

УДК 536.46:662.61
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).8)

INVESTIGATION OF ENERGY AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COMBUSTION OF METHANE-HYDROGEN MIXTURES IN AN INDUSTRIAL GAS BURNER

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПАЛЮВАННЯ МЕТАНО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ У ПРОМИСЛОВОМУ ГАЗОВОМУ ПАЛЬНИКУ

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, доц.

¹*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv*

²*Thermal energy technology institute of NAS of Ukraine, Kyiv*

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

²*Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, м. Київ*

Abstract. The urgency of reducing greenhouse gas emissions has led to the use of innovative hydrogen technologies in the energy sector, in particular the replacement of natural gas with hydrogen. The use of hydrogen in a mixture with natural gas improves environmental performance and reduces CO₂ emissions. In this work, experimental studies were conducted on the combustion of methane-hydrogen mixtures using an industrial SUEMAX burner with a capacity of up to 30 kW. The proportion of hydrogen replacement of natural gas was [H₂] = 30 % by volume and 50 % by volume, respectively. The purpose of the study was to determine the energy and environmental characteristics of combustion of methane-hydrogen mixtures in an industrial gas burner with the determination of NO_x, CO emissions and flame temperature characteristics in comparison with the case of combustion of pure natural gas (methane).

Research method – direct experimental measurements of energy and environmental characteristics of the flame under conditions of combustion of a methane-hydrogen mixture in an industrial gas burner.

Object of study – processes of combustion of methane-hydrogen mixture in an industrial gas burner.

The subject of the study is the formation of nitrogen oxides NO_x and CO at different ratios of methane/hydrogen gas mixture; temperature characteristics of combustion of methane-hydrogen mixtures;

Based on the analysis of the experimental results, it is determined that the combustion of methane-hydrogen mixture reduces CO emissions and increases the temperature of exhaust gases and NO_x emissions.

It was found that the emission of nitrogen oxides NO_x increases by ~1.5...2.0 times and amounts to [NO_x] = 89 – 50 ppm for the combustion of pure hydrogen. At the same time, a significant decrease in the formation of CO is noted, ~20 times when burning a mixture of [CH₄] / [H₂] = 50 / 50, % vol., the level of CO formation is [CO] = 1 – 2 ppm.

Key words: combustion processes; methane-hydrogen mixtures; energy ecology; harmful emissions; industrial burners.

Анотація. Актуальність задачі зменшення викидів парникових газів призвела до використання інноваційних водневих технологій в енергетиці, зокрема заміщення природного газу воднем. Використовуючи водень у суміші з природним газом вдається покращити екологічні показники та зменшити утворення CO₂. В роботі проведені експериментальні дослідження спалювання метано-водневих сумішей на промисловому пальнику SUEMAX потужністю до 30 кВт. Доля заміщення воднем природного газу складала відповідно [H₂] = 30 % об. та 50 % об. Також в пальнику було спалено чистий водень ([H₂] = 100 % об.).

Мета дослідження полягала у визначенні енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії NO_x, CO та температурних характеристик факелу з порівнянням з випадком спалювання чистого природного газу (метану).

Метод дослідження – прямі експериментальні вимірювання енергоекологічних характеристик факела в умовах спалювання метано-водневої суміші в промисловому газовому пальнику.

Об'єкт дослідження – процеси спалювання метано-водневої суміші в промисловому газовому пальнику.

Предмет дослідження – утворення оксидів азоту NO_x і CO при різному співвідношенні метан/водень газової суміші; температурні характеристики спалювання метано-водневих сумішей;

На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди CO та збільшуються температури викидних газів і емісія NO_x .

Встановлено, що емісія оксидів азоту NO_x зростає в $\sim 1,5 \dots 2,0$ рази та складає $[\text{NO}_x] = 89 - 50 \text{ ppm}$ для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO , ~ 20 разів при спалюванні суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$, % об., рівень утворення CO складає $[\text{CO}] = 1 - 2 \text{ ppm}$.

Ключові слова: процеси горіння; метано-водневі суміші; енергоекологія; шкідливі викиди; промислові пальники.

ВСТУП

На сьогоднішній день актуальною є проблема декарбонізації атмосфери, зниження викидів парникових газів в промисловості, енергетиці, транспорті та ін., що зумовлює необхідність істотного удосконалення процесів перетворення енергії і підвищення техніко-економічних характеристик систем енергопостачання на їх основі. Вирішити цю проблему здатні інноваційні водневі технології, які повинні зіграти важливу роль в диверсифікації потоків енергоносіїв, що має істотно зменшити споживання вуглеводневих палив і дозволить поліпшити стан навколишнього середовища.

Дослідження та розробки, що пов'язані з використанням водню у якості палива на сьогоднішній день є надзвичайно актуальними. На сьогодні поширеною є ідея спалювання водню в суміші з природним газом для забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів вуглекислого газу з продуктами згорання вуглеводневого палива, представлена наприклад в [1]. Проте, необхідно з'ясувати енерготехнологічні особливості заміщення природного газу воднем щодо технічних особливостей роботи процесів та агрегатів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Однією з поширених тенденцій в останні роки є збільшення частки альтернативних видів палива, зокрема відновлюваних джерел енергії, у порівнянні з мінеральними (органічними) паливами. Формування ринків енергетичних ресурсів та вибір відповідних видів палива, як правило, викопного, а також постачання палива на інші ринки, є результатом політичних, економічних та екологічних ініціатив урядів та громадських організацій у різних країнах та регіонах світу. Сучасний європейський ринок палива систематично перетворюється під впливом тенденції декарбонізації навколишнього середовища.

Великий акцент робиться на розширенні виробництва "зеленого" водню, який отримується за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як сонце, вітер, низьковуглецеве паливо та окремі біопалива. Ця тенденція, в поєднанні з метою мінімізації використання органічного палива (викопного), має на меті збереження мінеральних палив для майбутніх поколінь.

На сьогоднішній день завдання заміни природного газу альтернативними видами палива реалізується за допомогою метано-водневих сумішей з інжектуванням водню в місцеві газопроводи [2].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У зв'язку з декарбонізацією навколишнього середовища застосовуються сталі теплові технології, спрямовані на раціональне використання сировини, палива та енергії, а також на мінімізацію викидів CO_2 за рахунок використання відновлюваних джерел енергії та переходу до електромобілів для зменшення шкідливих викидів [3]. Багато інженерних розробок для сталого розвитку паливної енергетики стосуються теплового обладнання в різних галузях промисловості. Формування ринків енергії та палива має свою специфіку, оскільки пріоритети змінюються відповідно до економічних, енергетичних, екологічних та кліматичних факторів.

Діяльність світових організацій та ЄС спрямована на декарбонізацію та запобігання глобальному потеплінню. Прикладами такої діяльності є резолюція про захист клімату була прийнята на саміті ООН у вересні 2015 року в Нью-Йорку [4]. Директива Європейського Союзу RED (Директива про відновлювані джерела енергії) 2009/28/ЄС встановила мінімальні кількісні показники для використання відновлюваних джерел енергії до 2020 року, зокрема, 10% на транспорті та 20% для загального споживання енергії.

Зміни в екологічній ситуації призвели до диверсифікації ринку газового палива в Європі. Особлива увага приділяється новим показникам, таким як вміст водню, оскільки його використання має важливий вплив на характеристики палива, особливо в контексті проблем "зеленої енергії" та "зеленого водню" [1 – 4]. Крім того, домішки водню розширюють діапазон характеристик горіння та теплотехнічних характеристик основного газового палива, що відіграє важливу роль в енергетичній та екологічній сфері.

У Німеччині, Федеральне міністерство економіки та енергетики (BMWi), наприклад, розробило плани на майбутнє (до 2030-2050 років), спрямовані на використання водню як палива для промисловості,

транспорту та енергопостачання. Згідно з цими планами, національний та імпортований водень, зокрема з України, мав забезпечити німецьку економіку енергією без викидів CO₂. Водень визначався як ключовий енергетичний компонент у майбутньому, і до 2050 року планувалося виключення викопного палива (вугілля, нафта, природний газ) зі списку використовуваного палива в Європі.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Під час аналізу літературних джерел, встановлено, що не дивлячись на достатньо великий об'єм інформації щодо загальних перспектив використання водню як палива, майже відсутня інформація стосовно заміщення природного газу воднем відповідно до енерготехнологічних характеристик роботи процесів та агрегатів. Крім того, мають місце деякі протиріччя.

Відомими є роботи [5, 6] присвячені питанням використання метано-водневих сумішей в побутових газових приладах (плитах, обігрівальних котлах), в якій вказано, що при додаванні водню до природного газу викиди оксидів азоту NO_x зменшуються, причому причини такого явища згадані автори не пояснюють. Хоча відомо, що зі збільшенням температури горіння при додаванні водню емісія NO_x має зростати [7]. Крім того, також відомою є робота автора А. Huber [1], в якій вперше в світі представлені дослідження спільного спалювання метано-водневих сумішей в промислових пальниках Marathon, де показані протилежні роботам [5, 6] результати, тобто викиди оксидів азоту NO_x збільшуються, а CO зменшуються.

В такій ситуації постало питання власного з'ясування відповідної наукової істини щодо процесів спалювання метано-водневих сумішей у газових пальниках і утворення відповідних шкідливих речовин.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягала у визначенні енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії NO_x, CO та температурних характеристик факелу з порівнянням з випадком спалювання чистого природного газу (метану).

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод дослідження – прямі експериментальні вимірювання енергоекологічних характеристик факела в умовах спалювання метано-водневої суміші в промисловому газовому пальнику.

Об'єкт дослідження – процеси спалювання метано-водневої суміші в промисловому газовому пальнику.

Предмет дослідження – утворення оксидів азоту NO_x і CO при різному співвідношенні метан/водень

газової суміші; температурні характеристики спалювання метано-водневих сумішей;

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В роботі проведено експериментальне дослідження спалювання метано-водневої суміші на експериментальній установці з пальником SUEMAX (рис. 1) тепловою потужністю 30 кВт.

Виходячи з завдання дослідження було розроблено та налагоджено лабораторний стенд (рис. 2) зі всією необхідною апаратурою. Під час експерименту фіксувались параметри температури повітря в ході у вимірювальну ділянку, витрата палива, температура продуктів згорання по довжині факелу, концентрація оксидів вуглецю та азоту в продуктах згорання палива. Концентрації шкідливих викидів вимірювались за допомогою газоаналізатора «ОКСИ-5М».



Рис. 1. Газовий пальник SUEMAX

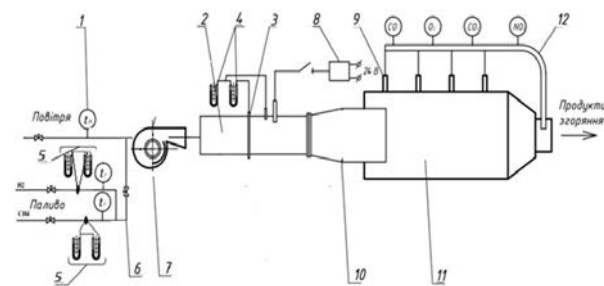


Рис. 2. Схема лабораторного вогневого стенду:

1 – термометр для вимірювання температури повітря; 2 – початкова ділянка; 3 – інтегральна трубка Піто; 4, 5 – блок манометрів; 6 – подача палива до основного колектора; 7 – пальник; 8 – свіча запалювання; 9 – штуцери для вимірювання температури газів по довжині факелу; 10 – дифузор; 11 – футерована вогнева ділянка; 12 – інтегральний пробовідбірник

Дослідження проводили для чотирьох паливних сумішей: чистого природного газу ([CH₄] = 100 % об.), чистого водню ([H₂] = 100, % об.), суміші природного газу з воднем в співвідношенні [CH₄] / [H₂] = 70 / 30, % об., та суміші природного газу з воднем в співвідношенні [CH₄] / [H₂] = 50 / 50, % об.; Для процесу горіння визначали емісію NO_x та утворення CO. При проведенні дослідів підтримували постійну теплову потужність пальника на рівні 10 кВт.

Представлені зображення факела свідчать про радикальні зміни в його структурі внаслідок додавання водню до реакційної суміші. Це пояснюється зростанням інтенсивності горіння при наявності водню у природному газі, що впливає на гідродинаміку потоку реагентів. Очевидні "трансформації" факела особливо помітні при збільшенні концентрації водню.

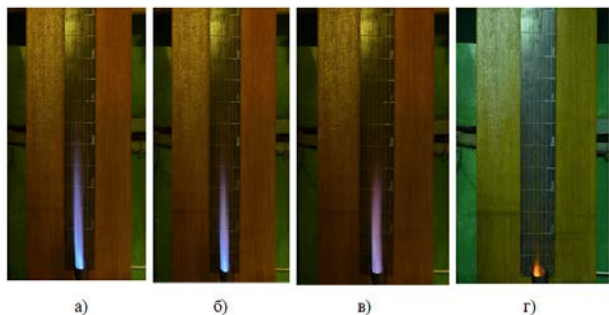


Рис. 3. Фото факелу при спалюванні: а) природного газу, $[\text{CH}_4] = 100\%$ об.; б) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30, \%$ об.; в) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \%$ об.; г) при спалюванні чистого водню $[\text{H}_2] = 100, \%$ об.

Спостерігається зміна характеристик світимості факелу від «блакитного» кольору до «жовтого» при заміщенні метану на водень, це пояснюється зміною складу продуктів згоряння та відсутністю CO_2 у продуктах згоряння, як одного з випромінюючо-поглинаючих газів продуктів згоряння.

Під час проведення досліджень були визначенні енергоекологічні характеристики спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії NO_x , CO (рис. 4 та рис. 5.) та температурні характеристики факелу (рис. 6).

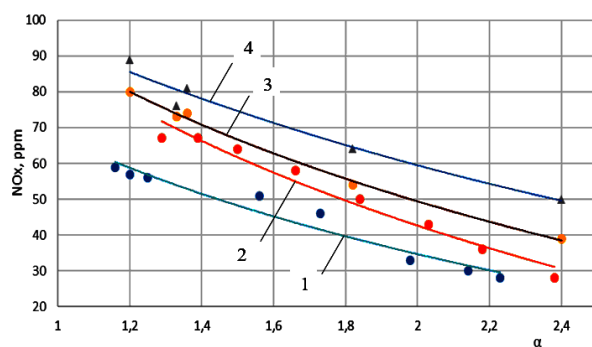


Рис. 4. Залежність емісії NO_x від коефіцієнту надлишку повітря α : 1) природного газу, $[\text{CH}_4] = 100\%$ об.; 2) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30, \%$ об.; 3) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \%$ об.; 4) при спалюванні чистого водню $[\text{H}_2] = 100, \%$ об.

Аналіз експериментальних даних на рис. 4 та рис. 5 свідчить, що у випадку збільшення вмісту водню в суміші з природним газом емісія NO_x

збільшується, що пояснюється більшою температурою горіння водню в порівнянні з метаном (природним газом), а викиди CO в свою чергу зменшуються, що відповідає відомим процесам утворення шкідливих речовин, коли зі зростанням емісії NO_x спостерігається зниження утворення CO . Також, експериментально показано, що температура на виході з камери спалювання збільшується при збільшенні вмісту водню в суміші порівняно з чистим природним газом (рис. 6). Встановлено, що емісія оксидів азоту NO_x зростає в $\sim 1,5 \dots 2,0$ рази та складає $[\text{NO}_x] = 89 - 50 \text{ ppm}$ для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO , ~ 20 разів при спалюванні суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \%$ об., рівень утворення CO складає $[\text{CO}] = 1 - 2 \text{ ppm}$. Зрозуміло, що при спалюванні чистого водню $[\text{H}_2] = 100, \%$ об., CO не утворюється.

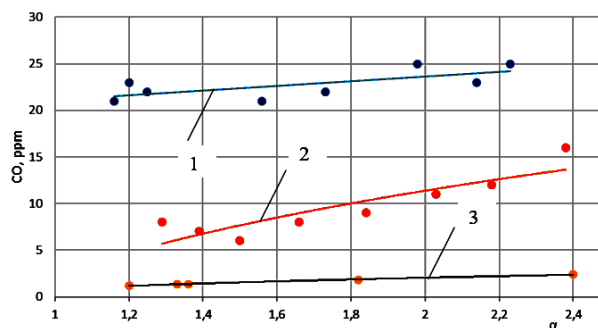


Рис. 5. Залежності утворення CO від коефіцієнту надлишку повітря α : 1) природного газу, $[\text{CH}_4] = 100\%$ об.; 2) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30, \%$ об.; 3) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \%$ об.

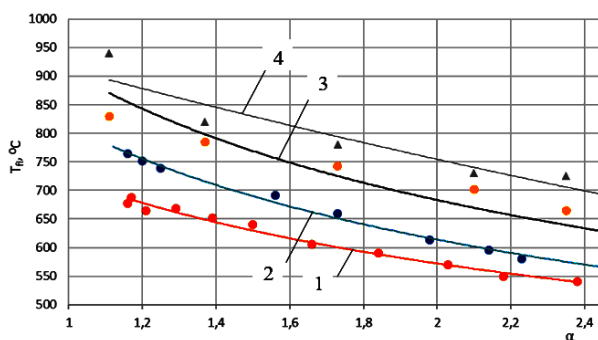


Рис. 6. Залежність температури на виході з камери згоряння T_f від коефіцієнту надлишку повітря α : 1) природного газу $[\text{CH}_4] = 100\%$ об.; 2) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30, \%$ об.; 3) суміші природного газу і водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \%$ об.; 4) при спалюванні чистого водню $[\text{H}_2] = 100, \%$ об.

Аналіз даних щодо залежності температури продуктів згоряння від долі водню в суміші з природним газом показують, що температура факелу збільшується при збільшенні долі водню, температура на виході з камери згоряння зросла від 670°C

при спалюванні метану ($[\text{CH}_4] = 100\%$ об.) до 945°C при спалюванні чистого водню ($[\text{H}_2] = 100\%$ об.), що і пояснює відповідне збільшення емісії оксидів азоту NO_x .

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження в лабораторних умовах підтвердили можливість забезпечення процесу нормального спалювання сумішевого газу із вмістом водню $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$ об.; з використанням існуючих промислових пальників.

На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої

суміші зменшуються викиди CO та збільшуються температури викидних газів і емісія NO_x .

Встановлено, що емісія оксидів азоту NO_x зростає в $\sim 1,5 \dots 2,0$ рази та складає $[\text{NO}_x] = 89 - 50$ ppm для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO , ~ 20 разів при спалюванні суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$ об., рівень утворення CO складає $[\text{CO}] = 1 - 2$ ppm.

Результати дослідження в подальшому можуть бути використані для підвищення ефективності процесу горіння при спалюванні метано-водневих сумішей та модернізації паливоспалюючих систем котлів малої потужності комунальної та промислової теплоенергетики, індивідуально-побутового сектора та ін.

REFERENCES

- [1] 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. Retrieved from: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>.
- [2] Hiller, G., Bertoni, P., Jost, M., Irretier, O. (2021). Modular heat treatment using nitriding and low-pressure carburizing (part 3). *Heat Processing*, no. 1, pp. 33–38.
- [3] Wunning, J.G. (2021). Future heating of industrial furnaces. *Heat Processing*, no. 1, pp. 23–25; *Heat Processing*, no. 4, pp. 27–29.
- [4] Europe Turns to LNG to Avert Energy Crisis — October, 2022. pp. 16–18. Retrieved from: <https://www.powermag.com>
- [5] Soroka, B.S., Pyanykh, K.E., Zgurskyi, 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>
- [6] Soroka, B. S., Pyanikh, K.E., Zgursky, V.A., Gorupa, V.V., Kudryavtsev, V. S. (2020). Enerhetychni ta ekolohichni kharakterystyky pobutovykh hazovykh pryladiv pry vykorystanni metano-vodnevoi sumishi v yakosti palyvnoho hazu [Energy and environmental characteristics of domestic gas facilities using methane and hydrogen mix as a fuel gas]. *Naftohazova haluz Ukrainy*, no. 6, pp. 3–13.
- [7] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006). Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation (4th ed.). Springer. 378 p. Retrieved from: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/4789/1/169.pdf>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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>.
- [2] Hiller, G., Bertoni, P., Jost, M., Irretier, O. (2021). Modular heat treatment using nitriding and low-pressure carburizing (part 3). *Heat Processing*, no. 1, pp. 33–38.
- [3] Wunning, J.G. (2021). Future heating of industrial furnaces. *Heat Processing*, no. 1, pp. 23–25; *Heat Processing*, no. 4, pp. 27–29.
- [4] Europe Turns to LNG to Avert Energy Crisis — October, 2022. pp. 16–18. URL: <https://www.powermag.com>.
- [5] Soroka, B.C., Pyanykh, K.E., Zgurskyi, 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>
- [6] Сорока, Б.С., П'яних, К.Є., Згурський, В.О., Горупа, В.В., Кудрявцев, В.С. (2020). Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші в якості паливного газу. *Нафтогазова галузь України*, no. 6, pp. 3–13.
- [7] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006). Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation (4th ed.). Springer. 378 p. URL: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/4789/1/169.pdf>

© Рябцун Р. С., Воробйов М. В.

Дата надходження статті до редакції: 06.06.2024

Дата затвердження статті до друку: 18.06.2024