УДК 669.2

асп. **Юрій Битюцький**
yu.bytiuckyi@nubip.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9627-2797
к.т.н. **Юрій Франчук,**
franchuk196405@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7910-8705
Національний університет біоресурсів і природокористування

https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.124-134

ВОДНЕВО-МЕТАНОВІ СУМІШІ В СИСТЕМАХ ГАЗОПОСТАЧАННЯ: АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. *У статті досліджується проблематика використання воднево-метанових сумішей у наявних системах газопостачання як перспективного шляху до декарбонізування енергетики. Проаналізовано вплив додавання водню на фізико-хімічні властивості газу, зокрема на зниження його об'ємної теплоти згоряння, густини та числа Воббе. Розглянуто ключові проблеми транспортування сумішей: підвищену проникність водню, ризик водневої крихкості сталевих труб, погіршення довговічності зварних з'єднань та зростання ймовірності витікання. Встановлено, що додавання водню до 5 % дозволяє дотриматися чинних в Україні вимог щодо теплоти згоряння. При вмісті водню в суміші до 20 % густина суміші буде нижчою за допустиме значення, але конструкцію пальників або режим їхньої роботи потрібно змінювати при вмісті водню 20 % і вище. При підвищенні вмісту водню виникає необхідність заміни або скорочення ущільнювачів роз'ємних з'єднань та адаптування обладнання. Запропоновано технологічну схему оптимального використання водню під час реконструювання та будівництва газових мереж. Зроблено висновок щодо необхідності комплексного підходу до впровадження водневих технологій, що вимагає вдосконалення нормативно-правової бази та обов'язкового переходу на облік спожитого газу в одиницях енергії.*

Ключові слова: *природний газ, біометан, водень, вуглекислий газ, метан, біогаз, фізико-хімічні властивості, система газопостачання, надійність газопостачання.*

Ставлення проблеми. Сучасний розвиток енергетики характеризується переходом до низьковуглецевих технологій, що зумовлює активне впровадження альтернативних енергоносіїв. Водень розглядається як перспективний енергоносій, здатний забезпечити декарбонізування енергетичних систем. Одним із найбільш реалістичних шляхів його залучення є використання воднево-метанових сумішей у системах газопостачання.

Водночас впровадження водню в наявну газову інфраструктуру супроводжується низкою технічних і експлуатаційних проблем. Відмінності

 CC BY 4.0

фізико-хімічних властивостей водню та природного газу призводять до зміни характеристик транспортування, зберігання та спалювання газових сумішей. Зокрема, підвищена дифузійна здатність водню, його вплив на матеріали трубопроводів, а також зміна енергетичних параметрів газу створюють додаткові ризики для надійності та безпеки систем газопостачання.

Таким чином, постає науково-прикладна проблема визначення допустимих умов використання воднево-метанових сумішей у наявних газорозподільних системах із забезпеченням їх безпечної та ефективної експлуатації.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю зниження викидів парникових газів та підвищення енергетичної ефективності наявних систем газопостачання. Використання воднево-метанових сумішей дозволяє частково замістити викопне паливо без суттєвого модернізування інфраструктури, що відповідає сучасним напрямкам розвитку енергетики.

Разом із тим, зміна складу газу впливає на його фізико-хімічні та експлуатаційні характеристики, що потребує комплексного наукового аналізу. Наявні нормативні обмеження щодо вмісту водню часто є консервативними та не повністю враховують результати сучасних досліджень, що стримує впровадження водневих технологій.

Для України актуальність дослідження визначається значною протяжністю газорозподільних мереж та їхнім потенціалом для залучення до європейської водневої інфраструктури. У цих умовах наукове обґрунтування допустимих параметрів газоводневих сумішей є важливим завданням для забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку**.**

Останні дослідження та публікації. Питання використання водню в енергетичних системах активно досліджуються в сучасній науковій літературі. Значна увага приділяється технологіям виробництва водню, його зберіганню та транспортуванню, а також використанню в сумішах із природним газом.

Ведуться активні дослідження щодо зберігання, транспортування та спалювання сумішей водню та природного газу. Застосування водню як палива у складі таких сумішей є одним з найбільш ефективних рішень для зниження викидів парникових газів та підтримання декарбонізування атмосфери, а також зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни [1].

Ефект зниження викидів CO_2 обумовлений частковою заміною вуглеводневого палива воднем: підвищення частки водню в суміші з природним газом на кожні 10 % дозволяє приблизно на таку ж величину зменшити коефіцієнт викидів CO_2 в атмосферу. Відповідно до заяв Ради Європейського Союзу, до 2050 року відновлювані гази, головним чином водень та біометан, можуть становити до 70 % загального споживання газу в ЄС.

Значні природні ресурси України створюють передумови для її

 CC BY 4.0

становлення як один із ключових постачальників водню на європейський ринок [2]. Україна визнана пріоритетним партнером для європейських країн завдяки своєму потенціалу щодо виробництва «зеленого» водню та наявності газотранспортної інфраструктури, поєднаної із системою Європейського Союзу [3-5]. Уряд України розробляє стратегічні плани створення водневої екосистеми, що охоплює повний цикл – від виробництва водню з відновлюваних джерел до його зберігання та транспортування. У зв'язку з цим дослідження та розробки щодо використання водню як палива стають особливо актуальними, що вимагає сучасних інженерних рішень з урахуванням технологічних і виробничих факторів [6, 7].

Використання біометану та водню у двигунах внутрішнього згоряння є перспективним напрямом розвитку транспортної енергетики; технічні обмеження їхнього впровадження детально проаналізовано у [8].

Транспортування водню трубопроводами є актуальним технічним завданням. Молекули водню мають високу проникність через малі розміри, що зумовлює необхідність впровадження додаткових інженерних рішень при зберіганні та транспортуванні водню в наявних газотранспортних системах. Важливою проблемою є воднева крихкість сталі: проникнення водню в метал може знижувати його пластичність, стійкість до руйнування та втомні характеристики, а також негативно впливати на експлуатаційну надійність зварних з’єднань трубопроводів [9].

Молекула водню втричі менша молекули метану, що збільшує проникність та ризик витікання крізь дрібніші отвори. Для переходу на низько-концентровані суміші (10-20 %) потрібна заміна ущільнювачів усіх роз'ємних з'єднань або їхнє суттєве скорочення. Експлуатаційні характеристики газопроводів, зокрема вплив тривалої експлуатації на їхні механічні властивості та герметичність, докладно розглянуті в роботах [10 - 12].

Знос сталевих трубопроводів та вплив водню на їхні властивості, зокрема корозію та воднево-механічне руйнування, ускладнюють транспортування. Конденсація вологи на внутрішніх поверхнях труб прискорює деградацію металу, що знижує ударну в'язкість і тріщиностійкість та підвищує концентрацію залишкового водню. Транспортування водню або газоводневих сумішей посилює ці ефекти та підвищує ризик руйнування.

Найменш вивченим залишається процес горіння сумішей водню та природного газу. У роботі [13] зазначено, що домішування водню змінює властивості паливного газу. Негативний вплив водню може пом'якшуватися шляхом збільшення коефіцієнта надлишку повітря, проте традиційні технології управління горінням можуть бути недостатньо адаптовані до присутності водню в паливі. Досліджуються можливості застосування сумішей природного газу та

 CC BY 4.0

водню як альтернативне паливо для промислових печей [14].

Дослідження показують, що додавання водню до природного газу дозволяє знизити викиди CO_2 пропорційно його частці в суміші. Водночас встановлено, що підвищення вмісту водню призводить до зниження теплоти згоряння, густини та числа Воббе, що впливає на роботу газового обладнання.

Аналіз наукових джерел свідчить щодо відсутності єдиного підходу до визначення допустимого вмісту водню. Запропоновані значення варіюються в широкому діапазоні, що обумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є обґрунтування допустимих концентрацій водню в сумішах із природним газом для транспортування та використання в системах газопостачання з урахуванням вимог безпеки, енергоефективності та надійності. Проаналізовано фізико-хімічні властивості газоводневих сумішей та оцінено їхній вплив на елементи газової інфраструктури з визначенням умов безпечного експлуатування. Практична цінність полягає у можливості використання результатів для впровадження водневих технологій у системи газопостачання.

Основна частина. Використання водню в газових мережах України має великі перспективи, але виникають ускладнення технічного характеру, які потребують вирішення. Під час вивчення практичної можливості використання сумішей газу основним є питання щодо можливої та допустимої частини водню в них.

Довгий час у нормативно-технічній базі України [15, 16] не передбачалася наявність водню в системі газопостачання. Вирішення цього питання вимагає знаходження балансу між прагненням збільшити частку водню як замінника природного газу та забезпечити безпеку та ефективність використання газової суміші. Важливий вплив має й економічна складова, що передбачає витрати, необхідні для переведення споживачів газу з традиційного природного газу на суміш його та водню.

Роботи, присвячені використанню водню в сумішах природного газу, містять суттєві розбіжності та суперечливі дані щодо допустимого вмісту водню. Технічний регламент природного газу [17] є єдиним документом в нормативно-технічній базі з питань газопостачання, де нормалізується значення молярної частки водню як одна з вимог якості та безпеки природного газу, що подається в систему газопостачання. У переліку показників якості газу молярна частка водню становить до 5 %. Але у Водневій стратегії України [18] передбачається вміст водню в газових сумішах близько 20 %.

У дослідженні [19] автори стверджують реальність і високу ефективність заміни природного газу водневими сумішами з умістом водню 50 % і вище в

 CC BY 4.0

побутових газових приладах. Проте критерії, прийняті для обґрунтування доцільності такого вибору, не відповідають нормованим критеріям взаємозамінності, в основу яких покладено забезпечення стійкої теплової потужності газових приладів, режимів їхньої роботи та принципів захисту від шкідливих явищ проскоку, відриву полум'я і неповноти згоряння палива [20].

У дослідженні [21] визначено, що найменші обмеження щодо вмісту водню в суміші з природним газом накладає число Воббе. При вмісті водню до 19 мольних відсотків немає необхідності вносити зміни в конструкцію пальників або суттєво коригувати їх режим роботи. Додавання водню до природного газу призводить до прямо пропорційного зниження теплоти згоряння суміші. Тому вкластися у встановлені законодавством України вимоги можливо при вмісті водню не більше 7 мольних відсотків. При вмісті водню в 13 мольних відсотків відносна густина суміші природного газу і водню стане нижче допустимих значень.

Відповідно до Технічного регламенту природного газу відносна густина повинна бути не менше 0,555. При вмісті водню в суміші до 13 % густина суміші та число Воббе знаходяться в межах нормативних вимог. За вмісту водню в суміші до 20 % густина суміші буде нижчою за допустиме значення (0,555), але конструкцію пальників або режим їхньої роботи потрібно змінювати при вмісті водню 20 % і вище.

Аналіз основних фізико-хімічних характеристик сумішей природного газу і водню підтверджує можливість спалювання таких сумішей при дотриманні критеріїв взаємозамінності газів. Такі критерії мають показники забезпечення стійкої теплової потужності газових установок, відсутність продуктів хімічного недопалу та утворення сажі, відсутність явищ проскоку та відриву полум'я.

Додавання водню до природного газу суттєво змінює його основні параметри. Насамперед спостерігається зниження об’ємної теплоти згоряння, що обумовлено низькою густиною водню. Це призводить до необхідності збільшення об’ємної витрати газу для забезпечення тієї ж теплової потужності.

Зміна густини газової суміші впливає на гідравлічні характеристики потоків у трубопроводах. Зменшення густини супроводжується збільшенням швидкості руху газу, що може впливати на режими роботи газорегуляторного обладнання.

Отже, основними проблемами транспортування є: підвищена проникність водню через матеріали; ризик водневої крихкості сталевих трубопроводів; зростання ймовірності витікання крізь ущільнення; вплив на довговічність зварних з’єднань.

Особливу увагу необхідно приділяти стану наявних газопроводів, значна частина яких має тривалий строк експлуатації. Це може посилювати негативний

 CC BY 4.0

вплив водню на їх механічні характеристики.

Зміна складу газу впливає на процеси горіння. Водень має вищу швидкість полум'я та нижчу енергію запалювання, що може призводити до нестабільності горіння. Разом із тим, експериментальні дослідження показують, що більшість сучасних газових приладів здатні працювати на сумішах із вмістом водню до 20 % без суттєвих змін конструкції. При вищих концентраціях необхідна адаптація пальників і систем подавання повітря.

Незважаючи на те, що питання розвитку виробництва водню та використання газотранспортної мережі України для його внутрішнього споживання та експорту до ЄС є актуальним, нормативно-правова база у цій сфері потребує значного доопрацювання.

На підставі результатів аналізу фізико-хімічних параметрів газових сумішей при різних концентраціях водню розроблено технологічну схему роботи газотранспортної системи, яку рекомендується використовувати для реконструкції та будівництва газових мереж (рис. 1).

Під час проведення реконструкції систем газопостачання слід визначити, чи зможе наявна пропускна спроможність системи забезпечити постачання потрібного об'єму газу за необхідного тиску. При будівництві нових газопроводів для транспортування газової суміші з умістом водню вище 5 % необхідно використовувати трубопроводи більшого діаметра, ніж при транспортуванні газу традиційного складу. При цьому необхідно врахувати фактичну теплоту згоряння метано-водневої суміші.

Постачання споживачеві газової суміші з воднем вимагає перегляду цінової політики за одиницю обсягу газу, оскільки для подавання однієї й тієї ж кількості енергії споживачеві газової суміші потрібно більше, ніж традиційного газу. Питання обліку газу та проплати за його споживання можна врегулювати шляхом запровадження обліку спожитого палива в одиницях енергії.

Висновки. Використання воднево-метанових сумішей є перспективним напрямом розвитку систем газопостачання, що дозволяє забезпечити поступовий перехід до низьковуглецевої енергетики. Встановлено, що додавання водню змінює фізико-хімічні та експлуатаційні характеристики газу, що впливає на умови його транспортування та використання. При низьких і середніх концентраціях водню можливе використання наявної інфраструктури без суттєвих змін, однак підвищення його вмісту потребує врахування факторів безпеки, впливу на матеріали та адаптації обладнання. Визначення допустимих концентрацій водню є ключовим завданням, яке потребує комплексного підходу з урахуванням технічних, енергетичних і нормативних аспектів.

 CC BY 4.0

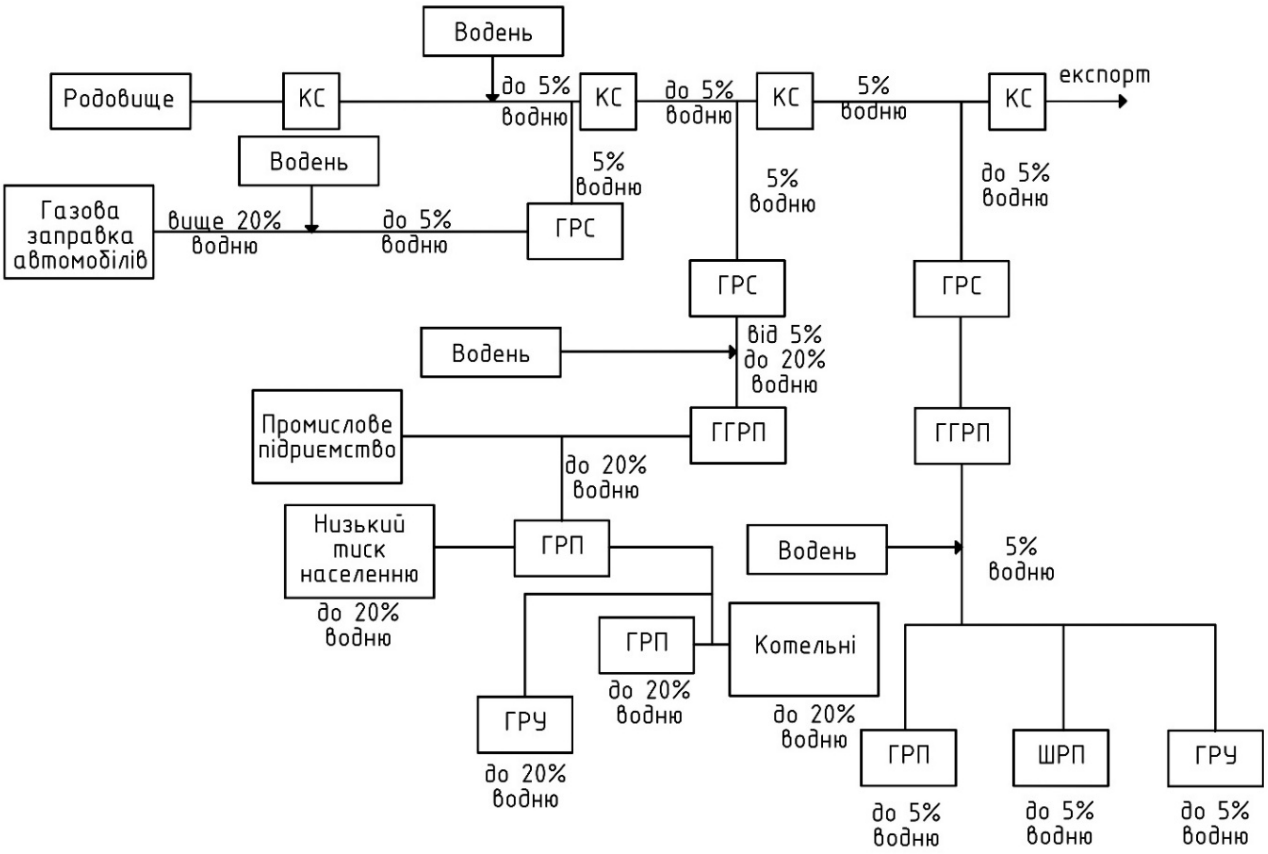

Рис. 1. Технологічна схема оптимального використання водню у газових мережах: КС – компресорна станція; ГРС – газорозподільча станція; ГГРП – головний газорегуляторний пункт; ШРП – шафовий газорегуляторний пункт; ГРУ – газорегуляторна установка

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне визначення граничних концентрацій водню для різних типів газового обладнання та матеріалів трубопроводів, а також на розробляння методів підвищення стійкості газотранспортних систем до впливу водню. Перспективним є також удосконалення нормативно-технічної бази з урахуванням сучасних наукових результатів та європейського досвіду залучення водневих технологій.

References

1. Momirlan M, Veziroglu T. "The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet". *Int J Hydrogen Energy*, vol. 30, 2005, pp. 795-802. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.011
2. Ukraina – enerhetychnyi khab Yevropy. Uriad skhvalyv Enerhetychnu stratehiiu do 2050 roku [Ukraine – Europe's energy hub. The government has approved the Energy Strategy until 2050.] (In Ukrainian). Available at: https://greentransform.org.ua/ukrayina-shvalyla-energetychnu-strategiyu-do-2050-roku/?print-posts=pdf

 CC BY 4.0

3. Potentsial vyrobnytstva vodnyu v Ukraini [Hydrogen production potential in Ukraine]. (In Ukrainian). Available at: https://uspp.ua/news/novyny-hromadskykh-partneriv/2018/potentsial-vyrobnytstva-zelenoho-vodniu-v-ukraini-stanovyt-505-mln-ton-kubometriv-shcho-potribno-dlia-rozvytku-tsoho-napriamu
4. Novi pravyla dlia rynku ta infrastruktury vodniu v YeS [New rules for the hydrogen market and infrastructure in the EU] (In Ukrainian). Available at: https://dixigroup.org/comment/novi-pravyla-dlya-rynku-ta-infrastruktury-vodnyu-v-yes
5. Zapukhlyak V., Melnychenko Yu., Okipnyi I., Poberezhny L., Grudz Ya., Drin N., Chernetskyy M. "Reliability assurance of gas-hydrogen mixture transportation by gas pipeline system". *Procedia Structural Integrity*, Vol. 36, 2022, pp. 378-385. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.049
6. Pohosov O., Chepurna N. "Perspektyvy ta problematyka vykorystannia vodniu, yak systemy akumuliatsii pozabalansnoi heneratsii elektrychnoi enerhii, dlia naftohazovoho ta enerhetychnoho sektoriv Ukrainy" [Prospects and issues of using hydrogen as a system for accumulating off-balance electricity generation for the oil, gas and energy sectors of Ukraine] *Scientific Collection «InterConf»* № 187, 2024, pp. 314–321. (In Ukrainian). Available at: https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/5355/5389
7. Franchuk Y., Konovaliuk V., Kyrychenko M., Liubarets O. "Justification of measures to improve the stability of gas distribution networks". In 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Jelgava, 2024, pp. 271-279. Available at: https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF053
8. Franchuk Yu., Konovaliuk V. "Use of biomethane and hydrogen in internal combustion engines." *Ventilation, Illumination and Heat-Gas Supply*, iss. 48, 2024, pp. 32-39. (In Ukrainian). Available at: https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.32-39
9. Wang H., Tong Z., Zhou G. et al. "Research and demonstration on hydrogen compatibility of pipelines: a review of current status and challenges", *International journal of hydrogen energy*, vol. 47, 2022, pp. 28585-28604. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.158
10. J. Zhang, Z. Li, X. Zheng Ta P. Liu, "Long-term planning and coupling optimization of multi-regional natural gas and hydrogen supply systems: A case study of China". *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 183, 2024, p. 108593. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108593.
11. Drawer C., Lange J. and Kaltschmitt M. "Metal hydrides for hydrogen storage

 CC BY 4.0

- Identification and evaluation of stationary and transportation applications." *Journal of Energy Storage*, no. 77, 2024, p. 109988.

12. Franchuk Yu., Konovaliuk V. "Analysis of the influence of combustion heat on the determination of gas pipeline diameters." *Ventilation, illumination and heat and gas supply*, iss. 47, 2023, pp. 18-27. (In Ukrainian). Available at: https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.47.18-27.
13. Leicher J., Schaffert J., Cigarida H. "The impact of hydrogen admixture into natural gas on residential and commercial gas appliances." *Energies*, vol. 15, 2022, p. 777. https://doi.org/10.3390/en15030777
14. Mayrhofer M., Koller M., Seemann P. et al. "Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces". *International journal of hydrogen energy*, vol. 46, Iss.41, 2021, pp. 21672-21686 https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.228.
15. GOST 5542-87 Hazy horiuchi pryrodni dlia promyslovoho ta komunalno-pobutovoho pryznachennia. Tekhnichni umovy. [GOST 5542-87 Natural combustible gases for industrial and municipal use. Technical conditions.] (In Ukrainian). Not valid since 01.01.2022
16. Kodeks hazotransportnoi systemy [Gas transmission system codex] Available at: https://tsoua.com/wp-content/uploads/2024/05/Pereklad_Kodeksu_GTS-as-of-01.05.2024.pdf (In Ukrainian).
17. Tekhnichnyi rehlament pryrodnoho hazu [Technical regulations for natural gas] Electronic resource: Available at: https://mev.gov.ua/rehulyatornyy-akt/proyekt-postanovy-kabinetu-ministriv-ukrayiny-pro-zatverdzhennya-tekhnichnoho (In Ukrainian).
18. Vodneva stratehiia Ukrainy na period do 2050 roku [Ukraine's hydrogen strategy for the period up to 2050] Available at: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (In Ukrainian).
19. Soroka B.S., Pianykh K.Ye., Zghurskyi V.O., Horupa V.V., Kudriavtsev V.S. "Enerhetychni ta ekolohichni kharakterystyky pobutovykh hazovykh pryladiv pry vykorystanni metano-vodnevoi sumishi yak palyvnoho hazu". [Energy and environmental characteristics of household gas appliances when using a methane-hydrogen mixture as fuel gas.] *Oil and Gas Industry of Ukraine*, No. 6, 2020; pp. 3-13. (In Ukrainian).
20. Kolienko A.H. Vykorystannia sumishi pryrodnoho hazu i vodniu v yakosti palyva v komunalno-pobutovykh i promyslovykh palyvospaliuvalnykh teploheneruiuchykh ustanovkakh [Use of a mixture of natural gas and hydrogen as fuel in municipal and industrial fuel-burning heat-generating installations] (In Ukrainian). Available at:

 CC BY 4.0

https://www.mdi.org.ua/images/2021/kolienko-stattia.pdf.
21. Franchuk Y., Kosilov V., Kovalchuk Y. "Determing the physical-chemical parametere of fuel mixtures of gas with hydrogen in gas networks." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6 (132) 2024, p. 49-58. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318930

UDC 621.593:662.767:621.644

Post-Grad. **Yurii Bytiutskyi**
yu.bytiuckyi@nubip.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9627-2797
PhD, **Yurii Franchuk,**
franchuk196405@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7910-8705
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.124-134

HYDROGEN–METHANE BLENDS IN GAS SUPPLY SYSTEMS: ANALYSIS OF TRANSPORT AND OPERATIONAL CHALLENGES

Abstract. *The modern development of the energy sector is characterised by the transition to low-carbon technologies, which leads to the active introduction of alternative energy sources. Hydrogen is considered a promising energy source capable of ensuring the decarbonisation of energy systems. One of the most realistic ways of its integration is the use of hydrogen-methane mixtures in gas supply systems. The article investigates the issues associated with the use of hydrogen–methane blends in existing gas supply systems as a promising pathway for energy sector decarbonisation. The impact of hydrogen addition on the physicochemical properties of natural gas is analysed, in particular the reduction in volumetric calorific value, density, and Wobbe index. Key transport-related challenges are examined, including the increased permeability of hydrogen, the risk of hydrogen embrittlement in steel pipelines, reduced durability of welded joints, and a higher probability of leakage. It is established that hydrogen blending up to 5 % enables compliance with the current Ukrainian requirements for calorific value. At hydrogen concentrations of up to 20 %, the gas mixture density remains below the allowable threshold; however, burner design or operating modes must be modified when hydrogen content reaches or exceeds 20%. With further increases in hydrogen concentration, it becomes necessary to replace or reduce sealing elements in detachable joints and to adapt equipment accordingly. A technological scheme for optimal hydrogen utilisation during the reconstruction and construction of gas networks is proposed. The study concludes that a comprehensive approach to the implementation of hydrogen technologies is required, involving the improvement of the regulatory framework and a mandatory transition to energy-based units for gas consumption accounting.*

 CC BY 4.0

Keywords: *natural gas, biomethane, hydrogen, carbon dioxide, methane, biogas, physicochemical properties, gas supply system, gas supply reliability.*

Received/Надійшла до редакції 08.12.2025
Accepted/Прийнято 26.12.2025
Issued/Опубліковано 29.05.2026
🔓 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:
Creative Commons Attribution 4.0 International License