

УДК 536.46:662.61
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).6](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).6)

ESTIMATION OF THE MAIN COMBUSTION AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF METHANE-HYDROGEN MIXTURES COMBUSTION

ОЦІНКА ОСНОВНИХ ВОГНЕТЕХНІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПАЛЮВАННЯ МЕТАНО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

Ruslan S. Riabtsun¹
dneppp@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4284-9937

Mykyta V. Vorobiov^{1,2}
vorobiov.nikv@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9621-7658

Р. С. Рябцун¹,
аспірант
М. В. Воробйов^{1,2},
канд. техн. наук, доцент

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

²Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

²Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв

Abstract. The using of hydrogen to replacement natural gas, in addition to the obvious benefits of decarburizing the atmosphere (reducing CO₂ emissions), leads to changes in the fire and emission characteristics of fuel-oxidizing mixtures, in particular, an increase in the absolute consumption of fuel gas due to the lower heating value of hydrogen, an increase in the formation of nitrogen oxides NO_x due to the higher combustion temperature of hydrogen, etc.

The purpose of the study was to determine the fire and environmental properties of gas fuels composed of methane and hydrogen mixtures, namely burning velocity, changes in the adiabatic combustion temperature of mixtures with an increase in the proportion of hydrogen in the fuel, and to assess the formation of nitrogen oxides and CO₂ emissions.

Research method – numerical analysis of fire engineering and ecological characteristics of the combustion of methane-hydrogen mixtures.

Object of study – processes of combustion of methane-hydrogen mixtures.

Subject of research – changes in the combustion rate, formation of carbon dioxide CO₂ and nitrogen oxides NO_x at different ratios of methane/hydrogen gas mixture; temperature characteristics of combustion of methane-hydrogen mixtures.

Based on the analysis of the results of theoretical calculations, it was found that at a relatively moderate proportion of methane substitution with hydrogen, for example, for a mixture of [CH₄] / [H₂] = 50 / 50, % vol. the burning velocity will be $S_f \sim 50$ cm/s, which is only $\sim 25\%$ higher than for natural gas. Higher values of CH₄ substitution by H₂ are economically questionable due to the low calorific value of the latter.

Thermodynamic estimates of the formation of harmful substances showed that for nitrogen oxide NO, when replacing methane [CH₄] = 100%, vol. with a methane-hydrogen mixture [CH₄] / [H₂] = 50 / 50%, vol. the increase in NO formation is from 2245 mg/m³ to 2440 mg/m³, i.e. by 8.6%, and when burning pure hydrogen [H₂] = 100%, the NO formation will be 2995 mg/m³, i.e. an increase of 33.4% compared to pure methane. The calculations of CO₂ emissions have shown that when using a mixed gas [CH₄] / [H₂] = 50 / 50%, the total reduction in CO₂ emissions will be only 23.34% – from 0.055 kg/MJ to 0.042 kg/MJ.

Key words: methane-hydrogen mixtures; burning velocity; greenhouse gases; nitrogen oxides.

Анотація. Використання водню при заміщенні природного газу крім очевидних переваг з декарбонізації атмосфери (зменшення викидів CO₂) призводить до зміни вогнетехнічних та емісійних характеристик паливо-окислювальних сумішей, зокрема збільшення абсолютної витрати паливного газу через меншу теплоту згоряння водню, збільшення утворення оксидів азоту NO_x через більшу температуру горіння водню та ін.

Мета дослідження полягала у визначенні вогнетехнічних та екологічних властивостей газових палив, складених із сумішей метану та водню, а саме швидкостей горіння, зміни адіабатичної температури горіння сумішей при збільшенні долі водню у паливі, оцінці утворення оксидів азоту, та викидів CO₂.

Метод дослідження – чисельний аналіз вогнетехнічних та екологічних характеристик процесів спалювання метано-водневих сумішей.

Об'єкт дослідження – процеси спалювання метано-водневих сумішей.

Предмет дослідження – зміна швидкості горіння, утворення вуглекислоти CO_2 та оксидів азоту NO_x різному співвідношенні метан/водень газової суміші; температурні характеристики спалювання метано-водневих сумішей.

На основі аналізу результатів теоретичних розрахунків встановлено показав, що при відносно-помірній долі заміщення метану воднем, наприклад для суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 60 / 40\%$, об., швидкість горіння буде складати $S_f \sim 50$ см/с, що лише на $\sim 25\%$ більше ніж для природного газу. Більші значення заміщення CH_4 на H_2 економічно є сумнівними через низьку теплотворну здатність останнього.

Термодинамічні оцінки утворення шкідливих речовин показали, що для оксиду азоту NO , при заміщенні метану $[\text{CH}_4] = 100\%$, об. на метано-водневу суміш $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$, об. збільшення утворення NO складає з 2245 мг/м³ до 2440 мг/м³, тобто на $8,6\%$, а при спалюванні чистого водню $[\text{H}_2] = 100\%$, об утворення NO складе 2995 мг/м³, тобто збільшиться на $33,4\%$ у порівнянні з чистим метаном. Розрахунками утворення викидів CO_2 встановлено, що при використанні сумішевого газу $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$, об. скорочення викидів CO_2 складатиме лише $23,34\%$ – з $0,055$ кг/МДж до $0,042$ кг/МДж.

Ключові слова: метано-водневі суміші; швидкість горіння; парникові гази; оксиди азоту.

ВСТУП

Використання водню як додаткового компонента до органічного палива, зокрема природного газу, є одним зі шляхів декарбонізації енергетики. Основна мета полягає в зниженні викидів CO_2 при спалюванні палива шляхом часткової заміни вуглецевих компонентів на водень, який при згорянні утворює лише воду.

Однією з головних перешкод для широкого використання водню є його висока вартість виробництва. Вартість виробництва «чистого» водню, станом на 2024 рік, складає, в залежності від метода, від $\text{€}1,7/\text{кг}$ до $\text{€}10,2/\text{кг}$ [1]. Проте в майбутньому, при зниженні вартості електроенергії, виробництво «зеленого» водню може стати більш вигідним.

До основних методів виробництва метано-водневих сумішей можна віднести:

1. Змішування природного газу з воднем, отриманим електролізом води. Цей метод дозволяє отримати «зелений» водень із використанням відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Основний недолік цього підходу – висока вартість виробництва водню шляхом електролізу, що робить його економічно невигідним на сьогодні через високу ціну електроенергії [2].

2. Адіабатична конверсія метану. Цей метод дозволяє отримати метано-водневу суміш без залучення зовнішніх джерел енергії [3]. Сировиною виступає природний газ, а джерелом енергії є продукти його згорання. Хоча цей процес не виробляє «зеленого» водню, він може бути ефективнішим для певних промислових застосувань.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На сучасному етапі розвитку енергетики все більшого розповсюдження отримують водневі технології, так зокрема, водень вже достатньо широко використовують як автомобільне паливо [4], ведуться роботи по його використанню в енергетиці та комунально-побутовому секторі при заміщенні природного газу шляхом домішування водню в газові мережі [5, 6].

Відомо, що для водню, як палива, характерна більш низька теплотворна здатність ($Q_{\text{нр}} = 10,79$ МДж/м³) та густина ($\rho = 0,09$ кг/м³) порівняно з природним газом ($Q_{\text{нр}} = 35,88$ МДж/м³, $\rho = 0,72$ кг/м³), то при заміщенні останнього воднем знижується теплота згорання сумішевого палива (віднесена до 1 м³ суміші) порівняно з природним газом. Для умови підтримки введеної в топку кількості теплоти збільшується витрата палива і змінюються режими роботи пальників.

Таким чином при заміщенні природного газу на відповідні його суміші з воднем потрібно враховувати не тільки зміну теплотехнічних характеристик суміші, а і зміну вогнетехнічних характеристик згорання палива, утворення шкідливих речовин, зміни процесів теплообміну внаслідок зміни складу продуктів згорання і т.д.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні відомо чимало експериментальних робіт щодо спалювання метано-водневих сумішей. Так, наприклад, у роботі [7], яка присвячена використанню метано-водневих сумішей у побутових газових приладах (плитах, обігрівальних котлах), зазначено, що додавання водню до природного газу сприяє зниженню викидів оксидів азоту (NO_x), хоча автори не пояснюють причин цього явища. Водночас, у дослідженні А. Huber [8] проведено дослідження спільного спалювання метано-водневих сумішей у промислових пальниках Marathon. Результати цього дослідження суперечать висновкам статті [7], демонструючи, що викиди NO_x зростають, а викиди CO зменшуються.

Крім того, у власних експериментальних дослідженнях авторів [9] було встановлено, що під час спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику емісія оксидів азоту (NO_x) збільшується приблизно в $1,5 \dots 2$ рази при спалюванні чистого водню, але при цьому спостерігається значне зниження утворення CO (приблизно в 20 разів).

Оскільки вказані публікації [7–9] мають експериментальний характер досліджень, то важливим і доцільним для оптимізації і раціоналізації подальших робіт з визначення можливостей використання метано-водневих сумішей є проведення попереднього теоретичного аналізу процесів заміщення метану – воднем.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Для відокремлення невіршених раніше частин загальної проблеми необхідно відзначити, що представлені вище результати досліджень [7–9] мають експериментальний характер, крім того відомі результати стосуються переважно питань зміни вогнетехнічних характеристик складу суміші, та не враховують зміну вогнетехнічних характеристик процесу горіння та утворення шкідливих речовин.

В якості міри горючих та реакційних (детонаційних) властивостей паливо-окислювальних сумішей розглядають одну з основних вогнетехнічних характеристик горючих газів – швидкість ламінарного горіння.

В якості якісного критерію утворення шкідливих речовин можна вважати рівноважні концентрації оксидів азоту NO_x , які утворюються при максимальній (адиабатичній температурі горіння).

Визначенню вказаних основних вогнетехнічних та екологічних характеристик процесів спалювання метано-водневих сумішей власне і присвячена дана робота. Для повного розгляду вказаної проблеми авторами передбачено також розглянути зміну вогнетехнічних (теплоти згоряння, теоретичні температури горіння) характеристик метано-водневих палив та екологічні характеристики: утворення оксидів азоту (NO , NO_x) і вуглекислоти CO_2 .

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягала у визначенні вогнетехнічних та екологічних властивостей газових палив, складених із сумішей метану та водню, а саме швидкостей горіння, зміни адиабатичної температури горіння сумішей при збільшенні долі водню у паливі, оцінці утворення оксидів азоту, та викидів CO_2 .

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод дослідження – чисельний аналіз вогнетехнічних та екологічних характеристик процесів спалювання метано-водневих сумішей.

Об'єкт дослідження – процеси спалювання метано-водневих сумішей.

Предмет дослідження – зміна швидкості горіння, утворення вуглекислоти CO_2 та оксидів азоту NO_x різному співвідношенні метан/водень газової суміші; температурні характеристики спалювання метано-водневих сумішей.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В якості міри горючих та реакційних властивостей паливо-окислювальних сумішей використовують фундаментальну характеристику горючих газів – швидкість ламінарного горіння, яка ще поширена під назвою «швидкість нормального розповсюдження полум'я».

В роботі авторів Pio G., Salzano E. [10] запропоновано для визначення нормальної швидкості поширення полум'я при горінні сумішей газів з повітрям використовувати принцип адитивності:

$$S_L = C_1 s_1 + C_2 s_2 + C_3 s_3 + \dots = \sum_{i=1}^n C_i s_i \quad (1)$$

де s_i – швидкість горіння i компонента паливної суміші, C_i – концентрація i горючого компонента паливної суміші, об. (мол.) доля.

Використовуючи відомі літературні дані з щодо швидкості горіння окремих газових палив [11, 12] та рівняння (1) проведено розрахунки швидкості горіння метано-водневих сумішей від коефіцієнту надлишку повітря α (рис. 1, а) та отримано залежність швидкості нормального розповсюдження полум'я сумішей від вмісту водню (рис. 1, б).

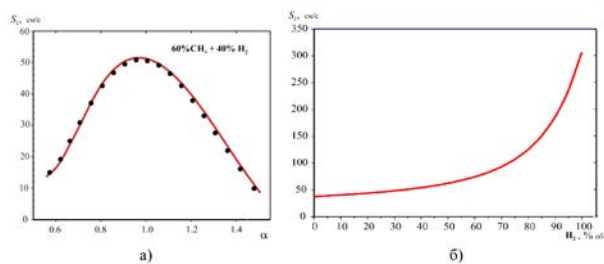


Рис. 1. Залежність ламінарної швидкості горіння S_L , см/с, метано-водневих сумішей з атмосферним повітрям.
 α – залежність від коефіцієнту надлишку повітря α при горінні суміші 60% CH_4 + 40% H_2 , % об., при змінному коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,0$

Як показує аналіз, хоча максимальна ламінарна швидкість горіння водневого полум'я і може перевищувати швидкість горіння метану в 20 разів (рис. 1, б), але при відносно-помірній долі заміщення метану воднем, наприклад для суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 60 / 40$, % об., швидкість горіння буде складати $S_L \sim 50$ см/с (рис. 1, а), що лише на $\sim 25\%$ більше ніж для природного газу. Різке збільшення швидкості горіння спостерігається на рівні $[\text{H}_2] = 70 \dots 80\%$, об., але через низьку теплоту згоряння водню використання такої суміші промислово виникає сумніви.

Вогнетехнічна група характеристик палива включає енергетичні показники: теплоти згоряння палив. На рис. 2 представлені теплоти згоряння Q_h , Q_l на одиницю маси (1 кг) та об'єму (1 м^3) для нормальних умов (0°C). Числові значення Q_h , Q_l (рис. 2), додатково наведені в табл. 1.

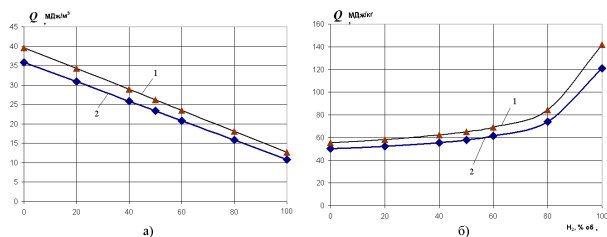


Рис. 2. Залежність теплоти згорання, вищої Q_h (1) та нижчої Q_i (2), метано-водневої суміші з сухим повітрям від вмісту $[H_2]$, % об., в газовому паливі: а – масової, МДж/кг; б – об'ємної, МДж/нм³

Таблиця 1. Енергетичні характеристики стехіометричних метано-водневих сумішей у залежності від частки водню в газовому паливі, % об. Для нормальних умов (температура $T_0 = 273$ К, тиск $p_0 = 0,101325$ МПа)

H_2 , % об.	CH_4 , % об.	Q_p , МДж/кг	Q_{hp} , МДж/кг	Q_p , МДж/м³	Q_{hp} , МДж/м³
0	100	50,23	55,51	35,88	39,65
20	80	52,37	58,12	30,86	34,25
40	60	55,66	62,15	25,84	28,85
50	50	58,08	65,10	23,34	26,16
60	40	61,38	69,13	20,83	23,46
80	20	73,77	84,27	15,81	18,06
100	0	120,85	141,79	10,79	12,66

Розрахунки теоретичних температур горіння (рис. 3) метано-водневих сумішей та утворення рівноважних оксидів азоту NO та NO_x (рис. 4) виконували у програмі для розрахунку хімічних рівноваг TERRA (автор Б. Г. Трусів), яка реалізована на основі відповідних обчислювальних механізмів [13].

Як показує розрахунковий аналіз – додавання водню незначно збільшує теоретичну температуру горіння суміші, при повному заміщенні метану на водень збільшення теоретичної температури горіння складає ~ 155 °С (див. рис. 3), і як наслідок – відбувається збільшення утворення оксидів азоту (рис. 4).

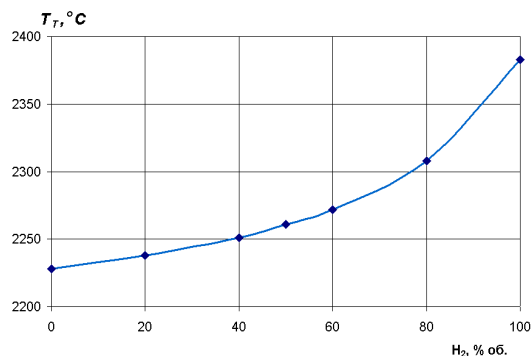


Рис. 3. Залежність теоретичної температури горіння ТТ від долі H_2 для стехіометричної ($\alpha=1,0$) метано-водневої суміші з повітрям

Відомо, що при горінні палива основним оксидом азоту, який утворюється безпосередньо у полум'ї є NO (оксид азоту), який потім до доокислюється а атмосфері до діоксиду азоту NO_2 . Власне діоксид азоту NO_2 під час самої реакції горіння майже не утворюється, але він є набагато токсичнішим за NO. Як показує термодинамічний розрахунок, для стехіометричної паливо-окислювальної суміші при заміщенні метану $[CH_4] = 100\%$, об. на метано-водневу суміш $[CH_4] / [H_2] = 50 / 50\%$, об. збільшення утворення NO складає з 2245 мг/м³ до 2440 мг/м³, тобто на 8,6%, а при спалюванні чистого водню $[H_2] = 100\%$, об утворення NO складе 2995 мг/м³, тобто збільшиться на 33,4% у порівнянні з чистим метаном. Стосовно утворення NO_2 безпосередньо під час горіння палива, то термодинамічним розрахунком показано, що діоксид азоту майже не утворюється – збільшення складає з 0,63 мг/м³ для метану до 0,75 мг/м³ для чистого водню.

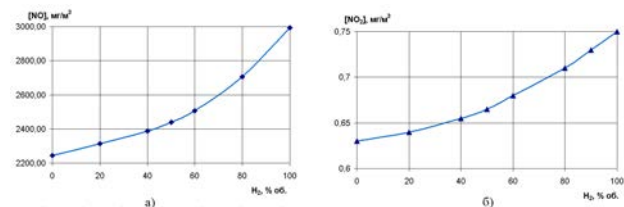


Рис. 4. Залежність утворення NO (а) та NO_2 (б) від долі H_2 в продуктах згорання стехіометричної ($\alpha=1,0$) метано-водневої суміші з повітрям

При аналізі згорання різних палив, зокрема метано-водневих, доцільно порівняти обсяги утворення CO_2 на одиницю енергії, яка виділяється при згорянні палива.

Викиди CO_2 доцільно порівнювати в кілограмах утворення парникового газу, що віднесено до теплоти згорання палива. Для випадку спалювання метано-водневих сумішей зазначені питомі викиди ψ_{CO_2} складають відповідно:

$$\psi_{CO_2} = m_{CO_2} / Q_{mix} = \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2} / Q_{mix} \quad (2)$$

де, $\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}$ – відповідно нормальна густина двоокису вуглиці (1,96 нм³/кг) та об'єм CO_2 , що утворився при спалюванні метано-водневого палива; Q_{mix} – теплота згорання 1 нм³ метано-водневого палива.

На рис. 5 показано рівень зменшення питомих викидів CO_2 – ψ_{CO_2} / МДж при спалюванні метано-водневих сумішей.

Так, використання сумішевого газу $CH_4] / [H_2] = 50 / 50\%$, об. забезпечує скорочення викидів CO_2 лише на 23,34% – з 0,055 кг/МДж до 0,042 кг/МДж – відповідно до наших розрахунків.

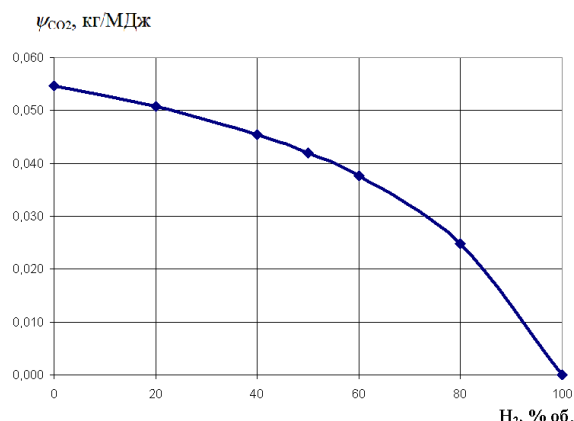


Рис. 5. Залежність питомих викидів у ψ_{CO_2} CO₂/МДж при спалюванні метано-водневих сумішей

ВИСНОВКИ

В рамках розгляду перспективного напрямку використання палив – заміщення природного газу воднем, який спрямований на запобігання кліматичним змінам та декарбонізацію довкілля, розглянуто дві групи характеристик метано-водневих палив: вогнетехнічні та екологічні. До першої групи віднесено швидкість ламінарного горіння. Серед енергетичних характеристик виділяються теплоти згоряння (вища Q_h та

нижча Q_b , масова і об'ємна), а також теоретична (адіабатна) температура горіння (T_f).

В якості екологічних характеристик розглядалось утворення оксидів азоту NO та NO₂, а також викиди CO₂ віднесені до теплоти згоряння паливної суміші.

Проведений в роботі аналіз показав, що при відносно-помірній долі заміщення метану воднем, наприклад для суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 60 / 40\%$ об., швидкість горіння буде складати $S_f \sim 50$ см/с, що лише на $\sim 25\%$ більше ніж для природного газу. Більші значення заміщення CH₄ на H₂ економічно є сумнівними через низьку теплотворну здатність останнього.

Термодинамічні оцінки утворення шкідливих речовин показали, що для оксиду азоту NO, при заміщенні метану $[\text{CH}_4] = 100\%$, об. на метано-водневу суміш $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$, об. збільшення утворення NO складає з 2245 мг/м³ до 2440 мг/м³, тобто на 8,6%, а при спалюванні чистого водню $[\text{H}_2] = 100\%$, об утворення NO складе 2995 мг/м³, тобто збільшиться на 33,4% у порівнянні з чистим метаном. Розрахунками утворення викидів CO₂ встановлено, що при використанні сумішевого газу $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$, об. скорочення викидів CO₂ складатиме лише 23,34% – з 0,055 кг/МДж до 0,042 кг/МДж.

Таким чином, при використанні водню як палива доцільно оцінювати можливий екологічний ефект, який зокрема пов'язаний з різким збільшенням емісії NO при досить помірному зменшенні утворення CO₂.

REFERENCES

- [1] Muron, M., Pawelec, G., Fraile, D. (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways: Report 2024*. Hydrogen Europe. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024_H2E_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf
- [2] El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, Vol. 20, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>.
- [3] Wang, B., Albarracín-Suazo, S., Pagán-Torres, Y., Nikolla, E. (2017) Advances in methane conversion processes. *Catalysis Today*, Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.01.023>
- [4] Hassan, Q., Azzawi, I.D.J., Sameen, A.Z., Salman, H.M. (2023). Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, 15 (15), 11501. <https://doi.org/10.3390/su151511501>
- [5] Zhang, B., Xu N., Zhang, H., Qiu, R., Wei, X., Wang, Z., Liang, Y. (2024). Influence of hydrogen blending on the operation of natural gas pipeline network considering the compressor power optimization. *Applied Energy*, Vol. 358, 122594. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122594>.
- [6] Deymi-Dashtebayaz, M., Ebrahimi-Moghadam, A., Pishbin, S.I., Pourramezan, M. (2019). Investigating the effect of hydrogen injection on natural gas thermo-physical properties with various compositions. *Energy*, 167, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.186>
- [7] Soroka, B.S., Pyanykh, K.E., Zgurskiy, V.O. (2022). Mixed fuel for household gas-powered appliances as an option to replace natural gas with hydrogen. *Science and Innovation*, no. 3, pp. 10–22. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.010>
- [8] Huber, A. (2020). Impact of hydrogen and mixtures of hydrogen and natural gas on forced draught burners for gaseous fuels. Walter Dreizler GmbH, A 1434 EN, 11 p. URL: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>.
- [9] Riabtsun, R.S., Vorobyov, M.V. (2024). Doslidzhennia enerhotekhnologichnykh kharakterystyk spaliuvannia metano-vodnevyykh sumishei u promyslovomu hazovomu palnyku [Investigation of energy and technological characteristics of combustion of methane-hydrogen mixtures in an industrial gas burner]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, № 3 (496), P. 59–63. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).8)
- [10] Pio, G., Salzano, E. (2018). Laminar Burning Velocity of Multi-Component Gaseous Mixtures. *Chemical engineering transactions*, vol. 67. P. 1 – 6. <https://doi.org/10.3303/CET1867001>
- [11] Gu, X.J., Haq, M.Z., Lawes, M., Woolley, R. (2000). Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures. *Combustion and Flame*, Vol. 121, Issues 1–2. P. 41–58. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00142-X)
- [12] Ilbas, M., Crayford, A. P., Yilmaz, I., Bowen, P. J., Syred, N. (2006). Laminar-burning velocities of hydrogen–air and hydrogen–methane–air mixtures: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, Issue 12. P. 1768–1779. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.007>

- [13] Allan, M.M. Leal, William, R. Smith. (2022). Inverse chemical equilibrium problems: General formulation and algorithm. *Chemical Engineering Science*, Volume 252, 117162, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117162>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Muron, M., Pawelec, G., Fraile, D. (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways: Report 2024*. Hydrogen Europe. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024_H2E_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf
- [2] El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*. Vol. 20. 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>.
- [3] Wang B., Albarracín-Suazo S., Pagán-Torres Y., Nikolla E. (2017) Advances in methane conversion processes. *Catalysis Today*, Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.01.023>
- [4] Hassan, Q.; Azzawi, I.D.J.; Sameen, A.Z.; Salman, H.M. (2023). Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges. *Sustainability*, 15 (15), 11501. <https://doi.org/10.3390/su151511501>
- [5] Zhang, B., Xu N., Zhang, H., Qiu, R., Wei, X., Wang, Z., Liang, Y. (2024). Influence of hydrogen blending on the operation of natural gas pipeline network considering the compressor power optimization. *Applied Energy*, Vol. 358, 122594. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122594>.
- [6] Deymi-Dashtebayaz, M.; Ebrahimi-Moghadam, A.; Pishbin, S.I.; Pourramezan, M. (2019). Investigating the effect of hydrogen injection on natural gas thermo-physical properties with various compositions. *Energy*, 167, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.186>
- [7] Soroka, B.S., Pyanykh, K.E., Zgurskiy, V.O. (2022). Mixed fuel for household gas-powered appliances as an option to replace natural gas with hydrogen. *Science and Innovation*, no. 3, pp. 10–22. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.010>
- [8] Huber, A. (2020). Impact of hydrogen and mixtures of hydrogen and natural gas on forced draught burners for gaseous fuels. Walter Dreizler GmbH, A 1434 EN, 11 p. URL: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>.
- [9] Рябцун, Р.С., Воробйов, М.В. (2024). Дослідження енерготехнологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику / *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова* № 3 (496), С. 59–63. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).8)
- [10] Pio G., Salzano E. (2018). Laminar Burning Velocity of Multi-Component Gaseous Mixtures. *Chemical engineering transactions*, vol. 67. P. 1–6. <https://doi.org/10.3303/CET1867001>
- [11] Gu, X.J., Haq, M.Z., Lawes, M., Woolley, R. (2000). Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures. *Combustion and Flame*, Vol. 121, Issues 1–2. P. 41–58. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00142-X)
- [12] Ilbas, M., Crayford, A. P., Yilmaz, I., Bowen, P. J., Syred, N. (2006). Laminar-burning velocities of hydrogen–air and hydrogen–methane–air mixtures: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, Issue 12. P. 1768–1779. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.007>
- [13] Allan M.M. Leal, William R. Smith. (2022). Inverse chemical equilibrium problems: General formulation and algorithm. *Chemical Engineering Science*, Volume 252, 117162, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117162>.

© Рябцун Р. С., Воробйов М. В.

Дата надходження статті до редакції: 08.11.2024

Дата затвердження статті до друку: 16.11.2024