{y_j}{z_j}}, \quad (1)$$

де z_j - коефіцієнт стисливості j -го компонента;

N - кількість компонентів суміші.

Реальні властивості енергоносія враховуємо шляхом введення коефіцієнта стисливості суміші газів

$$z_{mix} = 1 - \left[\sum_{j=1}^N (x_j \cdot \sqrt{b_j}) \right]^2, \quad (2)$$

де b_j - коефіцієнт відхилення j -го компонента від закону ідеального газу згідно з [5].

Густина енергоносія, як реального газу, дорівнює

$$\rho = \frac{p}{z_{mix} RT} \cdot \sum_{j=1}^N (x_j \cdot M_j), \quad (3)$$

де p - абсолютний тиск енергоносія в газопроводі;

R - універсальна газова стала, $R = 8,31451$ Дж/(моль · К);

T - термодинамічна температура енергоносія;

M_j - молярна маса j -го компонента.

Згідно з ДБН В.2.5-20-2018 [6], при проектуванні та експлуатації газових мереж населених пунктів фізико-хімічні властивості газу і газодинамічні параметри експлуатації газопроводів повинні відповідати нормальним фізичним умовам, а саме абсолютному тиску $p_n=101325$ Па і температурі $t_n=0$ °С (термодинамічна температура $T_n = 273,15$ К).

Розрахункова формула для густини енергоносія за нормальних фізичних умов набуває вигляду

$$\rho_n = \frac{p_n}{z_{mix} \cdot R \cdot T_n} \sum_{j=1}^N (x_j \cdot M_j). \quad (4)$$

Нижчу об'ємну теплоту згорання енергоносія, як реального газу, знаходимо за формулою

$$\tilde{H} = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j \cdot \tilde{H}_j^\circ)}{z_{mix}}, \quad (5)$$

де \tilde{H}_j° - значення ідеальної нижчої об'ємної теплоти згорання j -го компонента згідно з [5].

Динамічну в'язкість енергоносія за нормальних фізичних умов обчислюємо за формулою

$$\eta_{n_{mix}} = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \eta_{n_j}, \quad (6)$$

де η_{n_j} - значення динамічної в'язкості j -го компонента за нормальних фізичних умов.

Кінематичну в'язкість енергоносія за нормальних фізичних умов знаходимо так:

$$\nu_{n_{mix}} = \frac{\eta_{n_{mix}}}{\rho_{n_{mix}}}. \quad (7)$$

Гідравлічний розрахунок газових мереж виконуємо за методикою, яка рекомендована [6]. Втрати тиску від тертя у газових мережах низького тиску Δp обчислюємо залежно від режиму руху газу, що характеризується числом Рейнольдса

$$Re = 0,0354 \frac{Q_n}{d \cdot v_n}, \quad (8)$$

де Q_n - витрата газу у газопроводі за нормальних фізичних умов (абсолютному тиску 101325 Па і температурі 0 °С), м³/год;
 d - внутрішній діаметр газопроводу, см.

Для ламінарного режиму руху газу за виконання умови $Re \leq 2000$ втрати тиску від тертя (Па)

$$\Delta p = 1,132 \cdot 10^6 \frac{Q_n}{d^4} v_n \rho_n l, \quad (9)$$

для критичного режиму руху газу за виконання умови $2000 < Re < 4000$

$$\Delta p = 0,516 \frac{Q_n^{2,333} \rho_n l}{d^{5,333} v_n^{0,333}}, \quad (10)$$

для турбулентного режиму руху газу за виконання умови $Re > 4000$

$$\Delta p = 69 \cdot \left(\frac{k_e}{d} + 1922 \frac{v_n d}{Q_n} \right)^{0,25} \cdot \frac{Q_n^2 \rho_n l}{d^5}, \quad (11)$$

де k_e - абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби, для сталевих труб $k_e = 0,01$ см, для поліетиленових труб $k_e = 0,002$ см [6];

l - довжина газопроводу, м.

Дослідження проведені для природного газу, склад компонентів якого в об'ємних частках наведено у таблиці 1. Числові значення властивостей індивідуальних компонентів газо-водневої суміші відповідають [5].

Склад природного, наведений у таблиці 1, відповідає фактичному складу природного газу, що використовувався для газопостачання споживачів Івано-Франківської області в листопаді 2019 року.

Таблиця 1

Склад природного газу для проведення досліджень

Назва компонента	Об'ємна частка, %	Молярна маса, кг/кмоль	Нижча об'ємна теплота згорання, МДж/м ³	Коефіцієнт стисливості	Коефіцієнт підсумовування $\sqrt{b_j}$
Метан	96,2726	16,043	35,818	0,9976	0,0490
Етан	2,0436	30,070	63,760	0,9900	0,1000
Пропан	0,6251	44,097	91,180	0,9789	0,1453
ізо-Бутан	0,0945	58,123	118,610	0,9572	0,2069
н-Бутан	0,0893	58,123	118,610	0,9572	0,2069
нео-Пентан	0,0015	72,150	146,000	0,9180	0,2864
ізо-Пентан	0,0163	72,150	146,000	0,9180	0,2864
н-Пентан	0,0109	72,150	146,000	0,9180	0,2864
Генсан	0,0095	86,177	173,450	0,8920	0,3286
Кисень	0,0064	31,999	0,000	0,9990	0,0316
Азот	0,6709	28,014	0,000	0,9995	0,0224
Діоксид вуглецю	0,1594	44,010	0,000	0,9933	0,0819
Водень	0,000	2,0159	10,777	1,0006	-0,0040

Слід зазначити, що склад природного газу, що використовується для газопостачання конкретного споживача, не є величиною сталою, він весь час змінюється. Але за умови одержання газу з певного джерела (магістрального газопроводу, газового промислу) зміни складу компонентів у часі не є швидкоплинними і суттєвими.

Спочатку розрахунки фізико-хімічних властивостей проведемо для природного газу, що не містить водню. Далі моделюємо газові суміші, що містять певний відсоток водню за об'ємом y_{H_2} , решту – природний газу із вихідними компонентами, об'ємні частки яких скориговано за формулою

$$y_j = (1 - y_{H_2}) y_{j_g}, \quad (12)$$

де y_{jg} - об'ємна частка j -го компонента у вихідному природному газі.

При проведенні досліджень об'ємну частку водню в газо-водневій суміші змінювали від 0 до 100 % з кроком 10 %. Багатоваріантні розрахунки за формулами (1)-(12) виконували за спеціально розробленою комп'ютерною програмою.

Таблиця 2 містить результати обчислення фізико-хімічних властивостей газо-водневої суміші, які необхідні для проведення газодинамічних розрахунків газових мереж, за різної об'ємної частки водню.

Таблиця 2

Фізико-хімічні властивості газо-водневої суміші за різної об'ємної частки водню

Частка водню у суміші, %	Густина суміші за нормальних умов, кг/м ³	Динамічна в'язкість суміші за нормальних умов, Па·с	Кінематична в'язкість суміші за нормальних умов, м ² /с	Нижча об'ємна теплота згорання суміші за нормальних умов, МДж/м ³
0	0,749	$1,028 \cdot 10^{-5}$	$1,373 \cdot 10^{-5}$	36,749
10	0,683	$1,009 \cdot 10^{-5}$	$1,478 \cdot 10^{-5}$	34,145
20	0,617	$9,896 \cdot 10^{-6}$	$1,604 \cdot 10^{-5}$	31,543
30	0,551	$9,702 \cdot 10^{-6}$	$1,761 \cdot 10^{-5}$	28,944
40	0,485	$9,508 \cdot 10^{-6}$	$1,960 \cdot 10^{-5}$	26,346
50	0,419	$9,313 \cdot 10^{-6}$	$2,222 \cdot 10^{-5}$	23,750
60	0,353	$9,119 \cdot 10^{-6}$	$2,580 \cdot 10^{-5}$	21,156
70	0,288	$8,924 \cdot 10^{-6}$	$3,104 \cdot 10^{-5}$	18,561
80	0,222	$8,730 \cdot 10^{-6}$	$3,938 \cdot 10^{-5}$	15,967
90	0,156	$8,535 \cdot 10^{-6}$	$5,477 \cdot 10^{-5}$	13,373
100	0,090	$8,340 \cdot 10^{-6}$	$9,273 \cdot 10^{-5}$	10,777

За даними таблиці 2 побудовано графічні залежності густини, динамічної і кінематичної в'язкості, а також нижчої об'ємної теплоти згорання енергоносія від об'ємної частки водню (рисунки 1-5) та виконано їх математичне моделювання засобами Microsoft Excel.

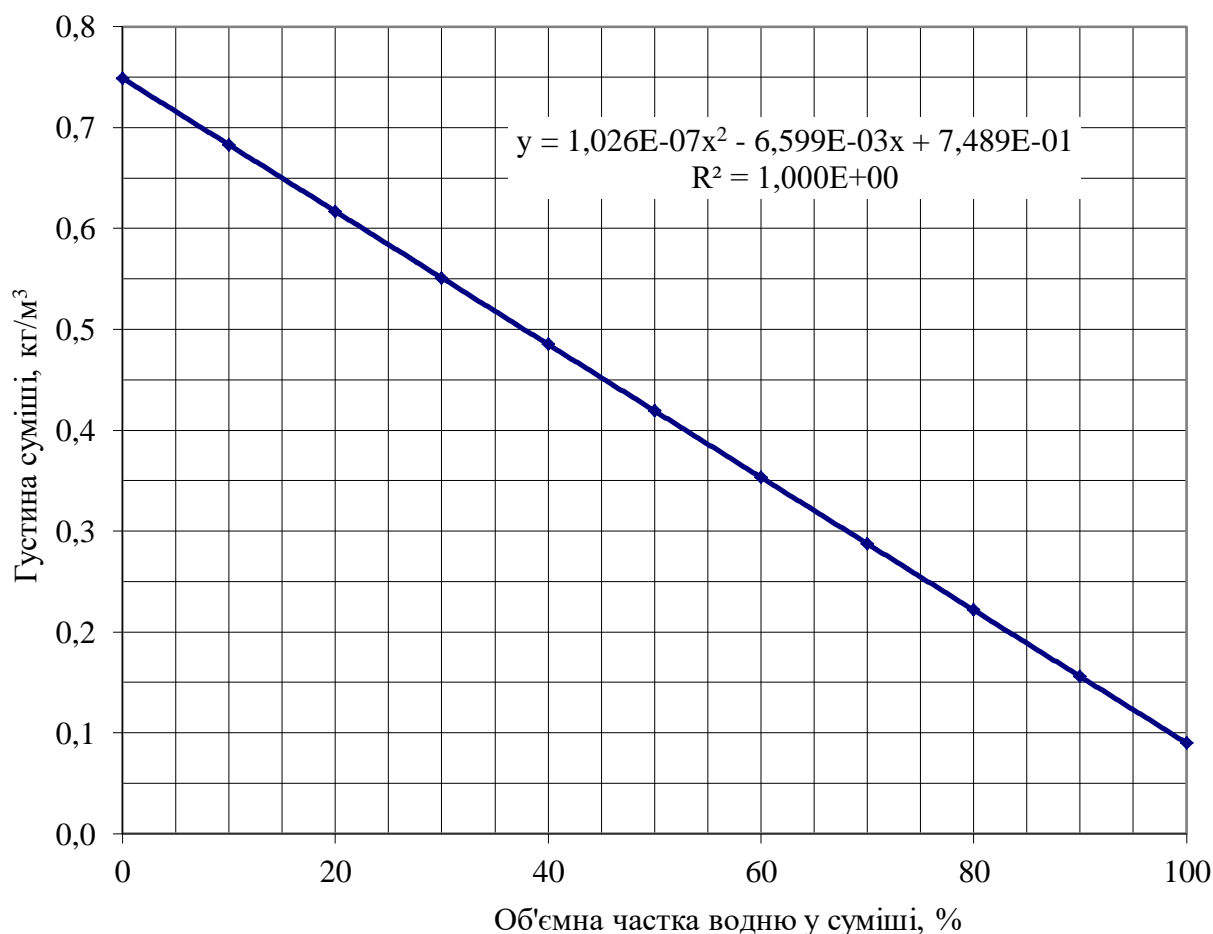


Рис. 1. Залежність густини газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню

Як свідчить дані таблиці 1, при збільшенні об'ємної частки водню від нуля до 100 % відносна густина газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов суттєво змінюється від значення $0,749 \text{ кг/м}^3$ до $0,090 \text{ кг/м}^3$, тобто зменшується у 8,3 рази.

Залежність густини газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню з вірогідністю апроксимації $R^2 = 1$ можна описати поліноміальною функцією другого порядку (див. рис. 1).

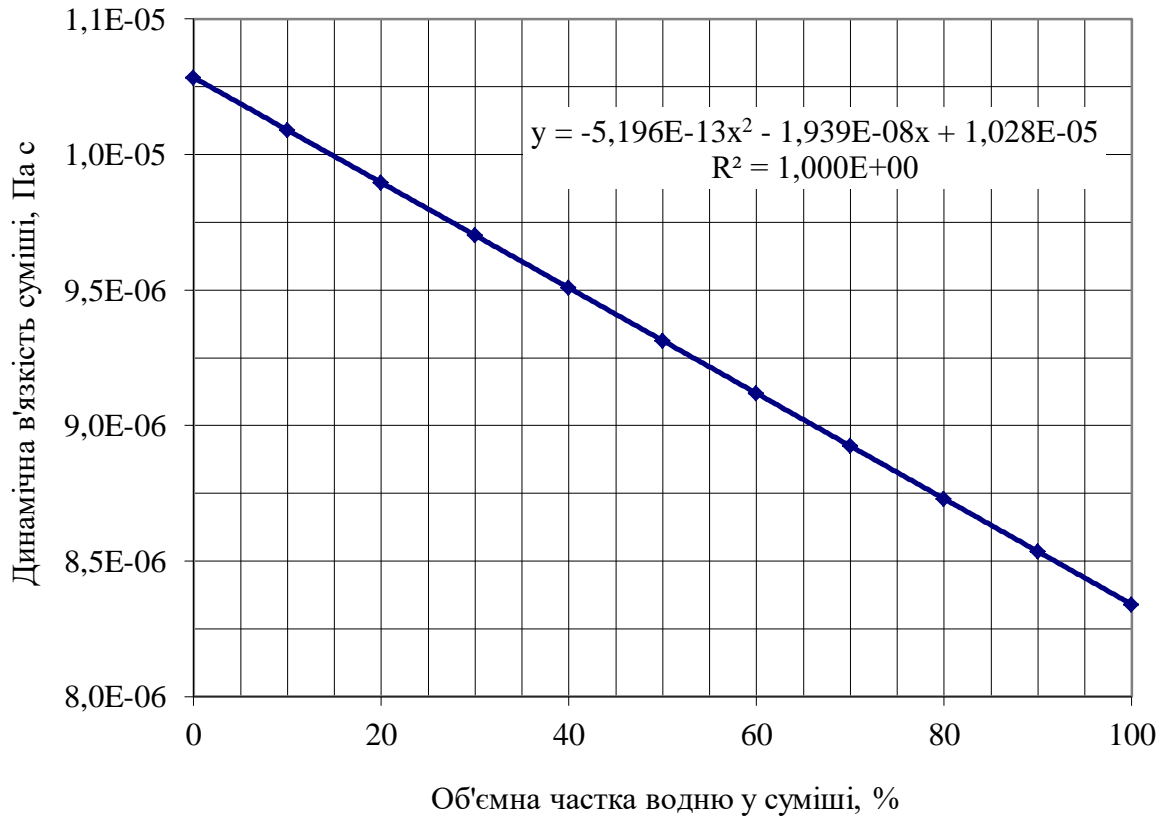


Рис. 2. Залежність динамічної в'язкості газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню

Як свідчить дані таблиці 1, при збільшенні об'ємної частки водню від нуля до 100 % динамічна в'язкість газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов несуттєво змінюється від значення $1,028 \cdot 10^{-5}$ Па·с до значення $8,340 \cdot 10^{-6}$ Па·с, тобто зменшується у 1,2 рази.

Залежність динамічної в'язкості газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню з вірогідністю апроксимації $R^2 = 1$ також можна описати поліноміальною функцією другого порядку (див. рис. 2).

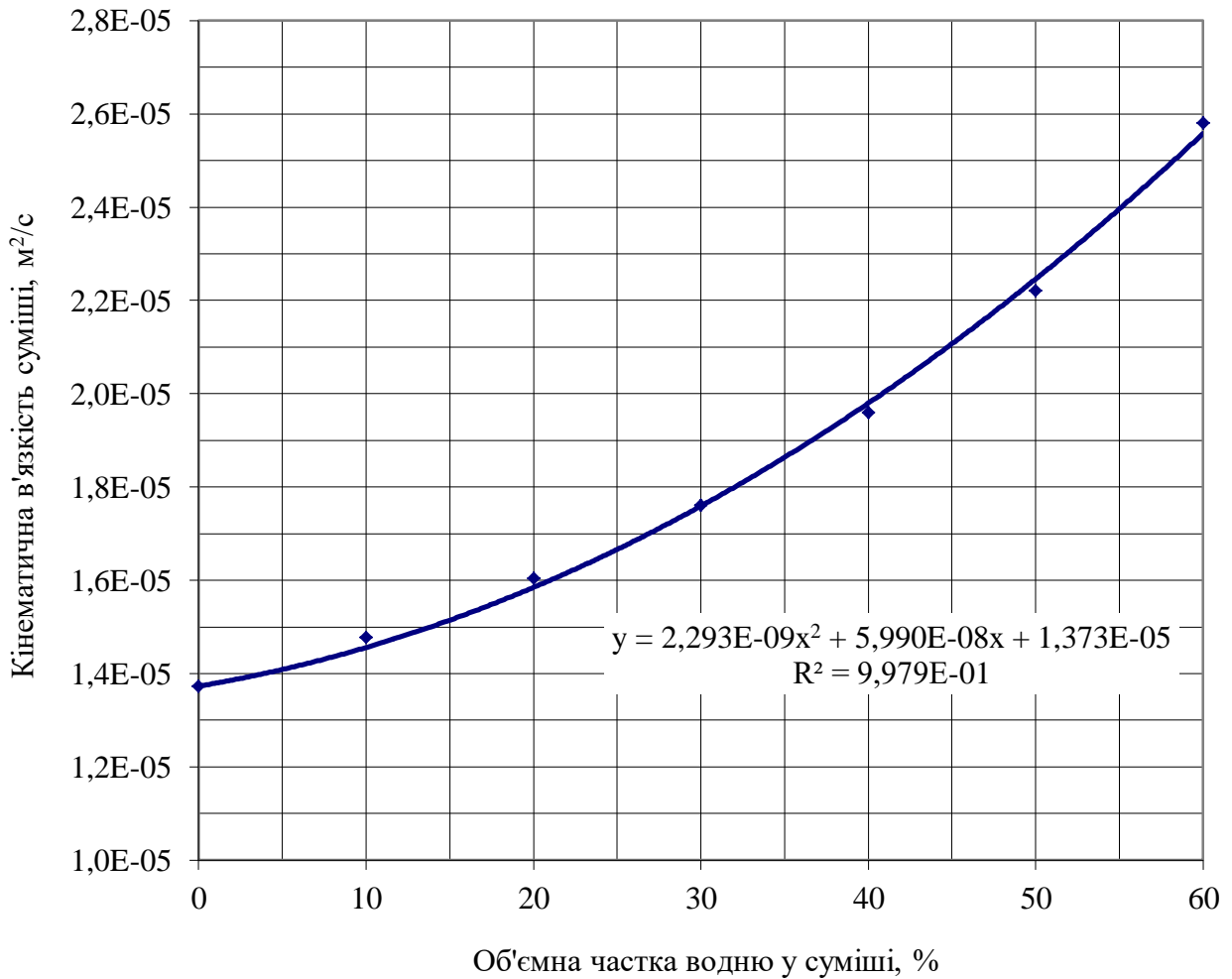


Рис. 3. Залежність кінематичної в'язкості газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню (діапазон 0 % - 60 %)

Як свідчить дані таблиці 1, при збільшенні об'ємної частки водню від нуля до 100 % кінематична в'язкість газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов суттєво змінюється від значення $1,373 \cdot 10^{-5}$ м²/с до значення $9,273 \cdot 10^{-5}$ м²/с, тобто зростає у 6,8 разів.

Встановлено неоднакову інтенсивність зростання кінематичної в'язкості суміші при додавання до неї водню. Тому діапазон об'ємної частки водню у суміші розбиваємо на дві частини: перша від 0 % до 60 %; друга від 60 % до 100 %. Із рисунка 3 випливає, що залежність кінематичної в'язкості газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню від 0 % до 60 % з вірогідністю апроксимації

$R^2 = 0,998$ можна описати поліноміальною залежністю другого порядку. У той же час для діапазону зміни об'ємної частки водню від 60 % до 100 % для опису аналогічної залежності доцільно застосувати поліноміальну залежність третього порядку (див. рис. 4).

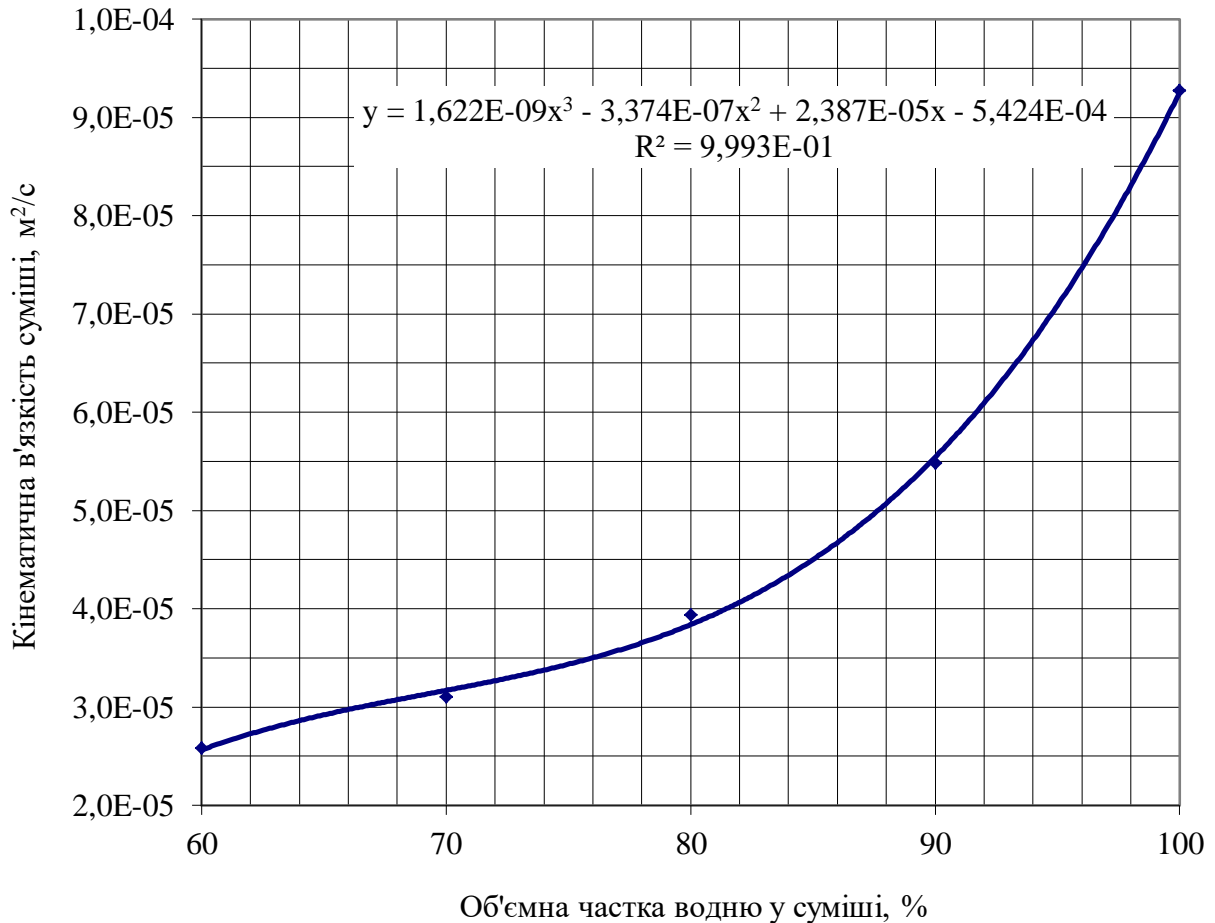


Рис. 4. Залежність кінематичної в'язкості газу-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню (діапазон 60 % -100 %)

Як свідчить дані таблиці 1, при збільшенні об'ємної частки водню від нуля до 100 % нижча об'ємна теплота згорання газу-водневої суміші за нормальних умов суттєво змінюється від значення 36,749 МДж/м³ до значення 10,777 МДж/м³, тобто зменшується у 3,4 рази.

Залежність нижчої об'ємної теплоти згорання газу-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню з вірогідністю

апроксимації $R^2 = 1$ можна описати поліноміальною функцією другого порядку (див. рис. 5).

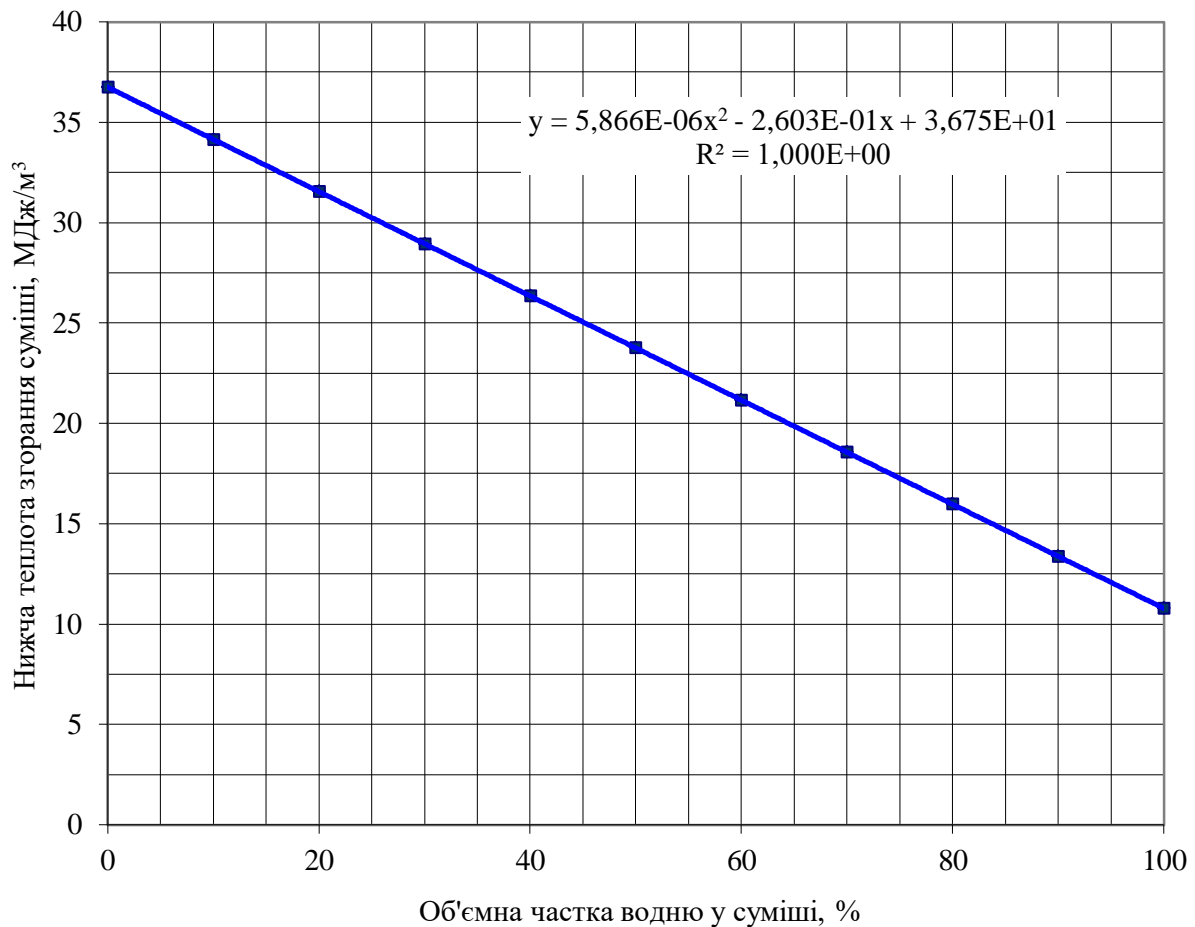


Рис. 5. Залежність нижчої об'ємної теплоти згорання газу-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню

Зниження величини нижчої об'ємної теплоти згорання газу-водневої суміші зменшує кількість енергії, що подається споживачу за певного значення об'ємної витрати у газопроводі. Введемо поняття коефіцієнта зменшення енергоємності газу-водневої суміші за умовою

$$\alpha_e = \frac{\tilde{H}}{\tilde{H}_g}, \quad (13)$$

де \tilde{H}_g - значення нижчої об'ємної теплоти згорання природного газу, основи газу-водневої суміші.

Результати розрахунку коефіцієнта зменшення енергоємності газо-водневої суміші для випадку, що розглядається, наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Коефіцієнт зменшення енергоємності газо-водневої суміші з різною об'ємною часткою водню

Об'ємна частка водню у суміші, %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Коефіцієнт зменшення енергоємності	1,000	0,929	0,858	0,788	0,717	0,646	0,576	0,505	0,434	0,364	0,293

Після визначення розрахункових величин густини і кінематичної в'язкості газо-водневої суміші для кожного складу суміші, що характеризується певним значенням об'ємної частки водню, за формулами (8)-(11) виконувався газодинамічний розрахунок газопроводу. Він полягав в знаходженні втрат тиску від тертя за заданого значення витрати енергоносія у трубопроводі. Діапазон витрат приймався таким, щоб дослідити різні режими руху газо-водневої суміші від ламінарного до турбулентного.

Як модельний трубопровід вибрано стандартний сталевий газопровід із зовнішнім діаметром 108 мм, товщиною стінки 3 мм і довжиною 1000 м. Труби зазначеного діаметра широко застосовують в газових мережах низького тиску населених пунктів [7].

За результатами багатоваріантних обчислень побудовано графічні залежності втрат тиску у газопроводі від витрати газо-водневої суміші за різних значень об'ємної частки водню (рис. 6).

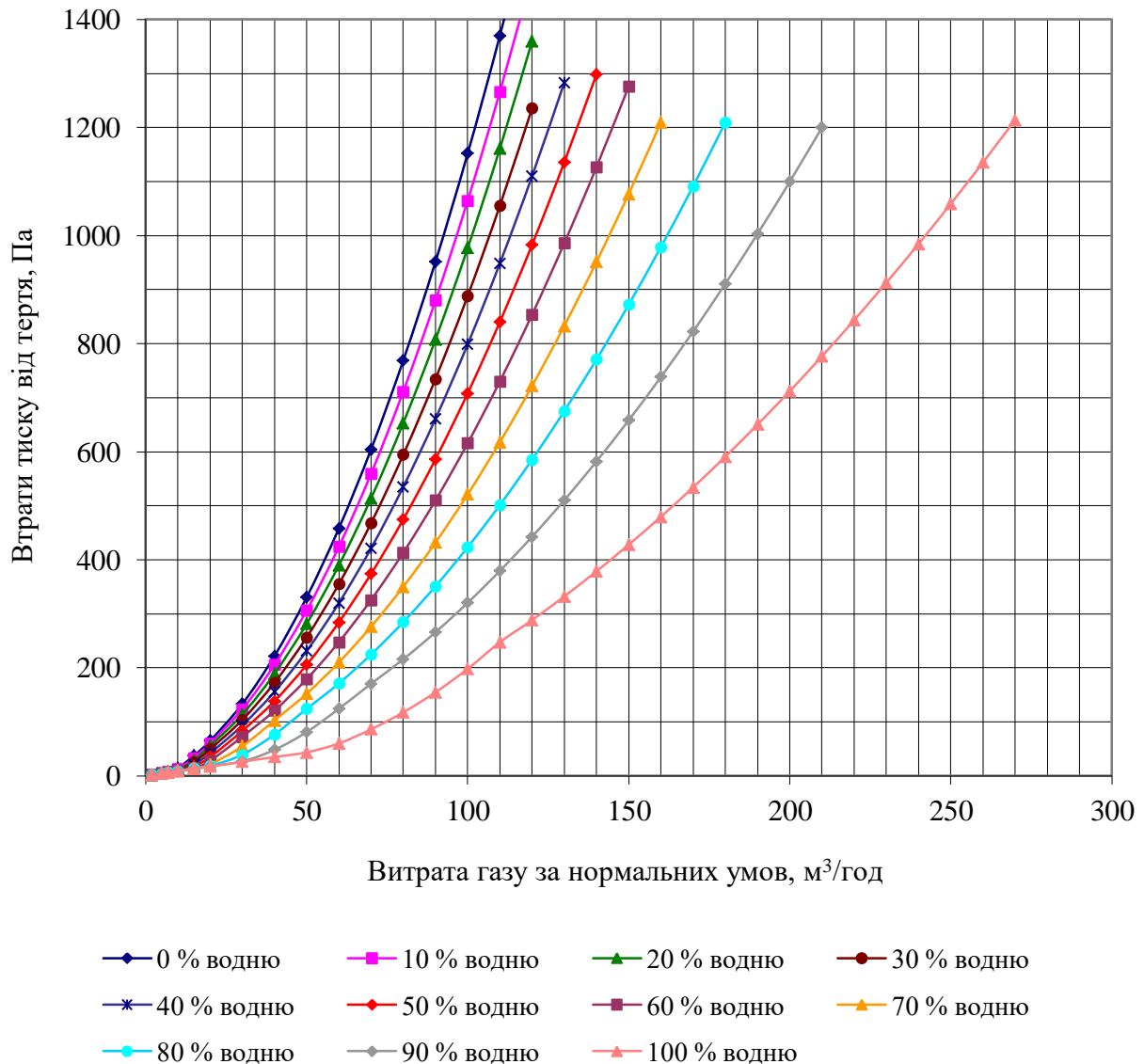


Рис. 6. Залежність втрат тиску від витрати газо-водневої суміші у трубопроводі за різних значень об'ємної частки водню

За нормального завантаження системи газопостачання зовнішні газові мережі низького тиску працюють за турбулентного режиму і чисел Рейнольдса, більших за 4000. Використовуючи результати газодинамічних розрахунків, знаходимо відносне зменшення втрат тиску у модельному газопроводі при транспортуванні за турбулентного режиму у широкому діапазоні витрат газо-водневої суміші з різною об'ємною часткою водню.

Шляхом математичного моделювання встановлено, що за турбулентного режиму руху газо-водневої суміші в модельному

трубопроводі для діапазону витрат, що відповідає нормативному завантаженню газових мереж низького тиску, відносне зменшення втрат тиску, порівняно з транспортуванням природного газу, практично не залежить від витрати і становить (див. табл. 4 та рис. 7).

Таблиця 4

Відносне зменшення втрат тиску у модельному газопроводі при транспортуванні за турбулентного режиму газо-водневої суміші з витратою, що мала місце для природного газу

Об'ємна частка водню у суміші, %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Відносне зменшення втрат тиску, %	0	7,5	15,0	22,6	30,3	38,2	46,2	54,9	63,3	72,1	82,6

Якщо газова мережа низького тиску раніше транспортувала природний газ, а тепер переводиться на транспортування газо-водневої суміші, яка характеризується меншим значенням нижчої об'ємної теплоти згорання, то для забезпечення подавання необхідної кількості енергії споживачам потрібно збільшити розрахункову об'ємну витрату газу в кожному елементі системи газопостачання.

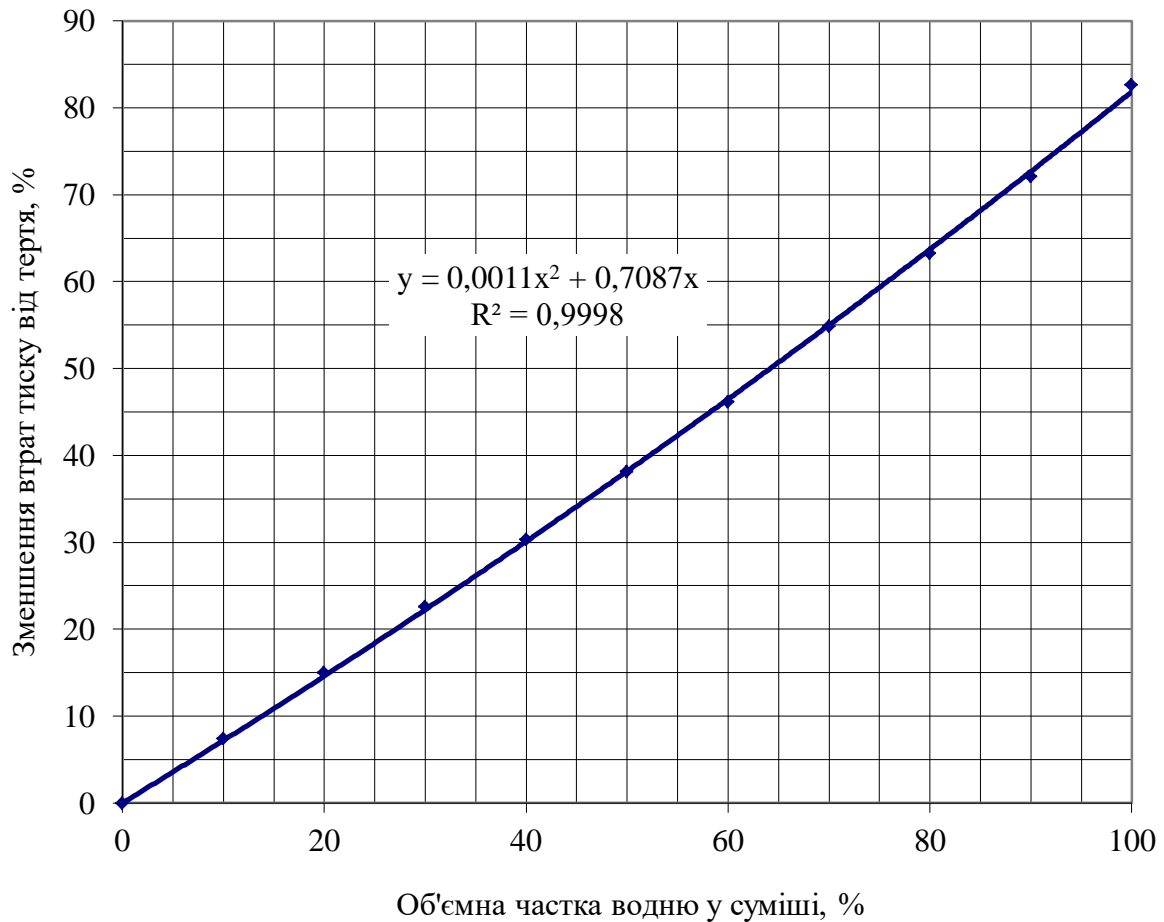


Рис. 7. Залежність відносного зменшення втрат тиску у модельному газопроводі від об'ємної частки водню при транспортуванні за турбулентного режиму газо-водневої суміші з витратою, що мала місце для природного газу

Зведена об'ємна витрата газо-водневої суміші, яка забезпечує таку ж кількість енергії, як у разі транспортування газопроводом природного газу, дорівнює

$$Q_{нзв} = \frac{Q_{нг}}{\alpha_e}, \quad (14)$$

де $Q_{нг}$ - розрахункова витрата для елемента системи газопостачання у разі транспортування природного газу.

Наприклад, у випадку, що розглядається, при транспортуванні газопроводом природного газу з витратою за нормальних умов $100 \text{ м}^3/\text{год}$, кількість транспортованої енергії дорівнює

$$E = \tilde{H} \cdot Q_{ng} = 36,749 \cdot 100 = 3675 \text{ МДж/год.}$$

За формулою (14) знайдемо зведену витрату газу за транспортування газо-водневої суміші з об'ємною часткою водню 20 %. Із таблиці 4 визначаємо, що коефіцієнт енергоємності суміші становить $\alpha_e = 0,858$, тоді

$$Q_{нзв} = \frac{100}{0,858} = 116,5 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Перевіряємо кількість транспортованої газопроводом енергії

$$E = 31,543 \cdot 116,5 = 3675 \text{ МДж/год.}$$

За формулою (14) визначені зведені витрати в газопроводі при перекачуванні за умов турбулентного режиму газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню. Далі за комп'ютерною програмою виконані багатоваріантні газодинамічні розрахунки газопроводу низького тиску і знайдені втрати тиску від тертя.

Втрати тиску від тертя у разі перекачування газо-водневої суміші зі зведеною витратою $Q_{нзв}$ порівнювались з втратами тиску при перекачуванні природного газу газопроводом низького тиску з витратою Q_{ng} , тобто за однакової кількості транспортованої енергії.

На рис. 8 наведено приклад одержаних результатів для газо-водневої суміші з об'ємною часткою 20 %. Як засвідчує рис. 8, у випадку застосування замість природного газу газо-водневої суміші, внаслідок збільшення витрати з метою збереження необхідної кількості транспортованої газопроводом енергії втрати тиску від тертя будуть зростати.

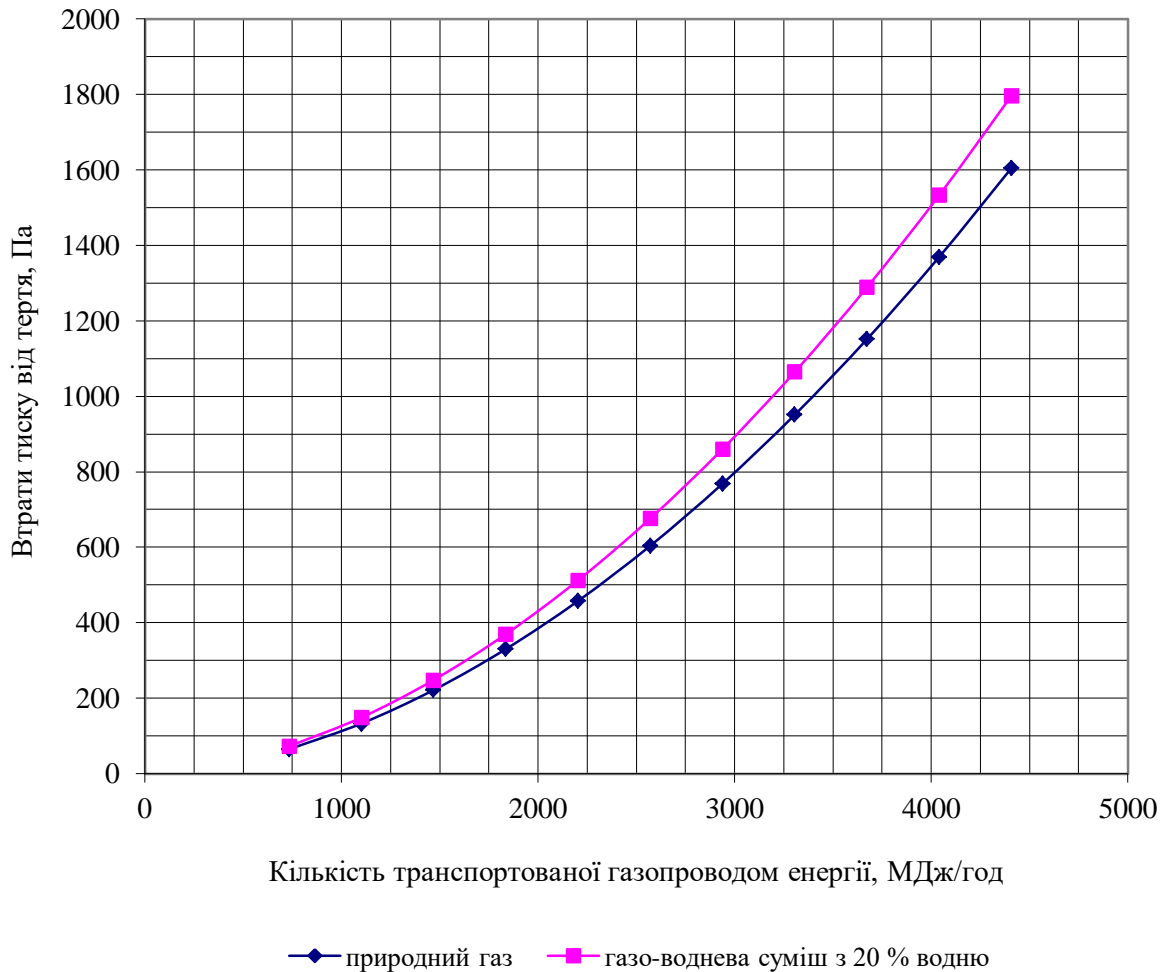


Рис. 8 - Залежність втрат тиску у сталевому газопроводі низького тиску від кількості транспортованої енергії у разі використання природного газу і газо-водневої суміші з об'ємною часткою водню 20 %

Використовуючи результати багатоваріантних газодинамічних розрахунків, знаходимо відносне збільшення втрат тиску від тертя у сталевих газових мережах низького тиску для всього діапазону зміни концентрації водню у суміші за умови турбулентного режиму транспортування.

Одержані результати зводимо у таблицю 5.

Таблиця 5

Відносне збільшення втрат тиску від тертя у сталевих газових мережах низького тиску при збереженні кількості транспортованої енергії

Об'ємна частка водню у суміші, %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Відносне збільшення втрат тиску, %	0	5,7	12,0	18,7	26,6	35,3	44,5	54,6	64,2	68,9	59,9

Одержані результати щодо збільшення гідравлічної енерговитратності сталевих газових мереж низького тиску за перекачування газо-водневих сумішей у разі подавання газопроводом тієї ж кількості енергії, яку забезпечував природний газ, ілюструє рис. 9.

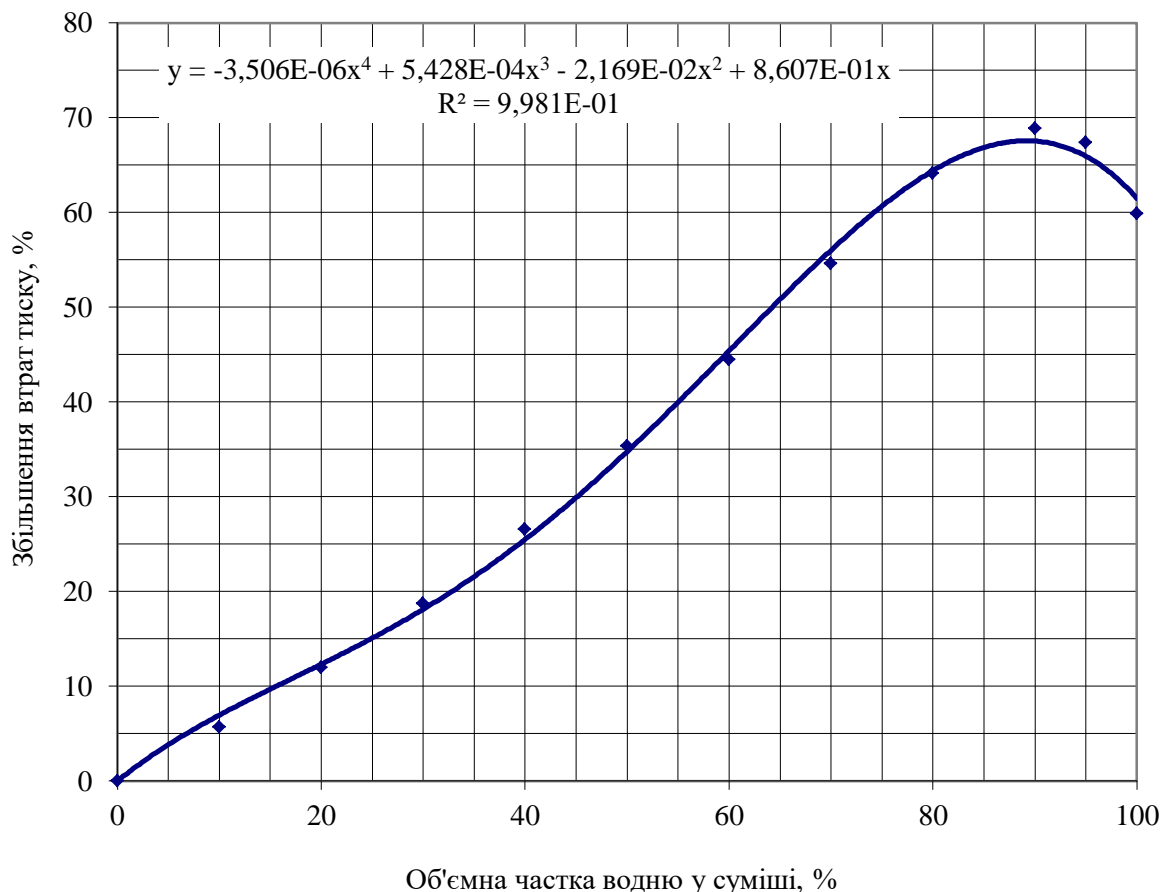


Рис. 9. Збільшення газодинамічної енерговитратності сталевих газових мереж низького тиску за перекачування газо-водневих сумішей у разі подавання енергії, яку забезпечував природний газ

Наступним етапом досліджень буде встановлення закономірностей газодинамічних процесів при транспортуванні газо-водневих сумішей у поліетиленових мережах низького тиску, а також сталевих та поліетиленових газових мережах середнього і високого тиску.

Висновки

1. Шляхом математичного моделювання встановлено, що при збільшенні об'ємної частки водню від нуля до 100 % фізико-хімічні властивості газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов, які застосовуються для розрахунків газових мереж низького тиску, суттєво змінюються, а саме: густина зменшується у 8,3 рази, динамічна в'язкість зменшується в 1,2 рази, кінематична в'язкість зростає в 6,8 рази, нижча теплота згорання зменшується в 3,4 рази.
2. Залежність зазначених властивостей газо-водневої суміші за нормальних фізичних умов від об'ємної частки водню з вірогідністю апроксимації, вищою за 0,998, можна описати поліноміальними функціями другого або третього порядку.
3. Встановлено, що при збереження витрат газу, які мали місце при транспортуванні природного газу, за умови турбулентного режиму руху газо-водневої суміші в сталевих газових мережах низького тиску втрати тиску будуть зменшуватись. Відносне зменшення втрат тиску, порівняно з транспортуванням природного газу, практично не залежить від витрати і змінюється від нуля до 82,6 % при зростанні об'ємної частки водню у суміші від нуля до 100 %.
4. Оскільки газо-воднева суміш характеризується меншим значенням нижчої об'ємної теплоти згорання, то для забезпечення подавання кількості енергії, яку забезпечував природний газ, необхідно збільшити розрахункову об'ємну витрату газу в кожному елементі системи газопостачання. Введено поняття зведеної об'ємної витрати газу, яка забезпечує у разі транспортування газопроводом газо-

водневої суміші таку ж кількість енергії, як при перекачуванні природного газу.

5. Встановлено, що випадку застосування замість природного газу газо-водневої суміші, внаслідок збільшення витрати з метою збереження необхідної кількості транспортованої газопроводом енергії, втрати тиску від тертя будуть зростати. Відносно зростання втрат тиску, порівняно з транспортуванням природного газу, практично не залежить від витрати і змінюється від нуля до 69 % при зростанні об’ємної частки водню у суміші від нуля до 100 %.
6. Одержані результати можуть бути використані при проектуванні нових, реконструкції та експлуатації діючих газових мереж низького тиску у випадку транспортування газо-водневих сумішей з різною об’ємною часткою водню.

Література

1. URL:<https://www.epravda.com.ua/rus/projects/greendeal/2020/05/18/660480/>
2. URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/08/31/664468/>
3. URL:<https://www.epravda.com.ua/rus/projects/greendeal/2020/11/21/668263/>
4. URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/10/28/666707/>
5. ISO 6976:2016.
6. ДБН В.2.5–20–2018 Газопостачання.
7. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: Сімик. 2006. 1313 с.