



Науково-технічні проблеми нафтогазової інженерії

Прийнято 27.05.2025. Прорецензовано 07.10.2025. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 622.691.4

DOI: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-13-27

ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ ЗА ВІДОМИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Середюк М. Д. *

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-2748-926X>

e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua

Цюрак В. Ю.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна

<https://orcid.org/0009-0002-4373-2239>

e-mail: vadym.tsiurak-a18524@nung.edu.ua

Анотація. Одним із реальних шляхів вирішення проблеми декарбонізації є застосування газоводневих сумішей як альтернативи природному газу в системах газопостачання населених пунктів. Практична реалізація зазначеної технології вимагає вирішення низки завдань, пов'язаних із забезпеченням безпеки та надійності транспортування і розподілу енергоносіїв, коригуванням режимів експлуатації існуючих газорозподільних мереж з метою подачі обсягів енергії, які раніше забезпечував природний газ. Режимні параметри трубопроводів безпосередньо залежать від властивостей газоводневих сумішей. Метою роботи є одержання аналітичних залежностей, які дають можливість за відповідними характеристиками базового природного газу прогнозувати властивості газоводневої суміші з певною молярною концентрацією водню за стандартних умов. Склад компонентів базового природного газу має відповідати нормативним вимогам щодо подавання в газотранспортну систему України. Дослідження проведено за двох значень стандартної температури вимірювання об'єму 0 °C і 20 °C. З урахуванням вимог нормативних документів сформовано варіанти складу компонентів базового природного газу та визначені їх властивості з урахуванням реального стану. За результатами багатоваріантних розрахунків знайдено властивості газоводневих сумішей для кожного варіанта базового природного газу в діапазоні молярних концентрацій (0-100) % водню. Методами математичного моделювання отримано аналітичні залежності для прогнозування густини, відносної густини, вищої і нижчої об'ємної теплоти згорання, вищого і нижчого числа Воббе та кінематичної в'язкості газоводневих сумішей

Запропоноване посилання: Середюк, М. Д. & Цюрак, В. Ю. (2026). Прогнозування властивостей газоводневих сумішей за відомими характеристиками природного газу. Нафтогазова енергетика, 1(45), 13-27. doi: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-13-27.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

залежно від молярної концентрації водню та відповідних властивостей базового природного газу. Запропоновані математичні моделі можуть бути застосовані для оперативних газодинамічних розрахунків газових мереж за транспортування газоводневих сумішей.

Ключові слова: альтернативні енергоносії; водень; газорозподільні мережі; густина; об'ємна теплота згоряння; число Воббе

Вступ

Прогрес щодо реалізації технологій енергетичного переходу сприяє декарбонізації та цілям сталого розвитку суспільства. Використання існуючих магістральних газопроводів та газорозподільних мереж для транспортування водню та газоводневих сумішей пропонує менш витратний та більш імовірний, у найближчій перспективі шлях до декарбонізації всієї економіки. Хоча змішування водню з природним газом в існуючій інфраструктурі транспортування та розподілу має численні переваги, існують пов'язані з ним різні фактори та невизначеності. Вони стосуються впливу водню на матеріали та обладнання існуючих трубопроводів, сумісності різних компонентів трубопроводних мереж та відмінності фізико-хімічних та термодинамічних властивостей водню та газоводневих сумішей від аналогічних властивостей природного газу. Водень має суттєво інші термодинамічні, транспортні та енергетичні властивості, ніж природний газ. Це безпосередньо впливає на газодинамічну енерговитратність його транспортування та розподілу, на обсяг, безпеку та надійність енергопостачання споживачів. Робота, що пропонується, присвячена дослідженням впливу концентрації водню в газоводневій суміші, на комплекс властивостей, від яких залежить режимні параметри газорозподільних мереж, та обсяги енергії, що надходять до кінцевих споживачів.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Автори роботи [1] всесторонньо аналізують енергетичні, матеріальні та експлуатаційні аспекти впровадження водню та біометану в інфраструктуру природного газу. Оцінюють вплив концентрації водню на транспортування та розподіл енергоносіїв. Розкривають умови взаємозамінності енергоносіїв за результатами математичного моделювання. Стверджують, що існуюча газова інфраструктура загалом придатна для впровадження біометану та газоводневих сумішей з концентрацією водню до 20 %. Однак, на рівні оператора розподільної системи необхідним є впровадження систем відстеження якості газу через розподілений характер впорскування водню та біометану.

У роботі [2] узагальнено результати попередніх досліджень щодо впливу змішування природного газу з воднем на фізичні та термодинамічні властивості газової суміші, матеріали трубопроводів та характеристики обладнання в мережах передачі та розподілу енергоносіїв. Запропоновані математичні моделі для мереж газопроводів, що транспортують газоводневі суміші. Встановлено гідравлічний та термодинамічний вплив змішування водню в системах транспортування природного газу. Доведено, що менша об'ємна теплота згоряння водню призводить до зниження передачі енергії при фіксованому тиску в трубопроводі, а підтримання постійного тиску в трубопроводі або обсягу передачі енергії вимагає значного збільшення коефіцієнта стиснення компресорів через нижчу молярну масу енергоносія. Виконано порівняння низки властивостей типового природного газу і водню. Одержано, що індекс Воббе, який є показником, що визначає взаємозамінність палива, досягає мінімального значення при 85 % (за об'ємом) водню. Швидкість полум'я та температура полум'я збільшуються для газових сумішей зі збільшенням вмісту водню [2].

Як показано у роботі [3], присутність водню в суміші з природним газом помітно впливає на властивості енергоносія та характеристики потоку. Об'єктом досліджень був типовий природний газ та газоводневі суміші з концентрацією до 10 % включно. Моделювання газодинамічних процесів проведено для умов транспортування газоводневих сумішей магістральним газопроводом з робочим тиском 75 бар. Встановлено, що присутність 10 % водню у суміші знижує її густину на 12 %. Втрати тиску в трубопроводі збільшуються через наявність водню. При 10 % водню газодинамічні втрати тиску зростають на 5,4 %. Встановлено, що присутність водню в суміші підвищує критичний тиск і знижує критичну температуру. Слід відзначити, що одержані у роботі [3] результати не можна безпосередньо застосовувати для умов газорозподільних мереж України, які працюють за значно менших робочих тисків. У зазначеній роботі досліджено тільки малий діапазон концентрацій водню у газоводневій суміші.

Низку робіт присвячено впливу фізико-хімічних та термодинамічних властивостей газоводневих сумішей на газодинамічні процеси їх стиснення в газоперекачувальних агрегатах [4,5]. Встановлено, що через відмінність характеристик газоводневих сумішей від параметрів природного газу робота газових компресорів за різних концентрацій водню буде різною. Додатковим аспектом, який враховується при розгляді впливу водню на продуктивність компресора, є зміна основних параметрів, що характеризують потік. У результаті досліджень встановлено закономірності впливу концентрації водню у газоводневій суміші на режимні параметри відцентрових та поршневих компресорів за невеликих до 10 % концентрацій водню.

Для прогнозування теплофізичних властивостей суміші водню з природним газом у роботі [6] використано рівняння Peng-Robinson, AGA8, GERG-2008 та PC-SAFT. Експериментальні дані охоплюють діапазон тиску (10–200) бар та температур 15 °С, 25 °С та 45 °С з високою точністю та прецизійністю. Ці дані були виміряні за допомогою унікального у Великій Британії термодинамічного випробувального стенду для водню, розташованого в Національній інженерній лабораторії NEL. У результаті досліджень встановлено, що методи AGA8 та GERG-2008 мають здатність достовірно прогнозувати теплофізичні властивості газоводневих сумішей, а метод Пенга-Робінсона може бути використаний для прогнозування з необхідною точністю значень густини та швидкості звуку газоводневих сумішей без налаштування параметрів бінарної взаємодії. Метод PC-SAFT також показав прийнятні та надійні результати для сумішей, що містять водень. Методам визначення термодинамічних властивостей газоводневих сумішей присвячено також роботу [7]. Автори доводять важливість розроблення точної термодинамічної моделі для надійної кількісної оцінки змін теплофізичних властивостей природного газу при змішуванні його з воднем. Діапазон досліджених у роботах [6,7] тисків не включає низькі тиски, за яких працюють газорозподільні мережі України.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

У роботах [8,9] на базі сучасних методів врахування реальних властивостей газів нами досліджено вплив об'ємної концентрації водню у діапазоні (0-100) % на густину, вищу і нижчу теплоту згоряння, вище і нижче число

Воббе, динамічну та кінематичну в'язкість газоводневих сумішей за стандартних умов, що регламентовані для розподільних газових мереж України. У результаті одержано закономірності впливу об'ємної концентрації водню на газодинамічну енерговитратність газових мереж за витрат, що мали місце для природного газу. Згідно з уведеним в останні роки державним стандартом, у паспорті якості природного газу тепер використовуються не об'ємні, а молярні концентрації компонентів, що робить доцільним уточнення результатів досліджень. Графічні та аналітичні залежності, одержані у роботах [8,9], відповідають конкретному складу компонентів природних газів, які у 2021-2022 роках застосовували при газопостачанні споживачів Івано-Франківської області. Однак числові значення запропонованих математичних моделей для фізичних, термодинамічних та енергетичних параметрів газоводневих сумішей дещо залежать від складу компонентів природного газу, до якого домішують водень. Тому для оперативного прогнозування властивостей газоводневих сумішей, створених на базі природних газів із різним складом компонентів, необхідно розробити універсальні математичні моделі, що є предметом досліджень даної роботи.

Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є одержання аналітичних залежностей, які дають можливість за відповідними характеристиками базового природного газу прогнозувати властивості газоводневої суміші з певною молярною концентрацією водню за стандартних умов. Базовим природним газом будемо надалі називати природний газ з певним складом компонентів, який слугував для формування газоводневих сумішей з різним молярним вмістом водню.

Завдання дослідження:

– визначення з урахуванням реального стану властивостей різних варіантів базового природного газу, що відрізняються складом компонентів, для стандартної температури вимірювання об'єму 0 °С;

– знаходження властивостей газоводневих сумішей, створених на базі кожного варіанта базового природного газу, в діапазоні молярних концентрацій (0-100) % водню;

– математичне моделювання одержаних результатів і розроблення аналітичних залежностей властивостей газоводневих сумішей від молярної концентрації водню та відповідних параметрів базового природного газу для стандартної температури вимірювання об'єму 0 °С;

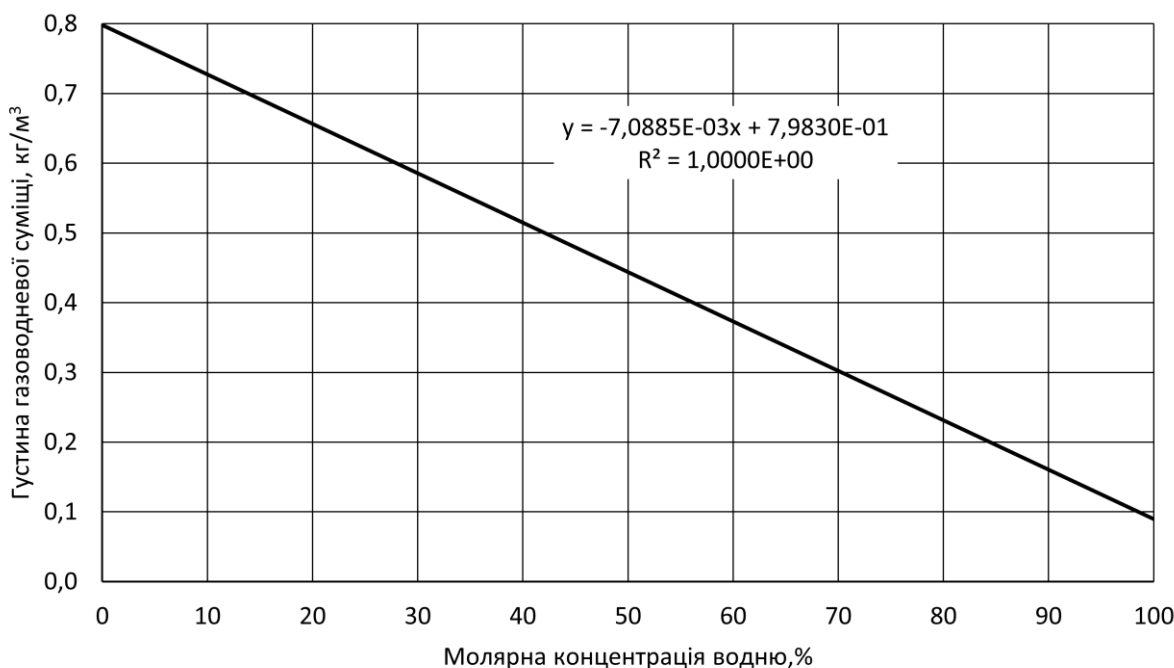


Рисунок 1 – Залежність густини газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню для першого варіанта базового природного газу

– проведення аналогічних досліджень для стандартної температури вимірювання об'єму 20 °С.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

На першому етапі досліджень прийнято стандартні умови вимірювання об'єму, встановлені для газорозподільних мереж України згідно з чинними нормативними документами [10,11], а саме, тиск $p_n = 101325$ Па та температура $t_n = 0$ °С. Зазначені стандартні умови відповідають нормальним фізичним умовам. Стандартна температура згоряння енергоносія згідно з [12] приймалась рівною $t_1 = 25$ °С.

Сформовано 17 варіантів складу компонентів природного газу. При цьому враховано такі вимоги до складу газу, що подається у газотранспортну систему згідно з «Кодексом газотранспортної системи» [12] у відсотках молярних: метан – мінімум 90, етан – максимум 7, пропан – максимум 3, бутан – максимум 2, пентан та більш важкі вуглеводні – максимум 1, азот – максимум 5, діоксид вуглецю – максимум 2, кисень – максимум 0,2.

Використовуючи методи чинного державного стандарту [13], які нами реалізовані у комп'ютерній програмі, для кожного варіанта складу компонентів природного газу визначали значення тих властивостей, які необхідні

для виконання газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж та оцінювання обсягів передачі енергії. Після цього для кожного варіанта базового природного газу формували газоводневі суміші з різною молярною концентрацією водню від 0 до 100 %, і за комп'ютерною програмою визначали їх властивості.

Отримані результати багатоваріантних розрахунків властивостей газоводневих сумішей опрацьовували методами математичного моделювання.

Для проведення газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж згідно з нормативними документами [11,12] необхідно знати густину газоводневої суміші за стандартних умов, що відповідають нормальним фізичним умовам. На рисунку 1 наведено отриману залежність густини газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню для першого варіанта базового природного газу.

Для першого варіанта базового природного газу формула для визначення густини газоводневої суміші за нормальних умов залежно від молярної концентрації водню має вигляд (рис. 1):

$$\rho_{zg} = 0,7983 - 7,0885 \cdot 10^{-3} \cdot x, \quad (1)$$

де 0,7983 – густина базового природного газу за нормальних умов, кг/м³;

x – молярна концентрація водню в газоводневій суміші, %.

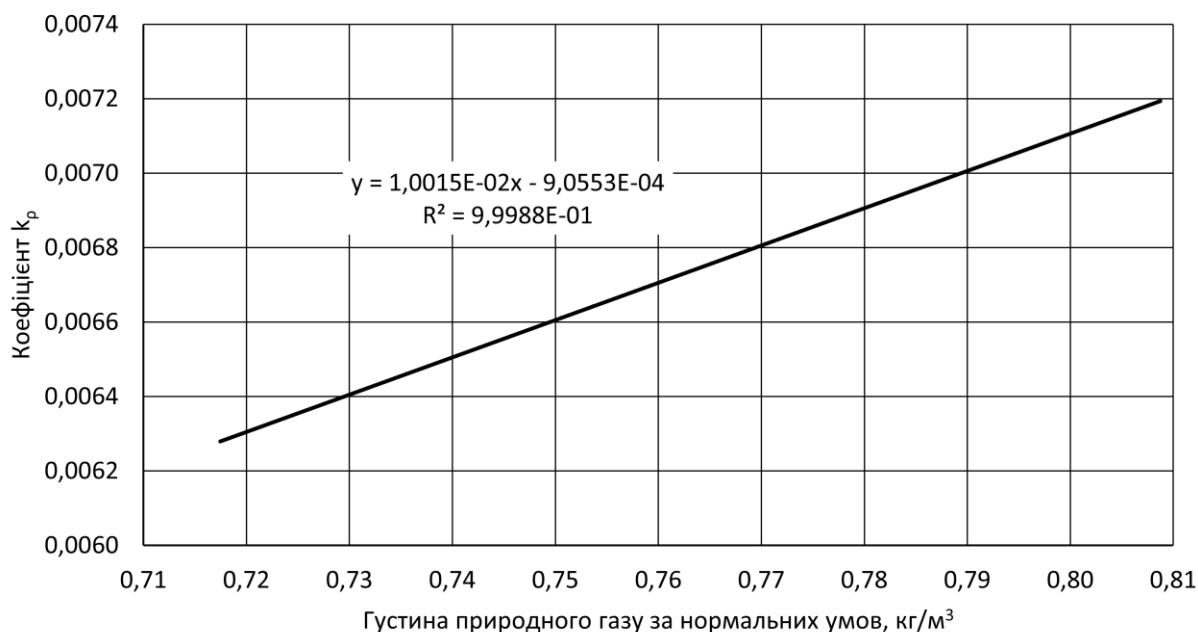


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта математичної моделі (2) від густини базового природного газу за нормальних умов

За результатами багатоваріантних розрахунків встановлено, що залежність густини газоводневої суміші за нормальних умов вимірювання об'єму ($\text{кг}/\text{м}^3$) від молярної концентрації водню (%) з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати такою лінійною функцією:

$$\rho_{zg} = \rho_z - k_p \cdot x, \quad (2)$$

де ρ_{zg} – густина базового природного газу, на основі якого сформовано газоводневу суміш, за нормальних умов;

k_p – коефіцієнт математичної моделі, значення якого залежать від складу компонентів природного газу та величини його густини за нормальних умов.

На рисунку 2 наведено одержану нами залежність коефіцієнта моделі k_p від величини густини базового природного газу за нормальних умов.

Як свідчить рисунок 2, величину коефіцієнта математичної моделі (2) для густини газоводневої суміші за нормальних умов з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати такою лінійною функцією від густини базового природного газу за нормальних умов вимірювання об'єму

$$k_p = 1,0015 \cdot 10^{-2} \rho_z - 9,0553 \cdot 10^{-4}. \quad (3)$$

Для визначення числа Воббе необхідно знати відносну густина газоводневої суміші за нормальних умов. Рисунок 3 ілюструє одержану

нами залежність відносної густини газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню для першого варіанта базового природного газу.

Як свідчить рисунок 3, для першого варіанта базового природного газу формула для визначення відносної густини газоводневої суміші за нормальних умов залежно від молярної концентрації водню має вигляд

$$\Delta_{zg} = 0,61740 - 0,00548 \cdot x, \quad (4)$$

де 0,61740 – відносна густина базового природного газу за нормальних умов.

За результатами математичного моделювання результатів багатоваріантних розрахунків встановлено, що залежність відносної густини газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати лінійною функцією

$$\Delta_{zg} = \Delta_z - k_{\Delta} \cdot x, \quad (5)$$

де Δ_z – відносна густина базового природного газу, на основі якого сформовано газоводневу суміш, за нормальних умов;

k_{Δ} – коефіцієнт математичної моделі, значення якого залежать від відносної густини базового природного газу за нормальних умов.

На рисунку 4 наведено одержану нами залежність коефіцієнта моделі k_{Δ} від величини відносної густини базового природного газу за нормальних умов.

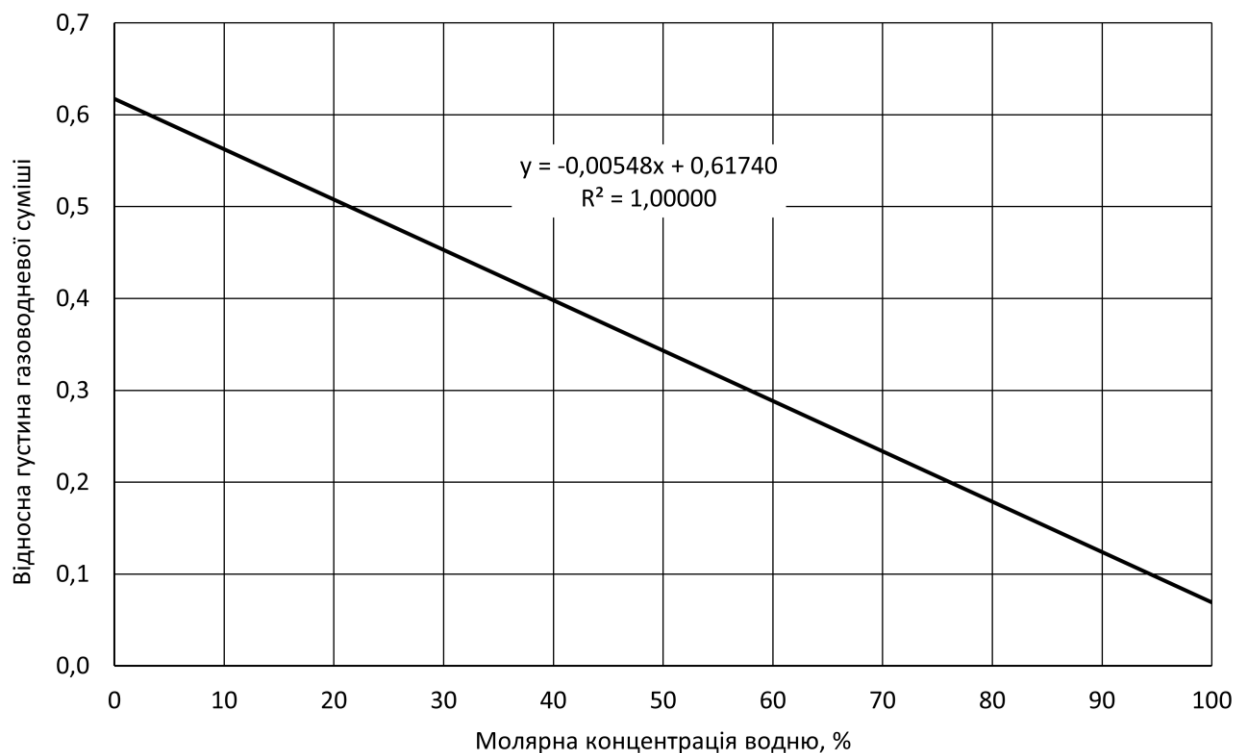


Рисунок 3 – Залежність відносної густини газозводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню для першого варіанта базового природного газу

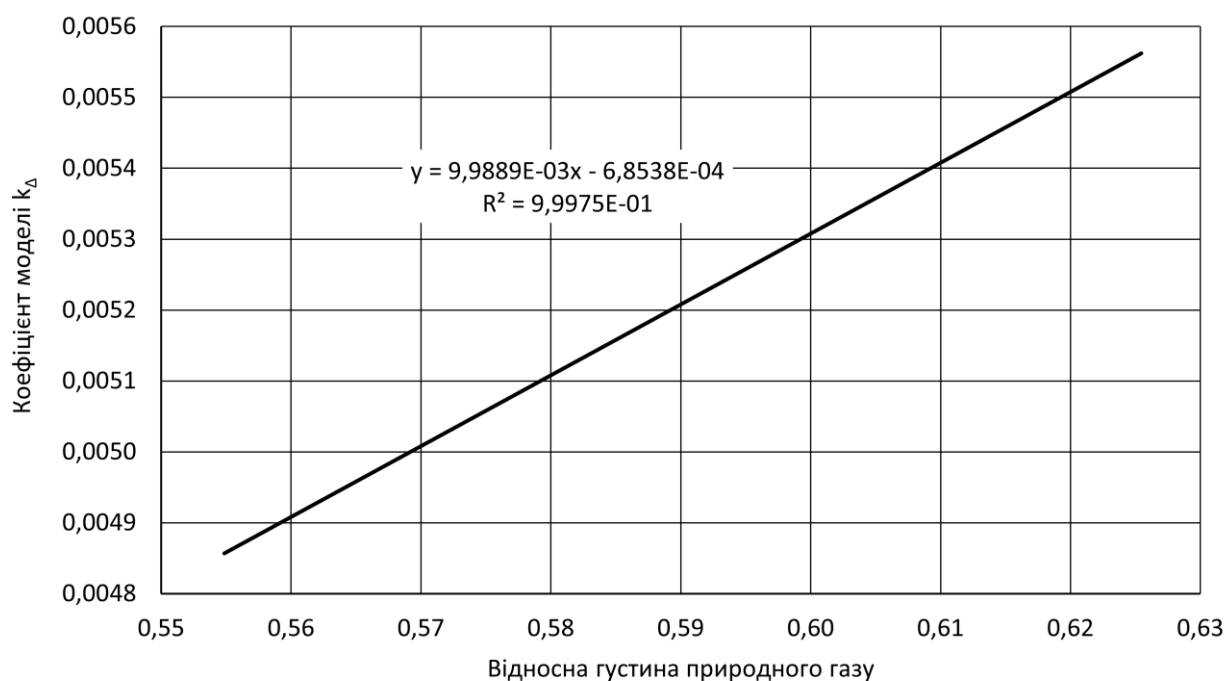


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта математичної моделі (5) від відносної густини базового природного газу за нормальних умов

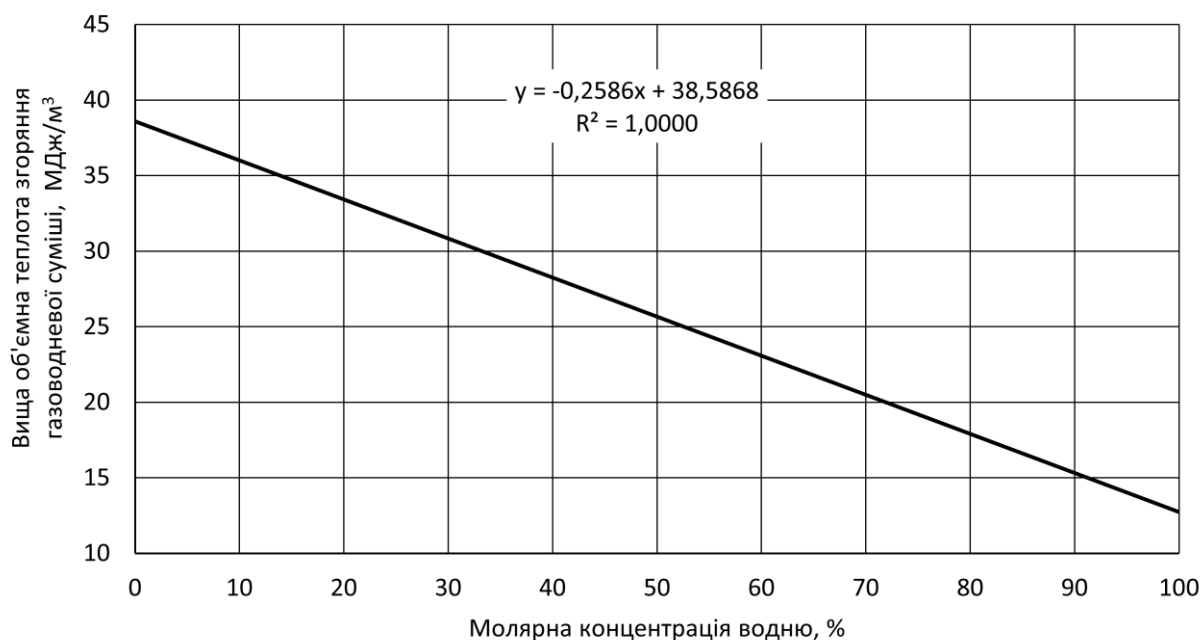


Рисунок 5 – Залежність вищої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші від молярної концентрації водню для першого варіанта базового природного газу

Як свідчить рисунок 4, величину коефіцієнта математичної моделі (5) для відносної густини газозводневої суміші умов з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати лінійною функцією від відносної густини базового природного газу за нормальних умов.

$$k_{\Delta} = 9,9889 \cdot 10^{-3} \Delta_z - 6,8538 \cdot 10^{-4}. \quad (6)$$

Важливе значення для характеристики енергоносія, який надходить до споживачів трубопроводом, має вища та нижча об'ємна теплота згоряння. Рисунок 5 характеризує отриману нами залежність вищої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші, що сформована на базі першого базового варіанта природного газу, від молярної концентрації водню.

Із рисунка 5 випливає, що для першого варіанта складу компонентів базового природного газу формула для визначення вищої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші (МДж/м³) залежно від молярної концентрації водню (%) має вигляд

$$(Hv)_{zg}^G = 38,5868 - 0,2586 \cdot x, \quad (7)$$

де 38,5868 – вища об'ємна теплота згоряння базового природного газу, МДж/м³.

Дослідженнями встановлено, що вища об'ємна теплота згоряння газозводневої суміші (МДж/м³) може бути обчислена за відомою вищою об'ємною теплою згоряння базового природного газу за такою формулою

$$(Hv)_{zg}^G = (Hv)_z^G - k_G \cdot x, \quad (8)$$

де $(Hv)_z^G$ – вища об'ємна теплота згоряння базового природного газу, на основі якого сформовано газозводневу суміш;

k_G – коефіцієнт математичної моделі, значення якого залежать від величини вищої об'ємної теплоти згоряння базового природного газу.

На рисунку 6 наведено одержану нами залежність коефіцієнта моделі k_G від величини вищої об'ємної теплоти згоряння базового природного газу.

Як впливає із рисунка 6, залежність коефіцієнта математичної моделі (8) для вищої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші від аналогічного показника базового природного газу з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати такою лінійною функцією:

$$k_G = 1,0016 \cdot 10^{-2} (Hv)_z^G - 1,2790 \cdot 10^{-1}. \quad (9)$$

Рисунок 7 характеризує залежність нижчої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші від молярної концентрації водню для першого базового варіанта природного газу.

Із рисунка 7 випливає, що для першого варіанта складу компонентів природного газу формула для визначення нижчої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші (МДж/м³) залежно від молярної концентрації водню (%) має вигляд

$$(Hv)_{zg}^N = 34,8207 - 0,2405 \cdot x, \quad (10)$$

де 34,8207 – нижча об'ємна теплота згоряння базового природного газу, МДж/м³.

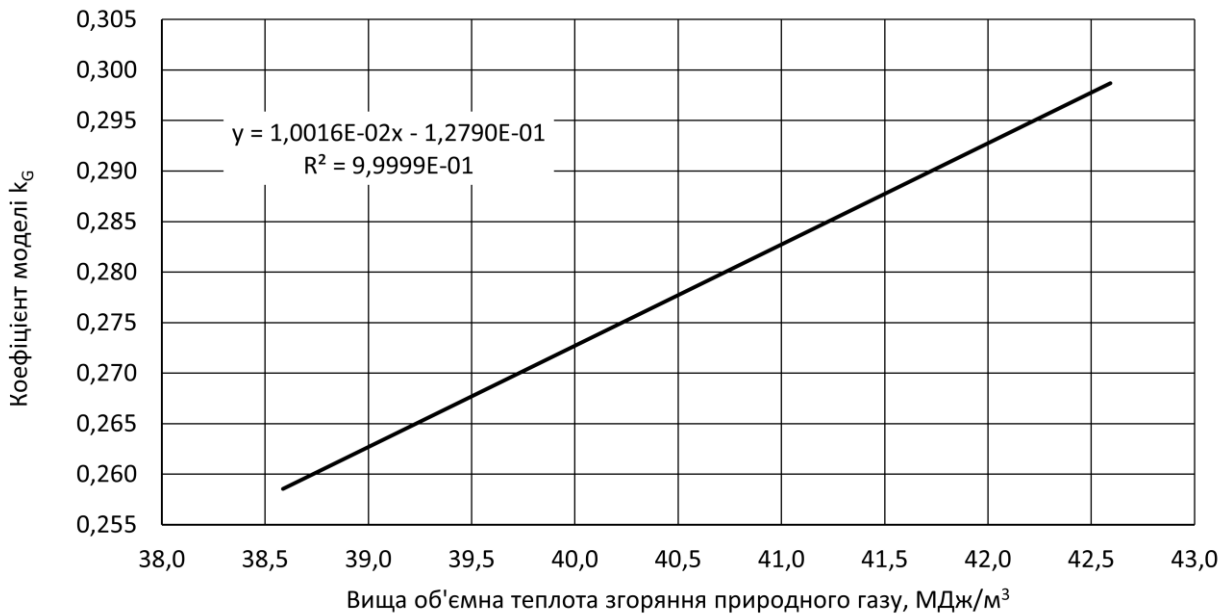


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта математичної моделі (8) від вищої об'ємної теплоти згоряння базового природного газу

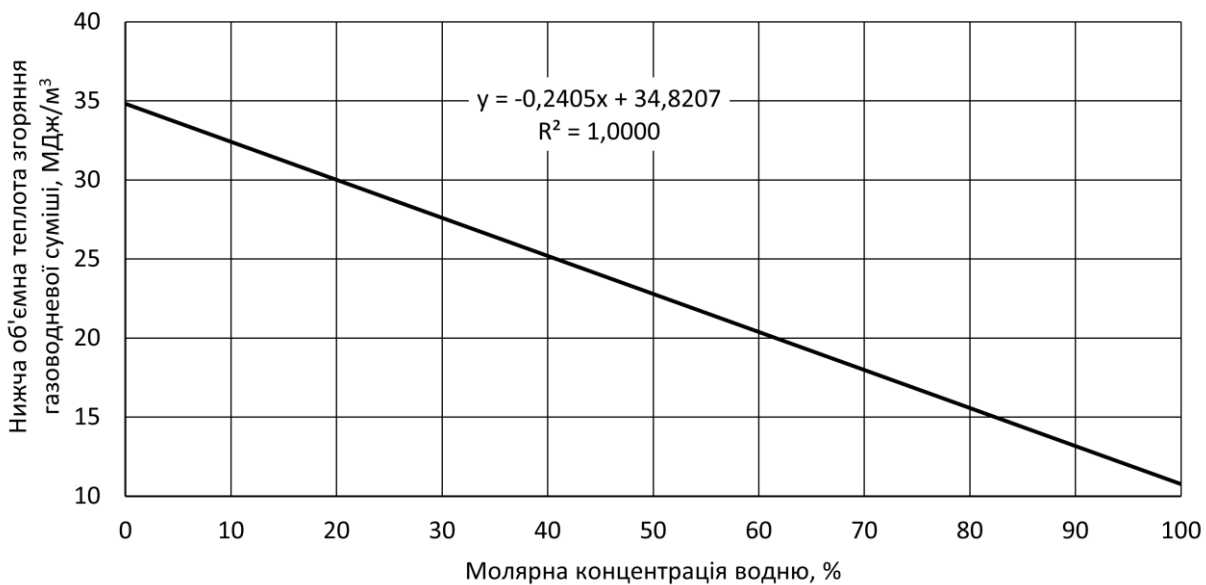


Рисунок 7– Залежність нижчої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші від молярної концентрації водню для першого варіанта складу природного газу

Для нижчої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші розрахункову формулу записуємо у вигляді

$$(Hv)_{zv}^N = (Hv)_z^N - k_N \cdot x, \quad (11)$$

де $(Hv)_z^N$ – нижча об'ємна теплота згоряння базового природного газу, на основі якого сформовано газозводневу суміш;

k_N – коефіцієнт математичної моделі, значення якого залежать від величини нижчої об'ємної теплоти згоряння базового природного газу.

На рисунку 8 наведено одержану нами залежність коефіцієнта моделі k_N від величини нижчої об'ємної теплоти згоряння базового природного газу.

Як видно із рисунка 8, залежність коефіцієнта математичної моделі (11) для нижчої об'ємної теплоти згоряння газозводневої суміші від величини нижчої об'ємної теплоти згоряння базового природного газу з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати такою лінійною функцією:

$$k_N = 1,0015 \cdot 10^{-2} (Hv)_z^N - 1,0819 \cdot 10^{-1}. \quad (12)$$

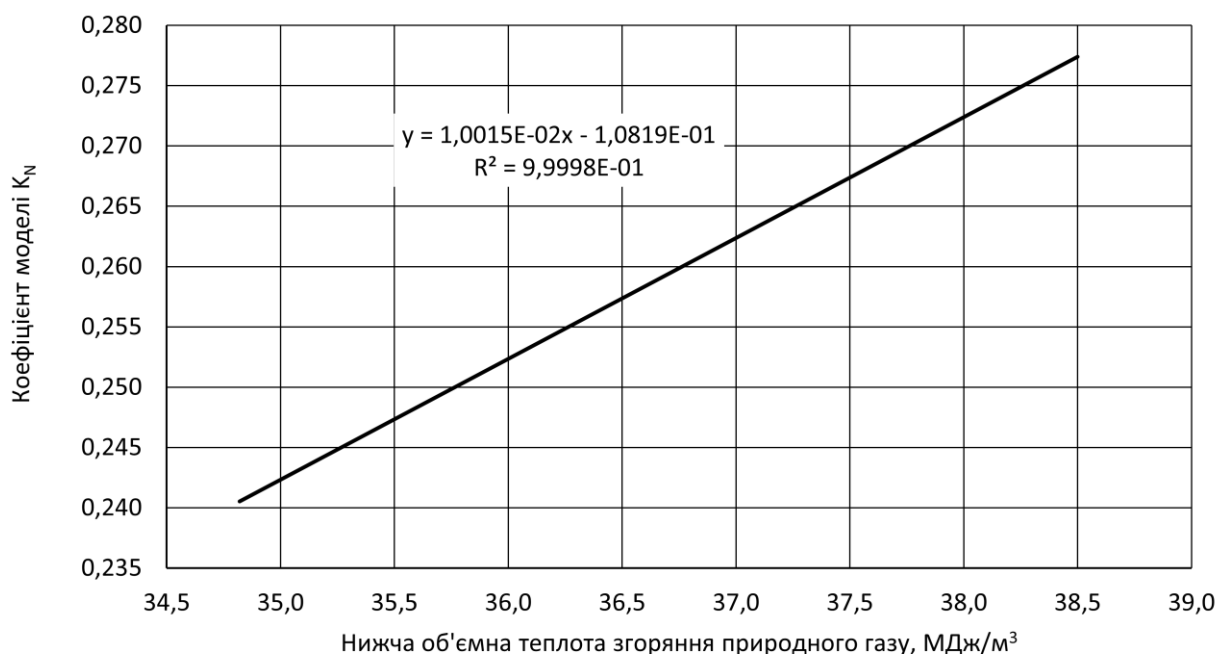


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта математичної моделі (11) від нижчої об'ємної теплота згоряння базового природного газу

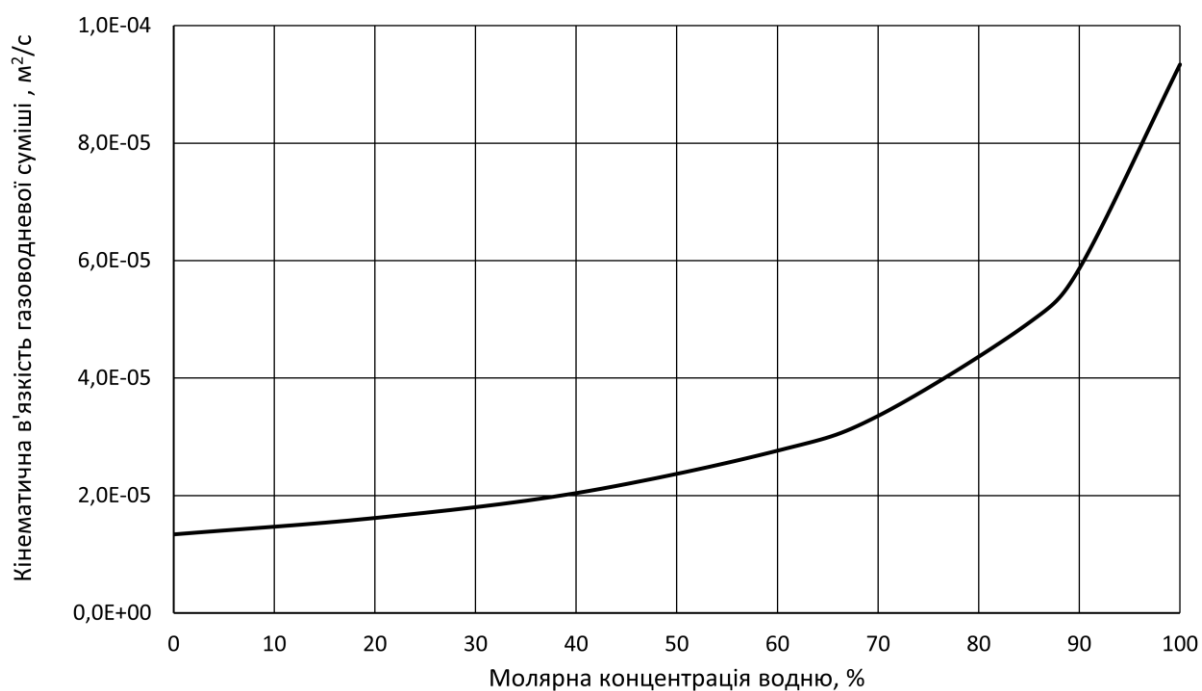


Рисунок 9 – Залежність кінематичної в'язкості газозводневої суміші від молярної концентрації водню для першого варіанта складу базового природного газу

Для проведення газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж за транспортування газозводневої суміші необхідно прогнозувати величину її кінематичної в'язкості. Рисунок 9 ілюструє залежність кінематичної в'язкості газозводневої суміші від молярної концентрації водню для першого варіанта складу базового природного газу.

Як засвідчили дослідження, наведену на рисунку 9 графічну залежність не вдається достовірно описати поліноміальною функцією для повного діапазону зміни молярної концентрації водню у газозводневій суміші. Тому виконуємо моделювання зазначеної кривої окремо у діапазоні від нуля до 60 % та від 60 % до 100 % водню.

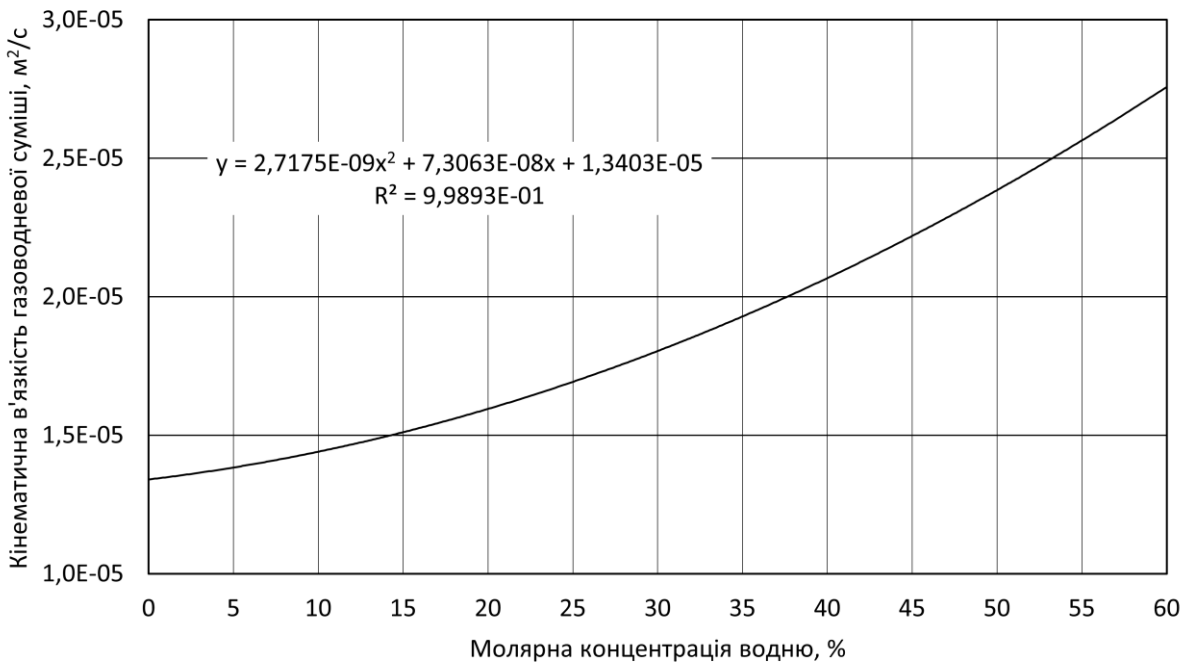


Рисунок 10 – Залежність кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню у діапазоні (0-60) % для першого варіанта складу природного газу

На рисунку 10 наведено результати математичного моделювання залежності кінематичної в'язкості газоводневої суміші від молярної концентрації водню для діапазону (0-60) % для першого варіанта складу природного газу. Для опису залежності кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов (m^2/c) від молярної концентрації водню у діапазоні (0-60) % пропонуємо таку формулу:

$$v_{2g} = v_2 + k_{1v} \cdot x + k_{2v} \cdot x^2, \quad (13)$$

де v_2 – кінематична в'язкість за нормальних умов базового природного газу, на основі якої сформовано газоводневу суміш, m^2/c ;

k_{1v}, k_{2v} – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежать від та величини кінематичної в'язкості природного газу за нормальних умов.

Рисунки 11 і 12 ілюструють одержані нами аналітичні для коефіцієнтів математичної моделі k_{1v}, k_{2v} від кінематичної в'язкості базового природного газу за нормальних умов.

Таким чином, у діапазоні молярних концентрацій водню (0-60) % одержані нами формули для коефіцієнтів математичної моделі (13) для кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов мають вигляд

$$k_{1v} = 6,2971 \cdot 10^{-3} \cdot v_2 - 1,1311 \cdot 10^{-8}, \quad (14)$$

$$k_{2v} = 8,7693 \cdot 10^{-5} \cdot v_2 + 1,5402 \cdot 10^{-9}. \quad (15)$$

На рисунку 13 наведено результати математичного моделювання залежності кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню у діапазоні (60-100) % для першого варіанта складу компонентів базового природного газу.

Для опису залежності кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню у діапазоні (60-100) % застосовуємо поліном третього порядку

$$v_{2g} = -K_{1v} + K_{2v} \cdot x - K_{3v} \cdot x^2 + K_{4v} \cdot x^3, \quad (16)$$

де $K_{1v}, K_{2v}, K_{3v}, K_{4v}$ – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежать величини кінематичної в'язкості базового природного газу за нормальних умов.

Методом математичного моделювання одержані такі аналітичні вирази коефіцієнтів у формулі (16) для кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов у діапазоні молярних концентрацій водню (60-100) % . Достовірність апроксимації одержаних формул також перевищує 99 %.

$$K_{1v} = -50,929 \cdot v_2 + 1,0685 \cdot 10^{-3}; \quad (17)$$

$$K_{2v} = -2,1158 \cdot v_2 + 4,5835 \cdot 10^{-5}; \quad (18)$$

$$K_{3v} = -2,9871 \cdot 10^{-2} \cdot v_2 + 6,5113 \cdot 10^{-7}; \quad (19)$$

$$K_{4v} = -1,3805 \cdot 10^{-4} \cdot v_2 + 3,0896 \cdot 10^{-9}. \quad (20)$$

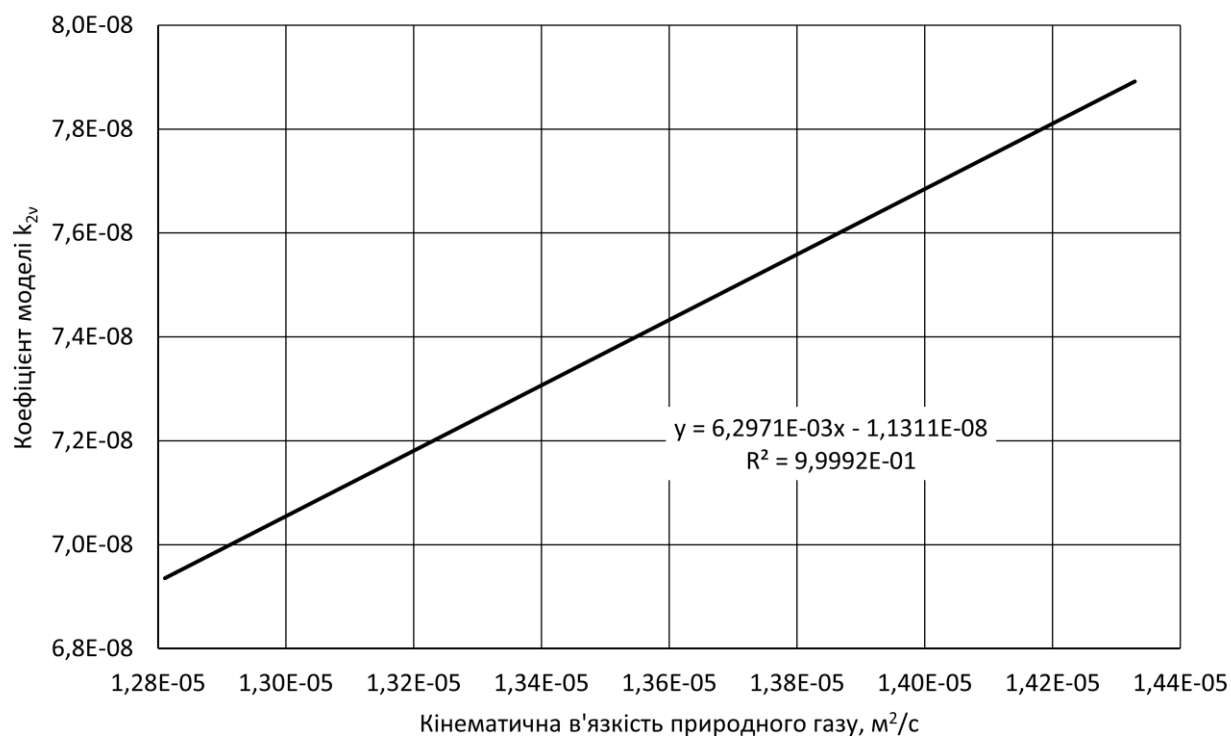


Рисунок 11 – Залежність коефіцієнта математичної моделі k_{1v} від кінематичної в'язкості базового природного газу за нормальних умов

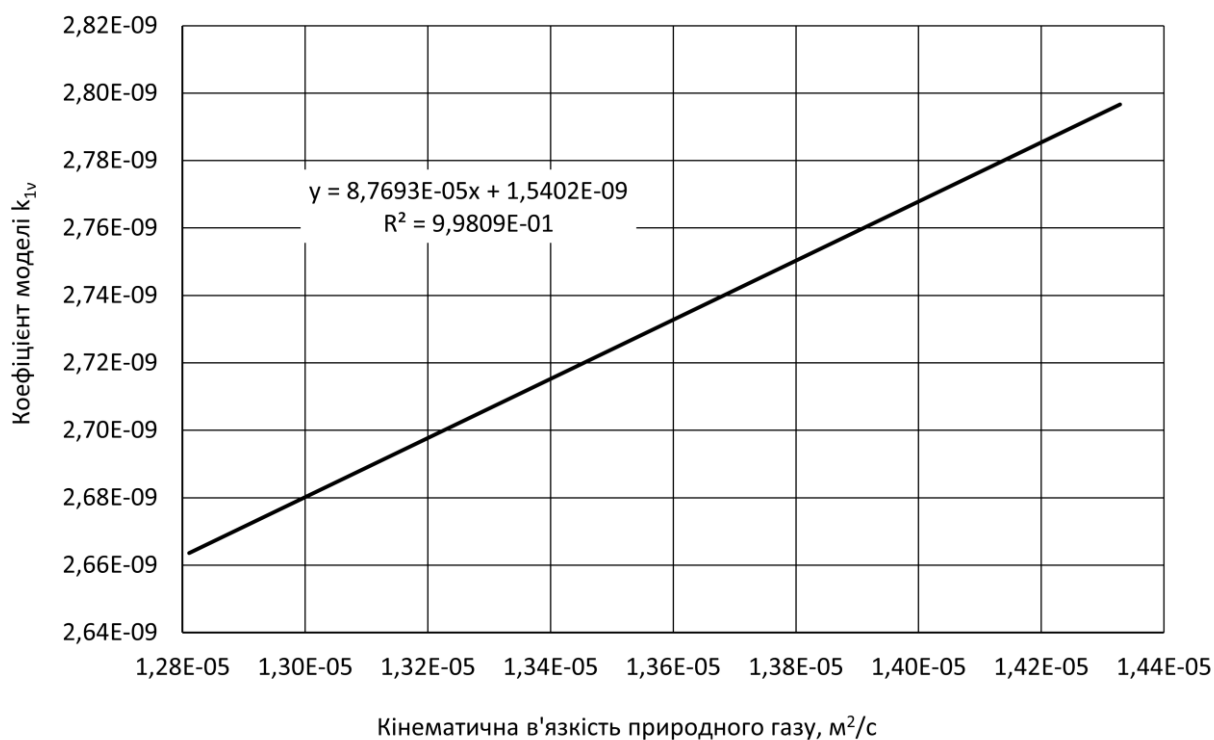


Рисунок 12 – Залежність коефіцієнта математичної моделі k_{2v} від кінематичної в'язкості базового природного газу за нормальних умов

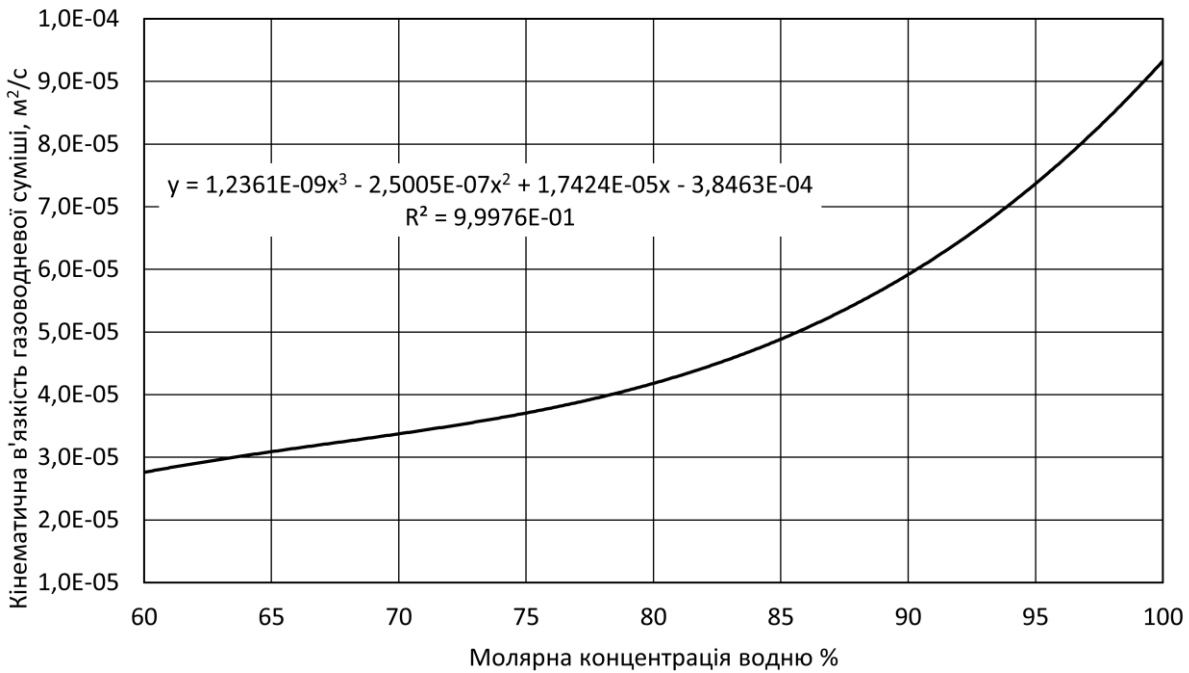


Рисунок 13 – Залежність кінематичної в'язкості газоводневої суміші за нормальних умов від молярної концентрації водню у діапазоні (60-100) % для першого варіанта складу природного газу

У випадку заміни природного газу газоводневими сумішами в системах газопостачання разом з вищою та нижчою теплотою згоряння необхідно визначати вище та нижче число Воббе. Для їх знаходження можна використати наведені у стандарті [13] формули, в які підставляють раніше знайдені параметри газоводневої суміші з певною молярною концентрацією водню

$$W_{zg}^G = \frac{(Hv)_{zg}^G}{\sqrt{\Delta_{zg}}}, \quad (21)$$

$$W_{zg}^N = \frac{(Hv)_{zg}^N}{\sqrt{\Delta_{zg}}}. \quad (22)$$

Враховуючи технологічний зв'язок між магістральними газопроводами і газорозподільними мережами, при газодинамічних розрахунках газових мереж доцільно перейти від стандартної температури вимірювання об'єму 0 °С до значення 20 °С. Такий перехід уже здійснюється на практиці, але ще не узаконений в нормативних документах.

Зміна стандартної температури спричинить зміну фізичних, термодинамічних та енергетичних властивостей природного газу і газоводневих сумішей. Для встановлення закономірностей зазначеної зміни нами проведено повний комплекс описаних вище досліджень для 17 варіантів складу компонентів базового природного газу та повного діапазону зміни

молярної концентрації водню в газоводневих сумішах для стандартної температури вимірювання об'єму 20 °С. Величину стандартного тиску і стандартної температури згоряння енергоносія при розрахунках не змінювали.

За результатами багатоваріантних розрахунків одержані аналітичні залежності властивостей газоводневих сумішей за змінених стандартних умов від молярної концентрації водню та значень аналогічних параметрів для базового природного газу. Встановлено, що структура аналітичних виразів не змінилась, зміні підлягають тільки числові коефіцієнти математичних моделей:

– для густини газоводневої суміші за стандартної температури 20 °С

$$k_{\rho} = 1,0036 \cdot 10^{-2} \rho_2 - 8,5872 \cdot 10^{-4}; \quad (23)$$

– для відносної густини газоводневої суміші за стандартної температури 20 °С

$$k_{\Delta} = 1,0051 \cdot 10^{-2} \Delta_2 - 7,2342 \cdot 10^{-4}; \quad (24)$$

– для вищої об'ємної теплоти згоряння густини газоводневої суміші за стандартної температури 20 °С

$$k_G = 1,0028 \cdot 10^{-2} (Hv)_2^G - 1,1967 \cdot 10^{-1}; \quad (25)$$

– для нижчої об'ємної теплоти згоряння густини газоводневої суміші за стандартної температури 20 °С

$$k_N = 1,0020 \cdot 10^{-2} (Hv)_2^N - 1,0101 \cdot 10^{-1}; \quad (26)$$

– для кінематичної в'язкості газозводневої суміші за стандартної температури 20 °С в діапазоні молярних концентрацій водню (0-60) %

$$k_{1v} = 6,3494 \cdot 10^{-3} \cdot v_2 - 9,7877 \cdot 10^{-9}; \quad (27)$$

$$k_{1v} = 8,4730 \cdot 10^{-5} \cdot v_2 + 1,6680 \cdot 10^{-9}; \quad (28)$$

– для кінематичної в'язкості газозводневої суміші за стандартної температури 20 °С в діапазоні молярних концентрацій водню (60-100) %

$$K_{1v} = -49,870 \cdot v_2 + 1,1877 \cdot 10^{-3}; \quad (29)$$

$$K_{2v} = -2,0718 \cdot v_2 + 5,0971 \cdot 10^{-5}; \quad (30)$$

$$K_{3v} = -2,9270 \cdot 10^{-2} \cdot v_2 + 7,2450 \cdot 10^{-7}; \quad (31)$$

$$K_{4v} = -1,3538 \cdot 10^{-4} \cdot v_2 + 3,4407 \cdot 10^{-9}. \quad (32)$$

Висновки

1. Встановлено, що знаючи фізико-хімічні, термодинамічні та енергетичні властивості природного газу, склад компонентів якого відповідає чинним нормативним вимогам щодо закачування в газотранспортну систему України, можна достовірно прогнозувати аналогічні властивості за стандартних умов для газозводневих сумішей з молярною концентрацією (0-100) % водню.

2. Одержано, що густина, відносна густина, вища і нижча об'ємна теплота згоряння газозводневої суміші за стандартних умов з достовірністю апроксимації понад 99 % лінійно залежить від молярної концентрації водню. Водночас, коефіцієнти математичних моделей можна описати лінійною функцією від відповідних властивостей базового природного газу, на основі якого сформована суміш.

3. Встановлено, що залежність кінематичної в'язкості газозводневої суміші за стандартних умов від молярної концентрації водню в повному діапазоні (0-100) % не вдається достовірно описати однією моделлю. Тому розроблено дві математичні моделі: для діапазону концентрацій водню (0-60) % та (60-100) %.

4. Розроблено математичні моделі для опису залежності кінематичної в'язкості газозводневої суміші від молярної концентрації водню у вигляді поліному другого порядку в діапазоні молярної концентрації водню (0-60) % та поліному третього порядку для діапазону концентрації водню (60-100) %. Коефіцієнти зазначених двох моделей з достовірністю апроксимації понад 99 % лінійно залежать від кінематичної в'язкості базового природного газу за стандартних умов.

5. Встановлено, що у випадку зміни стандартної температури вимірювання об'єму з 0 °С до 20 °С форма аналітичних залежностей властивостей газозводневих сумішей від молярної концентрації водню та властивостей базового природного газу не зміниться, однак помітно зміняться значення коефіцієнтів моделей.

6. Одержані формули можна використовувати для оперативного прогнозування властивостей газозводневих сумішей за відомих параметрів природного газу, до якого домішуватимуть водень.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

- 1 Quintino, F.M., Nascimento, N., Fernandes, E.C. Aspects of Hydrogen and Biomethane Introduction in Natural Gas Infrastructure and Equipment. *Hydrogen* 2021, 2, 301–318. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2030016>.
- 2 Topolski, Kevin, 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. 2022. Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP- 5400-81704. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>.
- 3 Ammar Ali Abd Samah Zaki Naji, Tye Ching Thian, Mohd Roslee Othman . Evaluation of hydrogen concentration effect on the natural gas properties and flow performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.141>
- 4 Łukasz Zabrzęski, Piotr Janusz, Krystian Liszka, Mariusz Łaciak, Adam Szurlej. The effect of hydrogen transported through a gas pipeline on the functioning of gas compression station work AGH DRILLING, OIL, GAS. Vol. 34.No. 4.2017. <http://dx.doi.org/10.7494/drill.2017.34.4.959>
- 5 Neacsu, A., Eparu, C.N., Panaitescu, C., Stoica, D.B., Ionete, B., Prundrel, A., Gal, S. Hydrogen–Natural Gas Mix-A Viable Perspective for Environment and Society. *Energies* 2023, 16, 5751. <https://doi.org/10.3390/en16155751>

6 Hamid Reza Nasriani. Advanced thermodynamics of hydrogen and natural gas blends for gas transmission and distribution networks. *Measurement: Sensors*, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101765>

7 Accurate Predictions of the Effect of Hydrogen Composition on the Thermodynamics and Transport Properties of Natural Gas Ismail I. I. Alkhatib, Ahmed AlHajaj, Ali Almansoori, Lourdes F. Vega. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00363>

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

9 Середюк М. Д., Великий С. В. Вплив концентрації водню на властивості газоводневих сумішей та газодинамічні процеси в розподільних газових мережах. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2023. №2(40). С. 25-37. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-25-37](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-25-37).

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: 23.05.2025).

12 Кодекс газотранспортної системи. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text> (дата звернення: 23.05.2025).

13 ДСТУ 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. Quintino, F. M., Nascimento, N., & Fernandes, E. C. (2021). Aspects of hydrogen and biomethane introduction in natural gas infrastructure and equipment. *Hydrogen*, 2(3), 301–318. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2030016>

2. Topolski, K., Reznicek, E. P., Cakir Erdener, B., San Marchi, C. W., Ronevich, J. A., Fring, L., Simmons, K., Fernandez, O. J. G., Hodge, B.-M., & Chung, M. (2022). *Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: Review of the state of technology* (NREL/TP-5400-81704). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>

3. Samah, A. A. A., Zaki Naji, T. C., & Othman, M. R. (2020). Evaluation of hydrogen concentration effect on the natural gas properties and flow performance. *International Journal of Hydrogen Energy*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.141>

4. Zabrzewski, Ł., Janusz, P., Liszka, K., Łaciak, M., & Szurlej, A. (2017). The effect of hydrogen transported through a gas pipeline on the functioning of gas compression station work. *AGH DRILLING, OIL, GAS*, 34(4), 959–970. <https://doi.org/10.7494/drill.2017.34.4.959>

5. Neacsu, A., Eparu, C. N., Panaitecu, C., Stoica, D. B., Ionete, B., Prundurel, A., & Gal, S. (2023). Hydrogen–natural gas mix-a viable perspective for environment and society. *Energies*, 16(15), 5751. <https://doi.org/10.3390/en16155751>

6. Nasriani, H. R. (2024). Advanced thermodynamics of hydrogen and natural gas blends for gas transmission and distribution networks. *Measurement: Sensors*, 31, 101765. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101765>

7. Alkhatib, I. I. I., AlHajaj, A., Almansoori, A., & Vega, L. F. (2022). Accurate predictions of the effect of hydrogen composition on the thermodynamics and transport properties of natural gas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(16), 5433–5448. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00363>

8. Serediuk, M. D. (2021). Hazodynamichni rezhymy ekspluatatsii hazovykh merezh nyzkoho tysku pry transportuvanni hazo-vodnyvykh sumishei [Gas dynamic operating modes of low pressure gas networks during transport gas-hydrogen mixtures]. / *International scientific journal «Inter nauka»*, (101), 52–62. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-1-6822> [in Ukrainian]

9. Serediuk, M. D., & Velykyi, S. V. (2023). Vplyv kontsentratsii vodniu na vlastyvyosti hazovodnyvykh sumishei ta hazodynamichni protsesy v rozpodilnykh hazovykh merezhakh [Influence of hydrogen concentration on the properties of gas-hydrogen mixtures and gas-dynamic processes in gas distribution networks]. *Oil and Gas Power Engineering*, (40), 25–37. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-25-37](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-25-37)[in Ukrainian]

10. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. (2019). **DBN V.2.5-20:2018 Hazopostachannia** [State Construction Norms V.2.5-20:2018. Gas supply]. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3019139736343151891/2023-01-19/ca4a4e37-6a57-4bf1-8a91-ec1c83a95344.pdf [in Ukrainian]

11. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniue derzhavne rehulivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh. (2015). **Kodeks hazorozpodilnykh merezh** [Code of Gas Distribution Networks]. Retrieved May 23, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> [in Ukrainian]

12. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniue derzhavne rehulivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh. (2015). **Kodeks hazotransportnoi systemy** [Code of Gas Transmission System]. Retrieved May 23, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text> [in Ukrainian]

13. Derzhavne pidpriumstvo «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standart-, zatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs»). (2021). **DSTU EN ISO 6976:2020 Pryrodnyi haz. Obchyslennia teploty zghoriannia, hustyny, vidnosnoi hustyny ta chysla Vobbe na osnovi komponentnoho skladu** [National Standard EN ISO 6976:2020. Natural gas. Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from compositional analysis]. [in Ukrainian]

PREDICTION OF PROPERTIES OF HYDROGEN GAS MIXTURES BASED ON KNOWN CHARACTERISTICS OF NATURAL GAS

Serediuk M. D.

Doctor of Technical Sciences, professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2748-926X>
e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua

Tsiurak V. Yu.

Postgraduate student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-4373-2239>
e-mail: vadym.tsiurak-a18524@nung.edu.ua

Abstract. One of the real ways to solve the problem of decarbonization is the use of gas-hydrogen mixtures as an alternative to natural gas in gas supply systems of settlements. The practical implementation of this technology requires solving a number of tasks related to ensuring the safety and reliability of transportation and distribution of energy carriers, adjusting the operating modes of existing gas distribution networks in order to supply the volumes of energy that were previously provided by natural gas. The operating parameters of pipelines directly depend on the properties of gas-hydrogen mixtures. The aim of the work is to obtain analytical dependencies that make it possible to predict the properties of a gas-hydrogen mixture with a certain molar concentration of hydrogen under standard conditions based on the relevant characteristics of the base natural gas. The composition of the components of the base natural gas must meet the regulatory requirements for supply to the gas transportation system of Ukraine. The study was conducted for two values of the standard temperature of volume measurement: 0 °C and 20 °C. Taking into account the requirements of regulatory documents, variants of the composition of the components of the base natural gas were formed and their properties were determined taking into account the real state. According to the results of multivariate calculations, the properties of gas-hydrogen mixtures were found for each variant of the base natural gas in the range of molar concentrations (0-100) % of hydrogen. Analytical dependences for predicting the density, relative density, higher and lower volumetric heat of combustion, higher and lower Wobbe number and kinematic viscosity of gas-hydrogen mixtures depending on the molar concentration of hydrogen and similar properties of the base natural gas were obtained using mathematical modeling methods. The proposed mathematical models can be used for operational gas-dynamic calculations of gas networks for the transportation of gas-hydrogen mixtures.

Keywords: alternative energy sources; hydrogen; gas distribution networks; density; volumetric heat of combustion; Wobbe number.