

РОЗРАХУНОК ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУМІШІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З ВОДНЕМ НА ОСНОВІ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО РІВНЯННЯ СТАНУ AGA-8

С. Я. Григорський, О. В. Іванов*

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел./факс (0342) 727139,
e-mail: oleksandr.ivanov@nuing.edu.ua

Досліджено вплив мольної частки водню в природному газі на його основні фізичні властивості із застосуванням рівняння стану газу на основі вільної енергії Гельмгольца (AGA-8). Із використанням методів регресійного аналізу, лінійної алгебри, теоретичних та методологічних основ гідравліки і газової динаміки, методів теорії розрахунку фізичних властивостей газів отримано відповідні уточнені математичні моделі термічних та калоричних властивостей газу в суміші з воднем. Розглянута задача на розрахунок основних фізичних властивостей природного газу із заданим компонентним мольним складом при додаванні до його складу водню із фактичним мольним вмістом після змішування із газом. Проведено порівняння між собою нормативних методик розрахунку фізичних властивостей газу відповідно до багатоконпонентного рівняння стану реального газу AGA-8 та класичної методики розрахунку властивостей газу з урахуванням фактичного вмісту водню у складі природного газу. Встановлено, що при визначенні густини та нижчої теплоти згоряння і числа Воббе газоводневої суміші за нормальних умов можна без суттєвої втрати точності використовувати спрощену класичну методику розрахунку (за молярною масою газу чи за густинами окремих компонентів газу за нормальних умов). При зміні мольної частки водню в газі від 0 до 40 % кінематична в'язкість газу за нормальних умов збільшується майже на 60 %. При цьому відповідне значення динамічної в'язкості газу зростає лише на 2 %. Тобто при гідравлічних розрахунках газових мереж можна нехтувати зміною динамічної в'язкості газу за нормальних умов, а враховувати лише зміну густини газу. Густина, нижча об'ємна теплота згоряння та відповідне число Воббе за нормальних умов адекватно описуються лінійними залежностями від мольної частки водню в складі газу. Динамічну та кінематичну в'язкість газу за нормальних умов можна описати за допомогою полінома другого степеня від мольної концентрації водню.

Ключові слова: водень, фундаментальне рівняння стану, декарбонізація, газорозподільні мережі, воднева енергетика, газоводневі суміші, AGA-8.

The effect of the mole fraction of hydrogen in natural gas on its basic physical properties has been studied using the equation of state of gas based on the Helmholtz free energy (AGA-8). Using the methods of regression analysis, linear algebra, theoretical and methodological foundations of hydraulics and gas dynamics, methods of the theory of calculating the physical properties of gases, refined mathematical models of thermal and caloric properties of gas mixed with hydrogen were obtained. The problem of calculating the basic physical properties of natural gas with a given component molar composition when hydrogen is added to its composition with the actual molar content after mixing with gas is considered. A comparison is made between the normative methods for calculating the physical properties of gas in accordance with the multicomponent equation of state of real gas AGA-8 and the classical method for calculating the properties of gas, taking into account the actual hydrogen content in the composition of natural gas. It has been established that when determining the density and lower calorific value and the Wobbe number of a gas-hydrogen mixture under normal conditions, it is possible to use a simplified classical calculation method (by the molar mass of gas or by the densities of individual gas components under normal conditions) without significant loss of accuracy. When the molar fraction of hydrogen in the gas changes from 0 to 40%, the kinematic viscosity of the gas under normal conditions increases by almost 60%. In this case, the corresponding value of the dynamic viscosity of the gas increases by only 2%. That is, in hydraulic calculations of gas networks, one can neglect the change in the dynamic viscosity of the gas under normal conditions, and take into account only the change in the density of the gas. Density, low volumetric heat of combustion and the corresponding Wobbe number under normal conditions are adequately described by linear dependences on the molar fraction of hydrogen in the gas composition. The dynamic and kinematic viscosity of a gas under normal conditions can be described using a polynomial of the second degree of the molar concentration of hydrogen.

Keywords: hydrogen, fundamental equation of state, decarbonization, gas distribution networks, hydrogen energy, gas-hydrogen mixtures, AGA-8.

Вступ

В якості нового глобального та екологічного енергоносія виступає водень, який можна використовувати як паливо у різноманітних машинах та апаратах і двигунах внутрішнього згоряння. Особливістю водневої енергетики є відсутність викидів парникових газів (насамперед, CO₂).

Світові тренди останнього десятиліття у сфері декарбонізації енергетичної сфери загалом та вуглеводневого сектору зокрема зумовили виникнення множини різноманітних технічних рішень. У сфері газової інфраструктури ключовим серед таких рішень є додавання газоподібного водню у середовище природного газу та передача кінцевим споживачам газоводневих сумішей.

Одним із основних завдань у створенні водневої енергетики є його транспортування на великі відстані. Перспективною є ідея використовувати для транспорту водню або суміші метану з воднем існуючу мережу магістральних газопроводів та для кінцевих споживачів газорозподільні мережі.

Саме тому актуальним є питання щодо розрахунку фізичних властивостей природного газу з воднем залежно від концентрації останнього.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Водень стає дедалі більш актуальним як новий глобальний енергоносіє. Стійкість такого тренду пов'язана з тим, що країни Європейського союзу наближаються до технологічної революції в енергетиці.

Роль водню в декарбонізації економіки України має велике значення у забезпеченні стабільності та підвищенні гнучкості всієї енергетичної системи, яке у кінцевому результаті призведе до розвитку відновлюваної енергетики у країні [1, 2].

Авторами [3] розглянуто існуючі технології виробництва водню, позитивні та негативні їх сторони, виконано прогноз щодо їх перспектив. Розглянуто можливі способи транспортування водню, серед яких основний акцент покладено на трубопровідний транспорт. Обґрунтовано доцільність транспортування газоводневих сумішей та чистого водню із використанням діючої газової інфраструктури. Розглянуто проблемні питання додавання водню в природний газ і його вплив на якість газової суміші, безпеку та довговічність трубопроводів, режимні параметри транспортування, комприму-

вання, редукування газової суміші, герметичність трубопроводів.

Започаткований в Україні проєкт регіональних газових компаній (РГК) із вивчення впливу водню на газорозподільні мережі дасть змогу уже через два роки прибрати значну частину технологічних перепон для розвитку водневої енергетики [4]. Організований регіональною газовою компанією проєкт є унікальний і дасть змогу дослідити вплив водню та газоводневих сумішей на українську газорозподільчу систему. В ньому, окрім технічних питань, пов'язаних із транспортуванням водню, виникають питання необхідності підвищення технічного рівня і ревізії нормативної бази у нафтогазовій сфері.

У роботі [5] авторами досліджені ймовірності прояву чинників негативного впливу на довкілля, споруди та персонал в разі вибуху водню та газоводневих сумішей внаслідок розгерметизації трубопроводу. В результаті виявлено критичні зони впливу при аварії, досліджено вплив маси водню та газоводневої суміші, а також відстані від центру вибуху, різниці тиску і величини його імпульсу.

Також були проведені дослідження на герметичність газових мереж у випадку їх використання для постачання газоводневих сумішей [6].

У випадку використання газових мереж населених пунктів для транспортування газоводневої суміші виникає потреба у дослідженні впливу суміші природного газу із воднем заданої концентрації на проєктні та експлуатаційні параметри роботи газорозподільних мереж.

У роботі [7] за допомогою математичного моделювання встановлено закономірності газодинамічних процесів у випадку транспортування газоводневих сумішей з різними об'ємними частками водню у газових мережах середнього та високого тиску при збереженні витрат та енергоємності елементів системи газопостачання, які характерні для транспортування природного газу.

Також автором [8] знайдено закономірності зміни фізико-хімічних властивостей сумішей газу з воднем, які необхідні для розрахунку газових мереж низького тиску з об'ємною часткою водню в діапазоні від нуля до 100%.

У роботі [9] встановлено особливості газодинамічних розрахунків будинкових (внутрішніх) газових мереж у разі застосуванні замість природного газу газоводневих сумішей.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

В світовій практиці для моделювання фізичних властивостей природного газу з точністю менше 0,5 % використовують багатоконпонентне рівняння стану реального газу AGA-8, що наведено в нормативному документі [10]. Вказане рівняння стану дозволяє розраховувати термодинамічні властивості газу, що включає один або кілька (до 21) компонентів в будь-якій комбінації. При цьому достовірні результати по розрахунку властивостей газу (густина в'язкість) отримуються при вмісті водню до 40 % (розширена область використання "expanded quality range") [11].

Тому виникає необхідність у порівнянні між собою нормативних методик розрахунку фізичних властивостей газу відповідно до [10-12] та класичної методики розрахунку властивостей газу [13] з урахуванням фактичного вмісту водню у складі природного газу.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження впливу мольної частки водню в природному газі на його основні фізичні властивості та розроблення відповідних уточнених математичних моделей.

При виконанні даної роботи застосовувалися методи лінійної алгебри, теоретичні та методологічні основи гідравліки і газової динаміки, методи теорії розрахунку фізичних властивостей газів на основі фундаментального багатоконпонентного рівняння стану для вільної енергії Гельмгольца, а також методи регресійного аналізу.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Розглянемо задачу на розрахунок основних фізичних властивостей природного газу із заданим компонентним мольним складом x_i при додаванні до його складу водню із фактичним мольним вмістом після змішування із газом x_{H_2} . Мольні частки компонентів газоводневої суміші x'_i після змішування знаходяться із розв'язку системи рівнянь (1) та (2):

$$x_1 : x_2 : \dots : x_n = x'_1 : x'_2 : \dots : x'_n, i ; \quad (1)$$

$$x_{H_2} + \sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad (2)$$

де n – кількість компонентів у складі природного газу до змішування із воднем

$$x'_i = (1 - x_{H_2}) \cdot x_i. \quad (3)$$

Відповідно до стандарту [14] всі фізичні властивості газів, що транспортуються газорозподільними мережами, розраховуються за нормальних умов $p_n = 0,101325 \text{ МПа}$, $T_n = 273,15 \text{ К}$.

Рівняння стану AGA-8 записується через фактор стисливості Z як функція відносної густини δ , оберненої відносної температури τ і молярних часток компонентів x_i із урахуванням неідеальної складової вільної енергії Гельмгольца у вигляді

$$Z = 1 + \frac{B \cdot \delta}{K^3} - \delta \cdot \sum_{n=13}^{18} C_n \cdot \tau^{u_n} + \quad (4)$$

$$+ \sum_{n=13}^{58} C_n \cdot \tau^{u_n} \cdot \delta^{b_n} \cdot (b_n - c_n \cdot k_n \cdot \delta^{k_n}) \cdot \exp(-c_n \cdot \delta^{b_n}),$$

де B – другий віріальний коефіцієнт;

K – параметр розміру суміші;

C_n – функція молярних часток компонентів газу;

u_n, b_n, c_n, k_n – коефіцієнти рівняння стану і функції молярних часток компонентів.

Густина газу за робочих умов (абсолютних тиску p та температури T) обчислюється за рівнянням Менделєєва-Клапейрона для реального газу

$$\rho = \frac{p}{Z \cdot R \cdot T}, \quad (5)$$

де R – питома масова газова стала природного газу.

В нормативному документі [11] наведено залежність для розрахунку динамічної в'язкості газу за робочих умов (абсолютних тиску p та температури T)

$$\eta = \eta_0 + \frac{2,63094 \cdot M^{0,5} \cdot p_{нк}^{2/3}}{T_{нк}^{1/6}} \cdot \Delta\eta, \text{ мкПа} \cdot \text{с}, \quad (6)$$

де η_0 – динамічна в'язкість природного газу в розрідженому стані (за атмосферного тиску та температури), мкПа·с;

M – молярна маса газу, кг/кмоль;

$p_{нк}, T_{нк}$ – псевдокритичні тиск, МПа, та температура газу, К;

$\Delta\eta$ – додаткова складової динамічної в'язкості природного газу, яка є поліноміальною функцією від зведених безрозмірних значень густини і температури газу [11].

Кінематична в'язкість природного газу обчислюється за класичною формулою

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (7)$$

Нижча об'ємна теплота згоряння реального природного газу, МДж/м³, обчислюється за формулою [12] (для розрахунків мереж низького тиску прийнято умови вимірювання 0 °C/0 °C)

$$Q_{np} = \frac{Q_{np0}}{Z_{mix}}, \quad (8)$$

де Q_{np0} – значення ідеальної нижчої об'ємної теплоти згоряння природного газу

$$Q_{np0} = \sum_{i=1}^N x_i' \cdot Q_{np0i}, \quad (9)$$

Q_{np0i} – значення ідеальної нижчої об'ємної теплоти згоряння для i -го компонента природного газу (табличні значення відповідно до [12]);

N – кількість горючих компонентів в складі природного газу;

Z_{mix} – коефіцієнт стисливості газу для стандартних умов вимірювань

$$Z_{mix} = 1 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sqrt{b_i} \right)^2, \quad (10)$$

$\sqrt{b_i}$ – значення коефіцієнта додавання для i -го компонента природного газу (табличні значення відповідно до [7])

Нижче число Воббе для природного газу обчислюється за формулою

$$W_{np} = Q_{np} \cdot \sqrt{\frac{Z_{mix}}{\Delta}}. \quad (11)$$

Проведемо порівняння між собою нормативних методик розрахунку фізичних властивостей газу відповідно до [10-12] та класичної методики розрахунку властивостей газу [13] з урахуванням фактичного вмісту водню у складі природного газу.

Вихідні дані для розрахунку фізичних властивостей природного газу наведено в таблиці 1. Це компонентний склад природного газу, до якого буде додаватись водень в необхідній кількості, щоб отримати його задану концентрацію в газі x_{H_2} .

Таблиця 1 – Мольний склад природного газу, який буде змішуватись у заданих пропорціях з воднем

Параметр	Значення параметра
Метан (CH ₄)	95,08
Етан (C ₂ H ₆)	1,63
Пропан (C ₃ H ₈)	0,20
Н-бутан (н-C ₄ H ₁₀)	0,07
Пентан (C ₅ H ₁₂) та алкани	0,07
Азот (N ₂)	1,75
Двоокис вуглецю (CO ₂)	1,20

Розрахунки виконуємо за нормативною та класичною методиками для концентрації водню в суміші від 0 до 40 %. Графічна інтерпретація отриманих результатів наведена на рисунках 1-5.

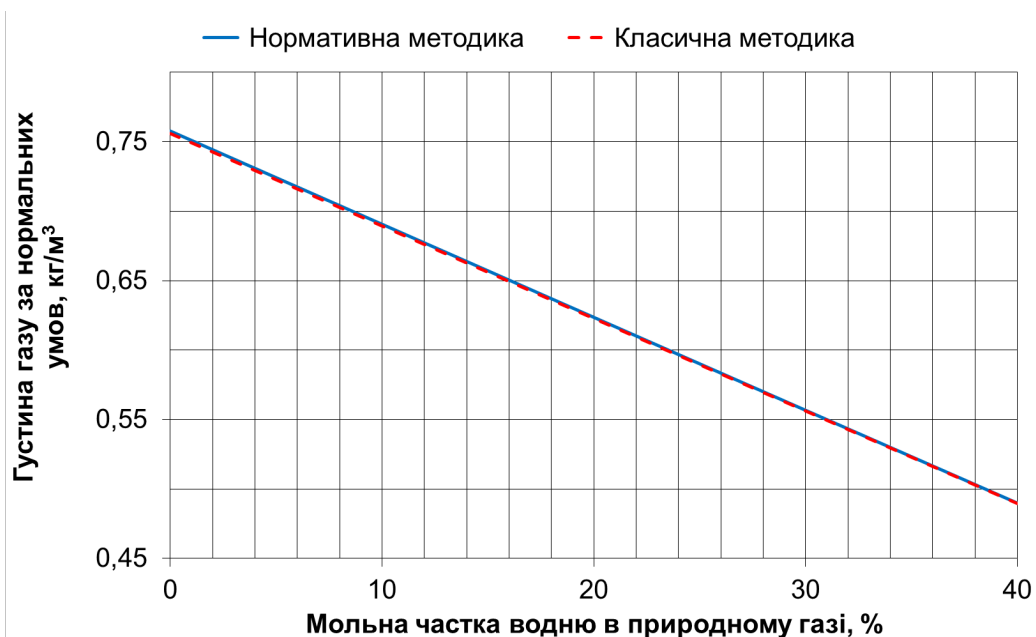


Рисунок 1 – Динаміка зміни густини за нормальних умов газозводневої суміші від концентрації водню

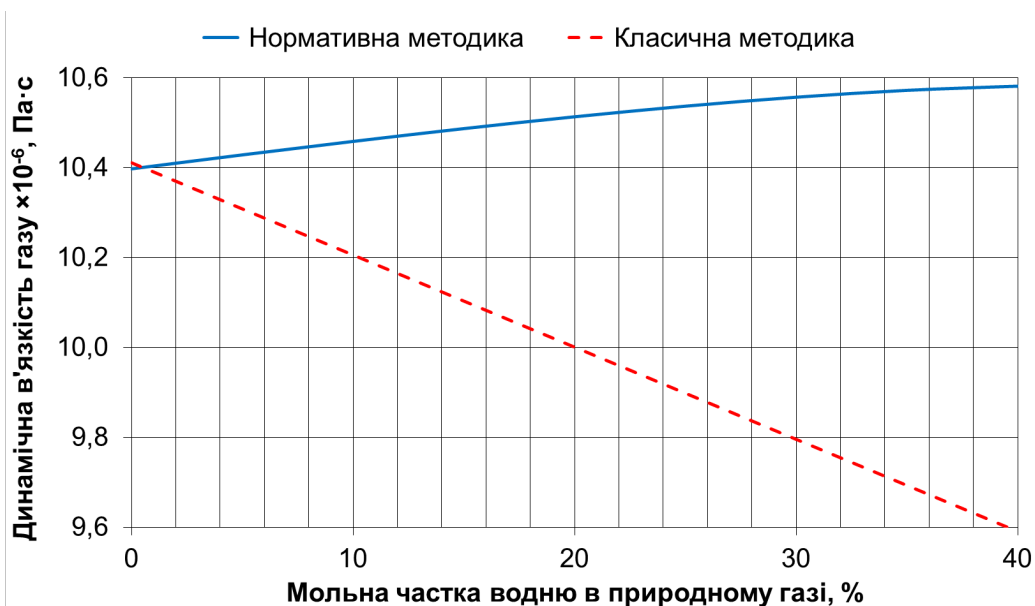


Рисунок 2 – Динаміка зміни абсолютної в'язкості газодневої суміші від концентрації водню

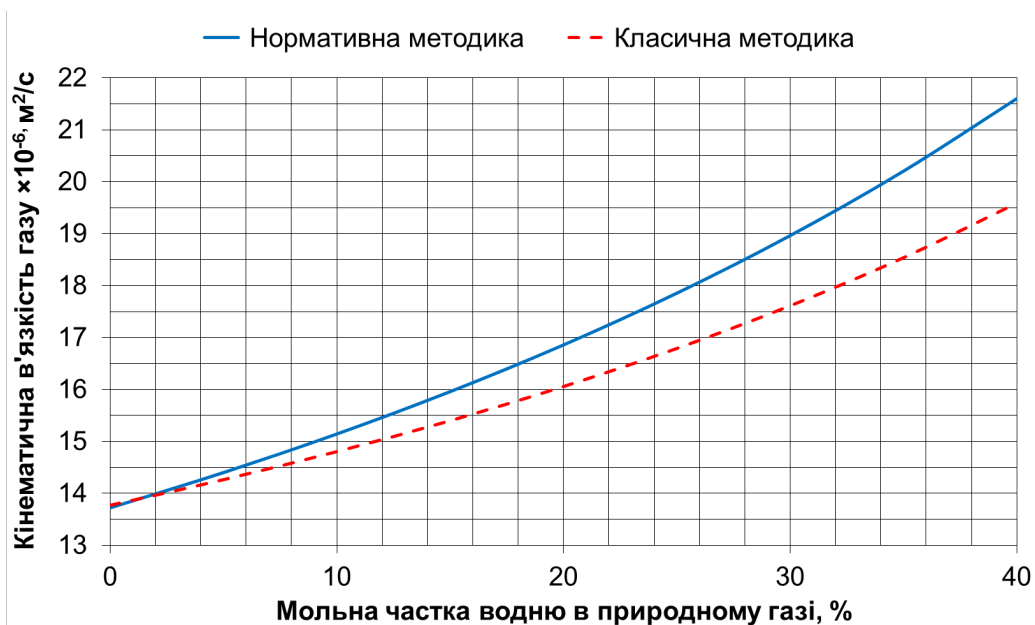


Рисунок 3 – Динаміка зміни кінематичної в'язкості газодневої суміші від концентрації водню

З рисунка 1 видно, що густина газу в суміші з воднем за нормальних умов монотонно зменшується зі збільшенням концентрації водню. Тобто при зміні вмісту водню від 0 до 40 % густина газу за нормальних умов відповідно до нормативної методики зменшується від 0,7577 до 0,4898 кг/м³ (або на 35,3 %). Обидві лінії густини, побудовані як за нормативною, так і за класичною методикою, практично співпадають. Найбільше відносне відхилення між вказаними густинами газу становить 0,23 % за відсутності водню в складі газу, а при вмісті водню 40 % складає всього 0,05 %.

Як видно з рисунка 2, абсолютна в'язкість газодневої суміші, що розрахована за нормативною методикою, збільшується нелінійно зі зростанням вмісту водню в газі від 0 до 40 % на 1,77 %. При цьому динамічна в'язкість газу з воднем відповідно до класичної методики з використанням формули Сатерленда лінійно зменшується на 7,88 % при зростанні вмісту водню в досліджуваному діапазоні.

З рисунка 3 видно, що кінематична в'язкість газодневої суміші зростає зі збільшенням концентрації водню. Такий результат отримано для обох методик розрахунку. При використанні класичної методики кінематична

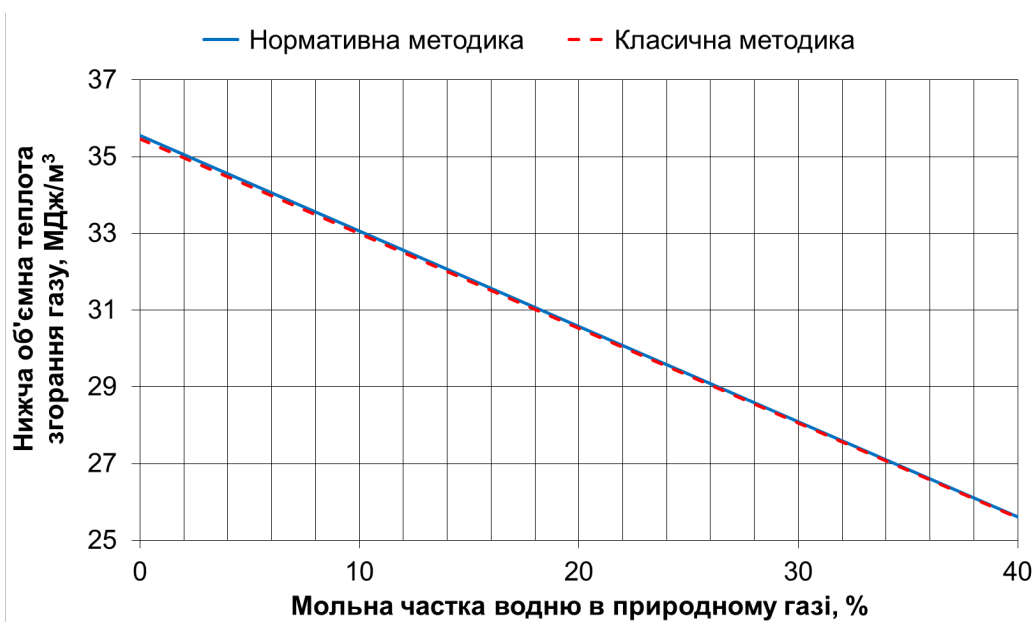


Рисунок 4 – Динаміка зміни нижчої теплоти згорання за нормальних умов газоводневої суміші від концентрації водню

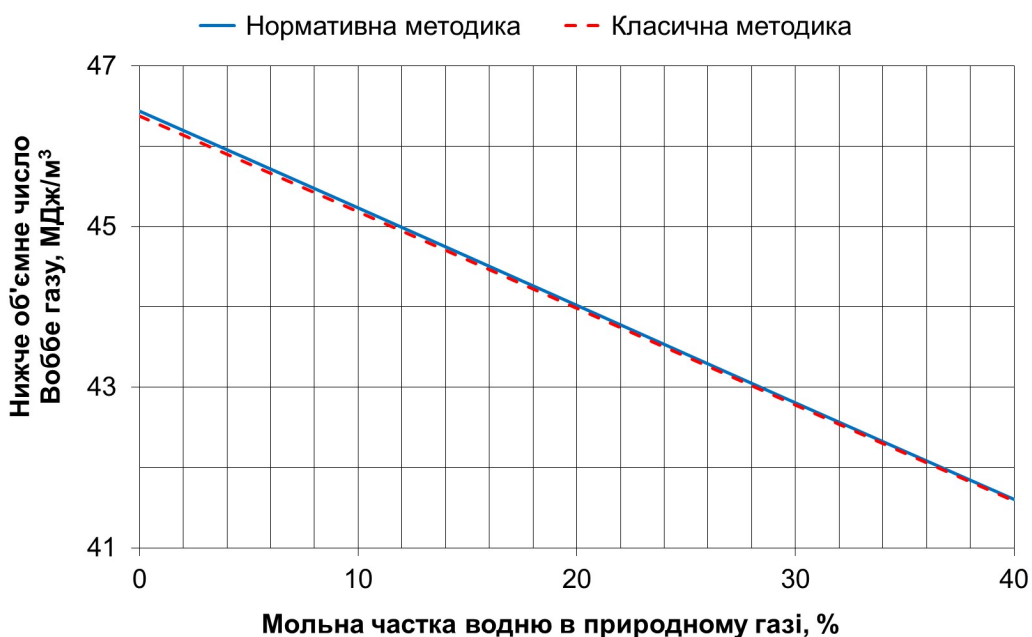


Рисунок 5 – Динаміка зміни нижчого числа Воббе за нормальних умов газоводневої суміші від концентрації водню

в'язкість газу знижується до 9,32 % порівняно з нормативною методикою для вмісту водню в газі, що складає 40 %. При зміні частки водню в складі газу від 0 до 40 % кінематична в'язкість газу відповідно до нормативної методики змінюється від 10,40 до 21,60 мм²/с, тобто збільшується на 57,4 %.

З рисунків 4 та 5 видно, що нормативна методика [12] та стандартна [13] на основі правила адитивності дають практично однакові результати по теплотворній здатності та числі Воббе для газоводневої суміші. Це можна по-

яснити тим, що коефіцієнт стисливості газу, який входить у формули нормативної методики, практично дорівнює одиниці за нормальних умов, за яких проводились розрахунки теплоти згорання та числа Воббе. При цьому найбільше відхилення результатів за обома методиками становить 0,25 % для теплотворної здатності та 0,13 % для числа Воббе. За зміни вмісту водню в досліджуваному діапазоні від 0 до 40 % нижча теплота згорання лінійно зменшується на 28,0 % та число Воббе на 10,4 %.

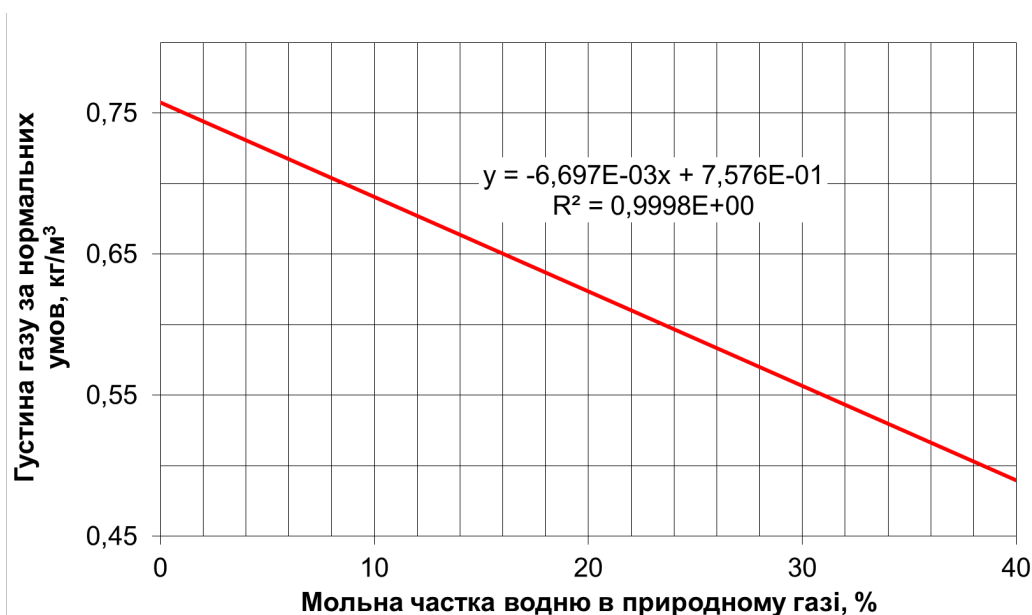


Рисунок 6 – Результати математичного моделювання густини газу за нормальних умов від вмісту водню

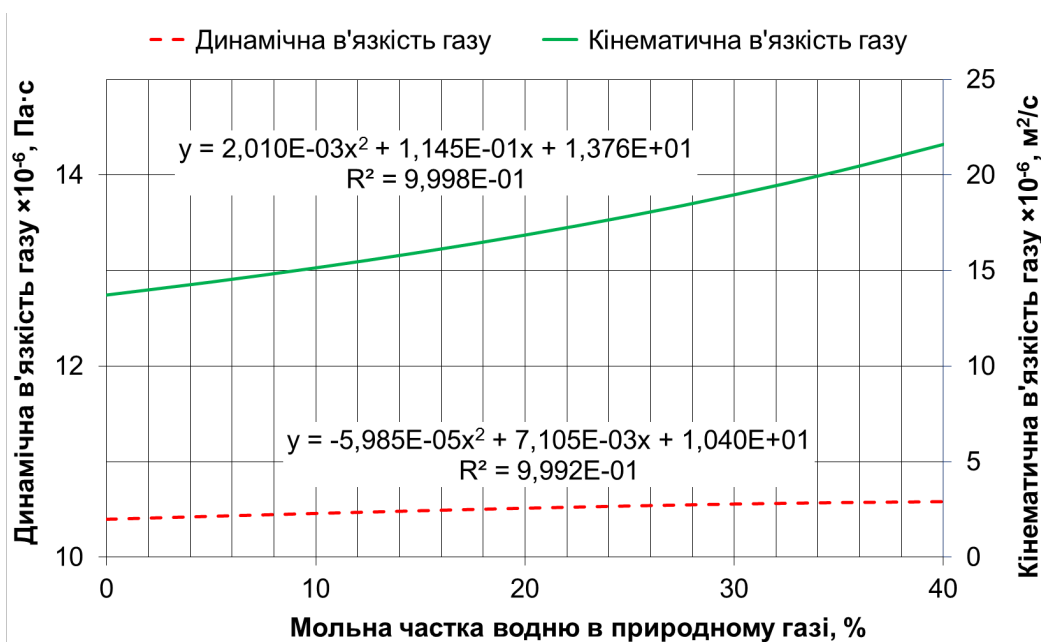


Рисунок 7 – Результати математичного моделювання динамічної та кінематичної в'язкості газу за нормальних умов від вмісту водню

Результати математичного моделювання фізичних властивостей природного газу в суміші з воднем за нормативними методиками [10-12] наведено на рисунках 6-8.

Як видно з рисунків 6-8, з високим ступенем достовірності апроксимації ($R^2 > 0,995$) можна описати лінійними функціями від мольної частки водню в складі газу такі фізичні властивості, як: густина, нижча об'ємна теплота згоряння та нижче об'ємне число Воббе за нормальних умов. Динамічна та кінематична в'язкість газу за нормальних умов описується за допомогою полінома другого степеня від

концентрації водню. Дані залежності можна отримати для будь-якого природного газу заданого компонентного складу.

Висновки

1. Встановлено, що при визначенні густини та нижчої теплоти згоряння і числа Воббе газо-водневої суміші за нормальних умов можна без суттєвої втрати точності застосовувати спрощену класичну методику розрахунку (за молярною масою газу чи за густинами окремих компонентів газу за нормальних умов).

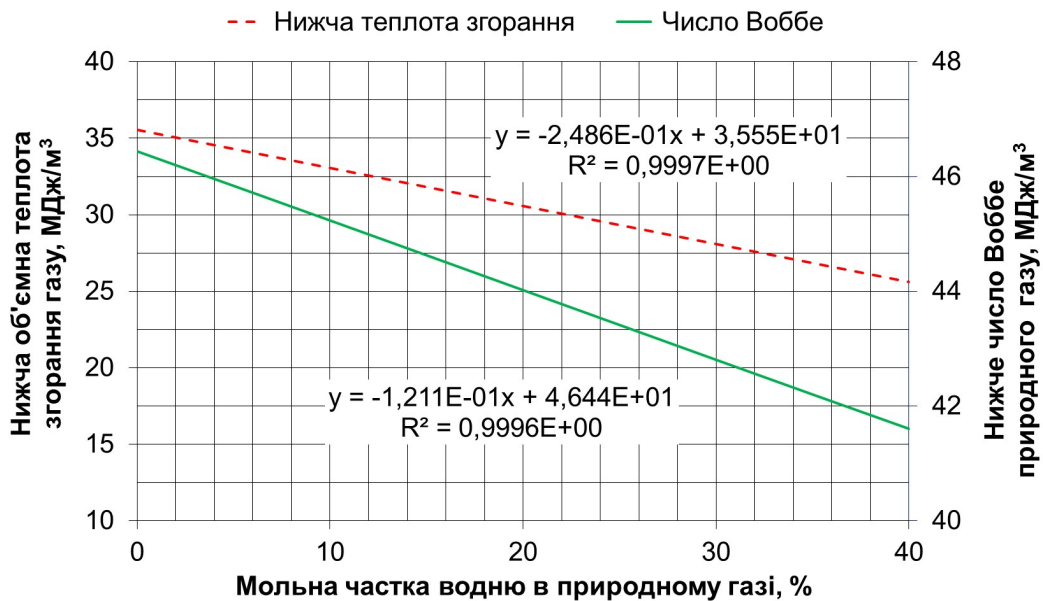


Рисунок 8 – Результати математичного моделювання нижчої теплоти згоряння та числа Воббе газу за нормальних умов від вмісту водню

2. При зміні мольної частки водню в газі від 0 до 40 % кінематична в'язкість газу за нормальних умов збільшується майже на 60 %. При цьому відповідне значення динамічної в'язкості газу зростає лише на 2 %. Тобто при гідравлічних розрахунках газових мереж можна нехтувати зміною динамічної в'язкості газу за нормальних умов, а враховувати лише зміну густини газу.

3. Густина, нижча об'ємна теплота згоряння та відповідне число Воббе за нормальних умов адекватно описуються лінійними залежностями від мольної частки водню в складі газу. Динамічну та кінематичну в'язкість газу за нормальних умов можна описати за допомогою полінома другого степеня від мольної концентрації водню.

Література

1. Никоноров О. Б. Роль газотранспортної інфраструктури України в розвитку водневої енергетики. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 5. С. 3-8.
2. Карп І. М., Уніговський Л. М. Водень: сучасний стан проблеми та напрями майбутнього використання. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 5. С. 15-23.
3. Дорошенко Я. В., Карпаш М. О., Стецюк С. М., Бабельський Р. М., Воловецький В. Б. Перспективи та проблемні питання становлення і розвитку водневої енергетики в Україні. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 1(82). С. 7-33.

4. Костогриз К. П. Перші випробування українських газових мереж на водні. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 5. С. 24-30.

5. Карпаш М. О., Олійник А. П., Райтер П. М., Яворський А. В. Оцінка ймовірностей виникнення факторів негативного впливу при аварійному вибуху водню та газоводневих сумішей. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 5. С. 31-34.

6. Карпаш М. О., Олійник А. П., Райтер П. М., Яворський А. В., Уніговський Л. М. Дослідження герметичності газорозподільних мереж у разі їх використання для постачання газоводневих сумішей. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 6. С. 14-23.

7. Середюк М. Д. Особливості газодинамічних процесів у газових мережах середнього і високого тиску за транспортування газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 2 (102). С.87-95.

8. Середюк М. Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 1 (101). Т.1. С. 52-62.

9. Середюк М.Д. Особливості газодинамічного розрахунку внутрішніх газових мереж при застосуванні газоводневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 11 (111). С. 73-80.

10. ISO 20765-1. Natural gas – Calculation of thermodynamic properties: Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications. ISO Copyright Office: Geneva, 2005.

11. ГОСТ 30319.3-2015. Газ природный. методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о компонентном составе. Стандартинформ, 2016.

12. ISO 6976:2016. Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition. BSI Standards Limited, 2016.

13. Середюк М.Д., Малик В.Я., Болонний В.Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 435 с.

14. ДБН В.2.5-20-2018. Газопостачання. [Чинний від 2019-07-01]. Вид. офіц. Київ.: Укрархбудінформ, 2019. 115 с.

References

1. Nykonorov O. B. Rol hazotransportnoi infrastruktury Ukrainy v rozvytku vodnevoi enerhetyky. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 5. P. 3-8. [in Ukrainian]

2. Karp I. M., Unihovskyi L. M. Voden: suchasnyi stan problemy ta napriamy maibutnoho vykorystannia. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 5. P. 15-23. [in Ukrainian]

3. Doroshenko Ya. V., Karpash M. O., Stetsiuk S. M., Babelskyi R. M., Volovetskyi V. B. Perspektyvy ta problemni pytannia stanovlennia i rozvytku vodnevoi enerhetyky v Uk-raini. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2022. No 1(82). P. 7-33. [in Ukrainian]

4. Kostohryz K. P. Pershi vyprobuvannia ukrainskykh hazovykh merezh na vodni. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 5. P. 24-30. [in Ukrainian]

5. Karpash M. O., Oliinyk A. P., Raiter P. M., Yavorskyi A. V. Otsinka ymovirnosti vynyknennia faktoriv nehatyvnoho vplyvu pry avariinomu vybukhu vodniu ta hazovodnykh sumishei. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 5. P. 31-34. [in Ukrainian]

6. Karpash M. O., Oliinyk A. P., Raiter P. M., Yavorskyi A. V., Unihovskyi L. M. Doslidzhennia hermetychnosti hazorozpodilnykh merezh u razi yikh vykorystannia dlia postachannia hazovodnykh sumishei. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 6. P. 14-23. [in Ukrainian]

7. Serediuk M. D. Osoblyvosti hazodynamichnykh protsesiv u hazovykh merezhakh serednoho i vysokoho tysku za transportuvannia hazovodnykh sumishei. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka»*. Kyiv, 2021. No 2 (102). P.87-95. [in Ukrainian]

8. Serediuk M. D. Hazodynamichni rezhymy ekspluatatsii hazovykh merezh nyzkoho tysku pry transportuvanni hazovodnykh sumishei. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka»*. Kyiv, 2021. No 1 (101). T.1. P. 52-62. [in Ukrainian]

9. Serediuk M.D. Osoblyvosti hazodynamichnoho rozrakhunku vnutrishnykh hazovykh merezh pry zastosuvanni hazovodnykh sumishei. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka»*. Kyiv, 2021. No 11 (111). P. 73-80. [in Ukrainian]

10. ISO 20765-1. Natural gas – Calculation of thermodynamic properties: Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications. ISO Copyright Office: Geneva, 2005.

11. GOST 30319.3-2015. Gaz prirodnyy. metody rascheta fizicheskikh svoystv. Vychisleniye fizicheskikh svoystv na osnove dannykh o komponentnom sostave. Standartinform. 2016. [in Russian]

12. ISO 6976:2016. Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition. BSI Standards Limited, 2016.

13. Serediuk M.D., Malyk V.Ia., Bolonnyi V.T. Proektuvannia ta ekspluatatsiia system hazopostachannia naselenykh punktiv. Ivano-Frankivsk: Fakel, 2003. 435 p. [in Ukrainian]

14. DBN V.2.5-20-2018. Hazopostachannia. [Chynnyi vid 2019-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv.: Ukrarkhbudinform, 2019. 115 p. [in Ukrainian]