

ПЕРСПЕКТИВИ І ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ЯК ЕНЕРГОНОСІЯ

В. Я. Грудз , Я. С. Капушак 

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: volodymyr.hrudz@nung.edu.ua*

Показано, що процес використання домішок водню до природного газу має ряд суттєвих переваг, до яких слід віднести збільшення питомої теплоти згоряння, що суттєво зменшує (при сталих енергопотребках) обсяги подачі енергоносія споживачу, та зниження шкідливого впливу продуктів згоряння на довкілля., адже використання газоводневої суміші суттєво знижує викиди вуглекислого газу в атмосферу.

До недоліків використання водню в якості домішки до природного газу якості енергоносія слід в першу чергу слід віднести проблемні питання промислових обсягів видобування водню, пов'язані з енерговитратами на технологічні процеси; окрім того наявність водню в трубопроводах призведе до процесу декарбонізації сталі, що викличе зниження її механічних характеристик і в кінцевому результаті підвищення аварійності трубопровідного транспорту енергоносія; зберігання газоводневої суміші в період неопалювального сезону в порожнині газотранспортних магістралей вимагає суттєвого збільшення енерговитрат.

Використання водню як енергоносія в промислових масштабах вимагає суттєвих технічних і технологічних змін в енергосистемі держави в цілому, що ставить перед системою енергозабезпечення ряд важливих проблем, які вимагають екстреного вирішення; для їх реалізації запропоновано методіку оптимізації використання газоводневої суміші в якості енергоносія за критерієм мінімуму енерговитрат на трубопровідний транспорт.

Ключові слова *оптимізація енергоносіїв, водень, газоводнева суміш, енергоефективність, енерговитрати, оптимізація.*

Вступ

Бурхливий розвиток промислового виробництва і народного господарства в світовому масштабі за останній час вимагає енергетичного забезпечення виробничої інфраструктури. З вказаною метою отримала розвиток система розробки та вдосконалення енергоносіїв, до яких ставляться особливі вимоги [1]. В першу чергу вискоєфективний енергоносій повинен володіти високою енергоємністю, тобто вивільнювати при

його використанні (спалюванні) значний обсяг енергії, що характеризується питомою теплотворною здатністю. Вуглеводневі енергоносії (природний газ, нафта, вугілля) на даний момент розвитку промислового виробництва, техніки і технологій перестали задовольняти вимогам щодо енергоефективності [2-4]. Окрім того ряд родовищ нафти, газу, газового конденсату працюють на межі вичерпання свого енергоресурсу, що призводить до зростання цінової вартості вуглеводневих енергоносіїв [5, 6].

Висока питома теплота згоряння водню ставить його на найвищий щабель серед відомих на даний час енергоносіїв. В порівнянні з метаном, найбільш калорійним газом серед вуглеводневих енергоносіїв (питома теплота згоряння 49,8 кДж/кг), енергоефективність водню майже в три рази вища (питома теплота згоряння 142,9 кДж/кг). Тому питання практичного використання водню викликає інтерес як в наукових колах, так і в промисловості

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Для оцінки енергоефективності використання водню як інгредієнта газової суміші з метаном виконано розрахунки результатів процесу горіння. Зауважимо, що за даними [2, 3] допустима концентрація водню в суміші з метаном з точки зору безпечного транспортування і зберігання енергоносія не повинна перевищувати 20% за масою. Тому розрахунок питомої теплоти згоряння суміші виконано за масовим вмістом водню в суміші в межах 0 – 20%, причому відносне значення питомої теплоти згоряння визначалося у відношенні до значення питомої теплоти згоряння чистого метану. Слід врахувати, що використання водню як горючої домішки до метану призведе до зміни складу продуктів згоряння в кисневому середовищі: концентрація водяної пари в продуктах згоряння зросте при зменшенні концентрації вуглекислого газу в них [4].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Як показують дослідження, питома теплота згоряння суміші метану з воднем зростає при збільшенні концентрації водню по закону, близькому до лінійного, і при максимально допустимій концентрації водню спостерігається її збільшення понад 37%, що, безперечно, дозволяє рекомендувати домішки водню для збільшення енергоефективності пального. Окрім того, зниження концентрації вуглекислого газу в продуктах згоряння при цьому приблизно на 6% дозволить покращити екологічну сторону процесу використання газозводневої суміші в якості енергоносія.

Однак, використання водню як енергоносія в промислових масштабах України вимагає суттєвих технічних і технологічних змін в енергосистемі держави в цілому, що ставить перед системою енергозабезпечення ряд важливих проблем, які вимагають екстреного вирішення.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є оцінка переваг і недоліків використання газозводневих сумішей в якості енергоносіїв в мережах газопостачання для

прийняття керівних рішень надійної експлуатації газотранспортних систем.

Дослідження

Однією з найважливіших проблем в цьому плані є проблема промислового виробництва водню в необхідних обсягах.

За даними енергостату [6] в 2023 році в Україні спожито в якості енергоносія 19,8 млрд. кубометрів природного газу. Збільшення видобутку власного газу в державі в 2024 році на 2,2% свідчить про необхідність зростання обсягів газоспоживання. Якщо з цією метою запропонувати використання водню в суміші 20% з природним газом, то обсяг промислового виробництва водню повинен скласти 3,96 млрд. кубометрів. Як вказувалось вище, водень виробляється через перетворення водяної пари, видобування водню вимагає додаткових витрат енергії з використанням викопних видів палива, наприклад, природного газу, нафти чи вугілля. Енергоємність одержаного водню менша від енергії, яка міститься у вихідному паливі, але завдяки високому ККД системи вона може бути використана більш повно, ніж при безпосередньому спалюванні вихідного палива. Виробництво зеленого водню здійснюється з використанням електроенергії, отриманої за допомогою відновлювальних джерел: вітру, сонця, біомаси. Однак, великі затрати енергії на видобуток водню і відсутність техніки і технології для його промислового виробництва на даному етапі роблять промислове використання водню як енергоносія проблематичним.

Іншою проблемою використання водню як енергоносія в промислових масштабах є проблема його зберігання.

Враховуючи річну потребу у водні (приблизно 4 млрд. кубометрів) і сезонну нерівномірність енергоспоживання, можна встановити, що сезонний обсяг зберігання газоводневої суміші складатиме 40 млн. кубометрів. Такий обсяг зберігання газоводневої суміші обумовлений сезонною нерівномірністю газоспоживання. Як відомо [13-15], коефіцієнт сезонної нерівномірності газоспоживання за 2023 рік складав $k_c=0,94$. Апроксимація залежності обсягів газоспоживання на протязі року синусоїдальною кривою дає

$$Q(t)=Q_{cp}[1+(1-1/k_c)\sin(\pi t/6+f)] \quad (1)$$

де Q_{cp} – середньорічний місячний обсяг газоспоживання, млн.м³.міс; t – час, міс.

Тоді обсяг сезонного зберігання газу складе

$$V=2 \int_0^{\tau} Q_{cp}(1-1/k_c)\sin(\pi t/6)dt \quad (2)$$

Після нескладних перетворень, підставивши вихідні дані, отримаємо зазначений вище обсяг сезонного зберігання газоводневої суміші.

Виникає питання: в яких ємностях можна зберігати такий обсяг газоводневої суміші в умовах України?

Слід зауважити, що за даними [6] закачування водню в пласт підземних сховищ призводить до його реакції з вуглецем і перетворення в клас вуглеводнів. Тому використання підземних сховищ газу для зберігання водню недоцільне.

Єдиним об'єктом, в який може бути закачана газоводнева суміш в заданому об'ємі з метою сезонного зберігання, являється порожнина лінійної частини магістральних газопроводів, які на даний час не використовуються для транспортування сибірського газу через територію України. Найбільш придатною для такого використання є лінійна частина газопроводу «Прогрес» діаметром 1420x20 мм і протяжністю 354,1 км, об'єм порожнини якої складає 529363,21 м³ при робочому тиску 7,5 МПа

Як відмічалось вище, з розчинністю водню в металах пов'язана декарбонізація сталі, тобто його здатність дифундувати через метал. Дифузія через вуглецевий сплав (наприклад, трубку сталь) супроводжується руйнуванням сплаву внаслідок взаємодії водню з вуглецем. Це явище має вплив на характеристики міцності трубної сталі, що призведе до руйнування трубопроводу при зберіганні в порожнині труб водню. Водень практично не розчиняється в сріблі, однак покривати внутрішню поверхню трубопроводу сріблом для запобігання декарбонізації сталі при зберіганні водню очевидно економічно не доцільно.

В стверджується, що декарбонізація сталі при контакті з воднем не спостерігається, якщо масова концентрація водню в газоводневій суміші з метаном не перевищує 20%. Тому в порожнині газопроводів, які тимчасово не експлуатуються за призначенням, доцільно зберігати з метою вирівнювання сезонної нерівномірності газоспоживання не чистий водень, а газоводневу суміш з масовою концентрацією водню до 20%.

Молекулярна маса водню у 8 разів менша за молекулярну масу метану, який є основною складовою частиною природного газу. Тому за нормальних умов водень при однаковій масі з метаном займає у 8 разів більший об'єм. Це викликає певні труднощі при зберіганні газоводневої суміші. В першу чергу збільшення масової концентрації водню в газоводневій суміші спричинить зростання умовного мольного її об'єму, що в свою чергу призведе до зростання тиску при закачуванні, і, як наслідок, до зростання енерговитрат на закачування газоводневої суміші в порожнину газопроводу для сезонного зберігання.

Якщо вважати процес закачування газоводневої суміші в порожнину газопроводу відомого геометричного об'єму для сезонного зберігання ізоtermічним, то максимальний тиск в трубопроводі складе

$$P = MzRT / V, \quad (3)$$

де M – маса газоводневої суміші, закачаної в трубопровід геометричним об'ємом V при сталій температурі T ; R – газова стала газоводневої суміші при масовій концентрації водню g_H

$$R = R_H \cdot g_H + R_{газу} \cdot (1 - g_H),$$

$R_H, R_{газу}$ – газові сталі водню і природного газу відповідно; z – коефіцієнт стисливості газозводневої суміші.

Водень має суттєвий вплив на більшість трубопровідних елементів внаслідок високої проникної здатності, сприяє підвищенню їх крихкості та зниженню пластичності, що може викликати появу дефектів для існуючих газотранспортних та газорозподільних мереж. Концентрація до 20% водню в складі газозводневої суміші вважається допустимою, для неї немає потреби в реконструкції мережі [6]. Звідси виникає питання точного обліку об'єму газозводневих сумішей як пального для досягнення мети декарбонізації. Більшість існуючих моделей для точного обліку об'єму природного газу передбачає урахування його коефіцієнта стисливості, який у свою чергу залежить від компонентного складу, температури та тиску. Зауважимо, що для метану і природного газу з достатньою точністю коефіцієнт стисливості може бути розрахований в залежності від тиску і температури за формулою

$$z = 1 - 5,5 \frac{P \Delta^{1,3}}{T^{3,3}} \quad (4)$$

Суттєва зміна теплофізичних властивостей газозводневої суміші створює додаткові труднощі для обліку об'єму такого виду пального. На вимірювання об'єму безпосередньо впливають значення тиску та температури. Відмінність цих параметрів від нормальних умов буде створювати значним розбіжності між реальним та очікуваним обсягами зберігання газу. По суті, коефіцієнт стисливості відображає, наскільки термодинамічні властивості реальних газів відрізняються від властивостей ідеального газу [3].

Коефіцієнт стисливості можна визначати за емпіричними кореляційними залежностями, рівняннями стану газу, або за допомогою нейронних штучних мереж [3, 5]. Як відомо, емпіричні кореляції зазвичай мають низьку точність, проте широко застосовуються для розрахунків процесів постачання природного газу через їх простоту. Рівняння стану характеризуються високою точністю, однак складні у розрахунках, тому, в основному, використовуються для вимірювання витрати, де точність є критично важливою.

Важливе значення має також те, що для природного газу за збільшення тиску коефіцієнт стисливості буде зменшуватися для всіх значень температури. Коефіцієнт стисливості водню навпаки зростає і практично не залежить від значень температури в межах інтервалу (0°C 50°C) Тож очікуваним результатом є те, що коефіцієнт стисливості газозводневих сумішей зростатиме при збільшенні концентрації водню, або виявляти складнішу кореляційну залежність.

В Україні прийнято кореляційні методики розрахунку коефіцієнту стисливості, наведені у чинному СОУ 60.30019801100:2012 [2]. Один з

методів базується на використанні емпіричної формули, яка враховує не лише мольний вміст вуглекислого газу x_{CO_2} , а інших домішок, наприклад, водню x_{H_2}

$$z = 1,00185 + p \cdot \left(0,0523625 - \frac{20,3799}{T} - 0,244369 \cdot x_{CO_2} + k \cdot x_{H_2} \right) \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, що враховує вплив водню на надстисливість газовойоднової суміші.

Проблема у визначенні даного коефіцієнта k полягає в тому, що в процесі досліджень [6] виявилось, що за різних значень тиску P , температури T , та мольної концентрації вуглекислого газу x_{CO_2} , значення вказаного коефіцієнта за результатами регресійного аналізу суттєво відрізняється. Про це свідчать результати виконаних розрахунків [9]. Для отримання значень вказаного коефіцієнта за різних значень P , T , x_{CO_2} та x_{H_2} виконано наступні дії:

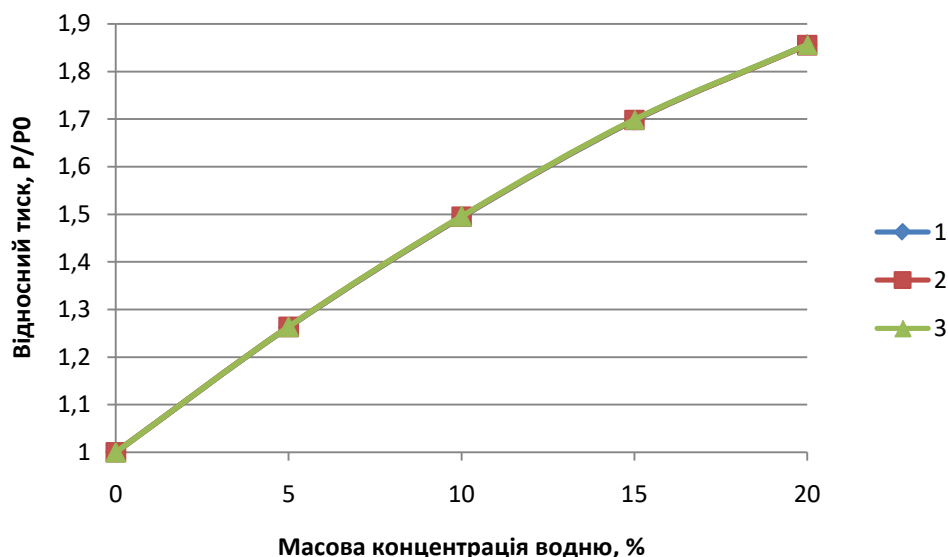
- Розкрито дужки, для отримання добутку тиску на відповідні складові рівняння;
- Підстановка значень відповідних тисків, температур, вмісту водню та вуглекислого газу;
- Визначено різницю між коефіцієнтами стиснення, розрахованими за AGA 8 та формулою (5);
- Виконано розрахунок коефіцієнтів регресійних рівнянь залежностей різниці значень коефіцієнтів стиснення за відповідних тисків від значень добутку тиску на вміст водню.

В результаті одержано кореляційну залежність для розрахунку коефіцієнта стисливості газовойоднової суміші, яку використано для оцінки її істинного об'єму при робочих умовах.

Практично важливою для оцінювання ефективності використання водневих домішок до природного газу є обернена задача, яка полягає у визначенні робочих умов (тиску і температури) при закачуванні і зберіганні заданого обсягу газу в трубопроводах відомого об'єму. З цією метою розраховано і побудовано залежності робочого тиску при ізотермічному зберіганні заданих обсягів газовойоднової суміші від масової концентрації водню в ній. При цьому маса газовойоднової суміші, яка підлягає зберіганню на протязі неопалювального періоду року визначена на основі аналізу сезонної нерівномірності газоспоживання, мінімальний робочий тиск в газопроводі складає 5 МПа. Газопроводі в процесі закачування газовойоднової суміші в заданому обсязі від масової концентрації водню в ній, які у вигляді графіків приведено на рис. 1.

Аналіз результатів показує, що збільшення концентрації водню в газовойодновій суміші призводить до зростання максимального тиску закачування в трубопровід в порівнянні з закачуванням чистого метану, і при концентрації водню в суміші 20% зростання складає 1,85, що сут-

тево вплине на енергозатрати на зберігання. Слід також відмітити, що середня температура довкілля практично не впливає на характер зростання тиску в залежності від масової концентрації водню в суміші.



1 – при середній температурі ґрунту 290K; 2 – при середній температурі ґрунту 300K; 3 – при середній температурі ґрунту 310K

Рис. 1. Характер зростання тиску при закачуванні газоводневої суміші в трубопровід в залежності від масової концентрації водню (P/P_0 відношення біжучого до початкового тиску)

Оцінка потужності газоперекачувальних агрегатів при закачуванні газоводневої суміші в трубопровід при різних масових концентраціях водню проводилась на основі залежностей для ізотермічного стиску. Загальна потужність в процесі закачування визначалася за формулою [3]

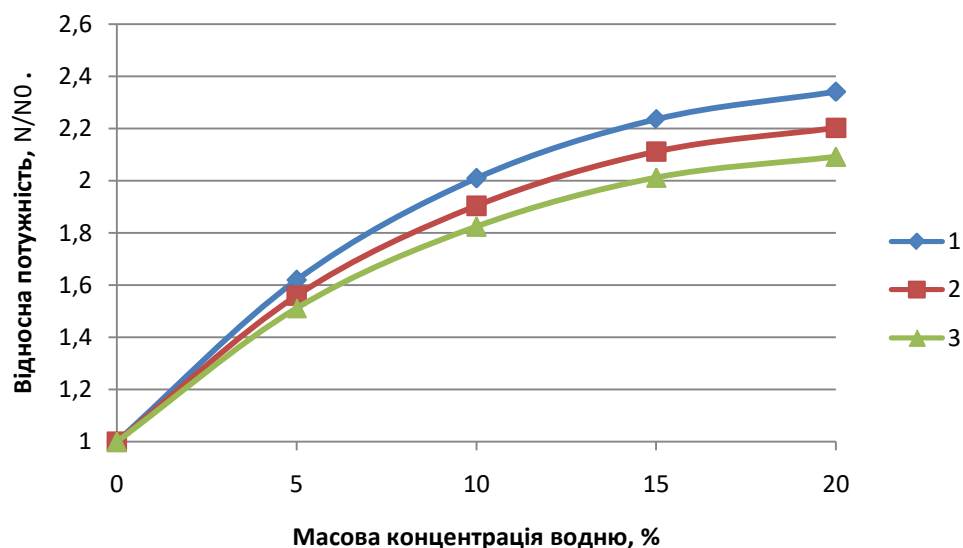
$$N_i = P_B Q_B \ln(P_H / P_B) / \eta, \quad (6)$$

де Q_B – продуктивність компресорних агрегатів в процесі закачування газоводневої суміші за умов входу в ГПА; P_H, P_B – тиски на виході і вході ГПА; η – ізотермічний ККД ГПА.

Для цього моменту часу побудовано залежності сумарної ізотермічної потужності на закачування газоводневої суміші в трубопровід від масової концентрації водню, які у вигляді графіків приведено на рис. 2.

Як показують результати дослідження, збільшення масової концентрації водню в газоводневій суміші призводить до зростання максимальної потужності при закачуванні енергоносія в трубопровід, і при максимальній концентрації водню в суміші 20% збільшення потужнос-

ті в порівнянні з чистим метаном складає від 2,09 до 2,34 в залежності від середньої температури зберігання, причому збільшення температури призводить до зменшення максимальної потужності



1 – при середній температурі ґрунту 290К; 2 – при середній температурі ґрунту 300К; 3 – при середній температурі ґрунту 310К)

Рис. 2. Характер зростання відносної ізотермічної потужності при закачуванні газоводневої суміші в трубопровід в залежності від масової концентрації водню (N/N_0 відношення біжучої до початкової потужності)

Очевидно, енерговитрати на закачування газоводневої суміші в трубопровід залежать від величини потужності газоперекачувальних агрегатів і терміну процесу закачування. Вважаючи процес компримування газоводневої суміші ізотермічним, а термін закачування рівним неопалювальному періоду року, енерговитрати на закачування можна визначити наступним чином

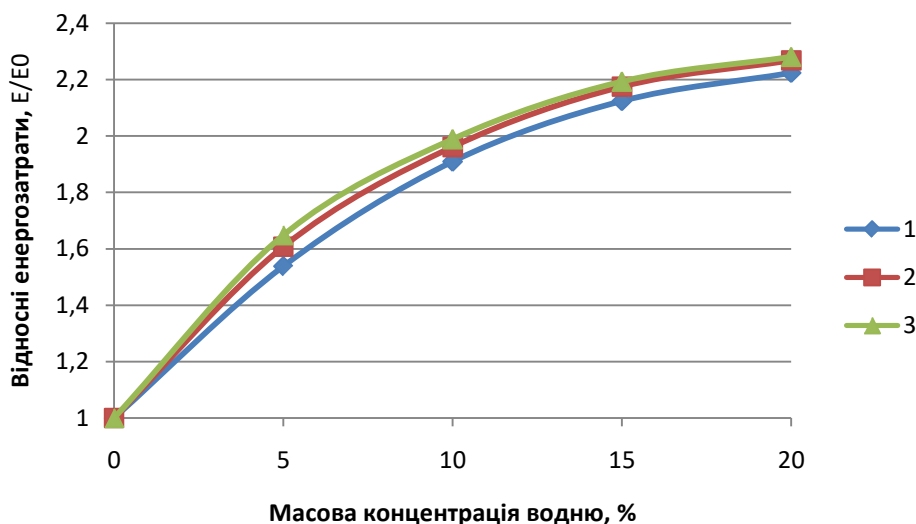
$$E = \int_0^{\tau} N_i dt = \tau \int_0^{\tau} P_B Q_B \ln(P_H / P_B) / \eta dt \quad (7)$$

де τ – тривалість неопалювальному періоду року.

Отримані результати у вигляді графіків приведено на рис. 3.

Розрахунки показують, що з зростанням масової концентрації водню в газоводневій суміші енерговитрати на закачування і зберігання енергоносія впродовж неопалювального сезону зростають, що не викликає сумнівів. Так, при середній температурі 290 К і масовій концентрації водню в газоводневій суміші 5 % енерговитрати на її закачування зростають в 1,54 рази в порівнюванні з закачуванням чистого метану, а

при збільшенні масової концентрації водню до 20 % спостерігається зростання енерговитрат в 2,22 рази. Збільшення середньої температури зберігання газоводневої суміші до 300K при масовій концентрації водню 20% призводить до зростання енерговитрат в 2,26 рази, а при збільшенні середньої температури зберігання до 310K зростання енерговитрат при масовій концентрації водню 20% зростає в 2,28 рази. Отже, середня температура зберігання газоводневої суміші не суттєво впливає на ступінь зростання енерговитрат на зберігання газоводневої суміші.



1 – при середній температурі ґрунту 290 К; 2 – при середній температурі ґрунту 300 К; 3 – при середній температурі ґрунту 310 К

Рис. 3. Характер зростання відносних енерговитрат на закачування газоводневої суміші в трубопровід в залежності від масової концентрації водню (E/E_0 відношення біжучої до початкової енергозатратності)

З фізичної точки зору зростання енерговитрат на закачування і зберігання газоводневої суміші при збільшенні масової концентрації водню в ній пояснюється збільшенням мольного об'єму суміші. Оскільки молекулярна маса водню у 8 разів менша за молекулярну масу метану, то в ідеальному випадку (без врахування надстисливості) на стиснення водню витрати енергії повинні зрости у 8 разів в порівнянні з стисненням метану до такої ж міри. Врахування над стисливості, температурного впливу та масової концентрації інгредієнтів в газоводневій суміші призводить до отриманого енергоефекту.

Висновки

Використання газоводневої суміші в якості енергоносія поряд з суттєвими перевагами в порівнянні з вуглеводневими енергоносіями має ряд суттєвих недоліків.

До переваг використання газоводневої суміші в якості енергоносія слід в першу чергу віднести суттєве збільшення питомої теплоти згоряння. Якщо питома теплота згоряння метану складає $50,03 \text{ МДж/м}^3$ ($33,43 \text{ МДж/кг}$), то питома теплота згоряння водню становить $10,05 \text{ МДж/м}^3$ ($119,96 \text{ МДж/кг}$), що суттєво зменшує (при сталих енергопотребках) обсяги подачі енергоносія споживачу.

Другою перевагою використання газоводневої суміші в якості енергоносія являється зниження шкідливого впливу продуктів згоряння на довкілля, адже використання газоводневої суміші суттєво знижує викиди вуглекислого газу в атмосферу.

Література

1. Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: матеріали ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20-21 травня 2021р.). – К.: Інтерсервіс, 2021. – 1104 с. 158.
2. СОУ 60.3-30019801-100:2012. – [Чинні від 2012-04-02]. – К.: ДК “Укртрансгаз”, 2012. – 44 с.
3. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.
4. Грудз В.Я. Енергетичний підхід до питання про гідравлічну ефективність газопроводів / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, М.М. Якимів // Восточно-европейский журнал передовых технологий, № 6/8(72) – 2014. №6/8(72). – С. 56-62.
5. Середюк М.Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газоводневих сумішей. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука», 2021. № 1 (101). Т.1. С. 52-62.
6. Середюк М. Д. Особливості газодинамічних процесів у газових мереж середнього і високого тиску за транспортування газоводневих сумішей. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука», 2021. № 2 (102). С.87-95.
7. Середюк М.Д., Великий С.В. Вплив концентрації водню на властивості газоводневих сумішей та газодинамічні процеси в розподільних газових мережах. Нафтогазова енергетика №2(40) 2023 – С. 25-37.
8. Станіслав Казда, Леонід Уніговський. Наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами. Нафтогазова галузь України. Київ, 2020. № 5 (47). С. 9-14.
9. Chudyk, I., Sudakova, D., Dreus, A., Pavlychenko, A., & Sudakov, A. (2023). Determination of the thermal state of a block gravel filter during its transportation along the borehole. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 75-82.

Стаття надійшла до редакційної колегії 30.10.2025 р.

Прийнято до друку 24.11.2025 р.

PROSPECTS AND PROBLEMS OF USING HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER

V. Ya. Hrudz , Ya. S. Kapushchak 

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska Street;
tel. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: volodymyr.hrudz@nung.edu.ua

It is shown that the process of using hydrogen additives to natural gas has a number of significant advantages, including an increase in the specific heat of combustion, which significantly reduces (with constant energy demand) the volume of energy supply to the consumer, and a reduction in the harmful effects of combustion products on the environment, since the use of a hydrogen-gas mixture significantly reduces carbon dioxide emissions into the atmosphere.

The disadvantages of using hydrogen as an additive to natural gas as an energy carrier include, first of all, the problematic issues of industrial volumes of hydrogen production, associated with energy costs for technological processes; in addition, the presence of hydrogen in pipelines will lead to the process of decarbonization of steel, which will cause a decrease in its mechanical characteristics and ultimately an increase in the accident rate of pipeline transport of the energy carrier; storage of a gas-hydrogen mixture during the non-heating season in the cavity of gas transport mains requires a significant increase in energy costs.

The use of hydrogen as an energy carrier on an industrial scale requires significant technical and technological changes in the state's energy system as a whole, which poses a number of important problems for the energy supply system that require an urgent solution; for their implementation, a method for optimizing the use of a gas-hydrogen mixture as an energy carrier according to the criterion of minimum energy costs for pipeline transport is proposed.

Keywords: optimization, energy carrier, hydrogen, gas-hydrogen mixture, energy efficiency, energy consumption, optimization.