

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.1\(499\).10](https://doi.org/10.15589/znп2025.1(499).10)

REDUCTION OF NITROGEN OXIDES EMISSION THROUGH STAGED AIR SUPPLY IN THE COMBUSTION CHAMBER OF AN AMMONIA-FUELED GAS TURBINE ENGINE

ЗМЕНШЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ СТУПІНЧАСТОМУ ПІДВЕДЕННІ ПОВІТРЯ В КАМЕРУ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ НА АМІАКУ

Serhiy I. Serbin

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Bohdan M. Lychko

bogdan.lychko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3943-9689

Anatolii B. Kolesnykov

tolyamongol74@gmail.com

С. І. Сербін,

д-р. техн. наук, професор

Б. М. Личко,

канд. техн. наук, доцент

А. Б. Колесников,

аспірант

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The study focuses on evaluating the potential of using gaseous ammonia for decarbonized hybrid energy systems with gas turbine engines. The primary goal is to reduce nitrogen oxide emissions in the combustion chamber of a gas turbine engine operating on gaseous ammonia by introducing staged air supply along the length of the combustion liner. The research object is the operational processes within the combustion chamber of a high-powered gas turbine engine fueled by pure ammonia. Based on a developed reactor model, which solves differential equations of mass and energy conservation for a chemically reacting system, rational design parameters of the combustion chamber are selected. These parameters determine the nature of the staged air supply along the length of the combustion liner. The kinetic scheme of ammonia burning in the gas turbine engine's combustion chamber is based on a high-temperature ammonia oxidation mechanism, comprising 160 chemical reactions with 27 species. New data have been obtained regarding the formation of nitrogen oxides in the high-powered combustion chamber under varying air supply configurations along the liner. Optimal combustion chamber parameters have been identified, minimizing emissions of toxic components compared to the baseline fuel-burning design. The combustion chamber's operational process calculations were performed at a pressure of 2.0 MPa for six different schemes of primary and secondary air supply along the combustion liner. Dependencies of toxic nitrogen oxide emissions and gas outlet temperature on the air excess ratio were demonstrated. The results of this study can be applied to the practical design of combustion chambers for gas turbine engines operating on alternative fuels.

Key words: gas turbine engine; combustion chamber; decarbonization; ammonia; emission of toxic components.

Анотація. Роботу пов'язана з визначенням можливостей використання газоподібного аміаку для декарбонізованих гібридних енергетичних систем з газотурбінними двигунами. Метою є зменшення викидів оксидів азоту в камері згоряння газотурбінного двигуна, що працює на газоподібному аміаку, за рахунок ступінчастого підведення повітря по довжині жарової труби. В якості об'єкта дослідження вибрано робочі процеси в камері згоряння високофорсованого газотурбінного двигуна, що працює на чистому аміаку. На основі розробленої реакторної моделі, заснованої на розв'язанні диференціальних рівнянь збереження маси і енергії для хімічно реагуючої системи, проводиться вибір раціональних конструктивних параметрів камери згоряння, які визначають характер ступінчастого підведення повітря по довжині жарової труби. В якості кінетичної схеми горіння газоподібного аміаку в камері згоряння газотурбінного двигуна використано механізм високотемпературного окиснення аміаку, який містить у собі 160 хімічних реакцій з 27 компонентами. Отримано нові дані про процеси утворення оксидів азоту в високофорсованій камері згоряння газотурбінного двигуна при різному підведенні повітря по довжині жарової труби, виявлено раціональні параметри камери згоряння, які мінімізують викиди токсичних компонентів порівняно з базовим варіантом паливоспалюючого пристрою. Розрахунки

робочого процесу камери згоряння проведено для тиску 2,0 МПа та шести різних схем підведення первинного і вторинного повітря по довжині жарової труби. Показано залежності емісії токсичних оксидів азоту і температури газів на виході камери в залежності від коефіцієнту надлишку повітря. Результати роботи можуть бути використані для практичного проєктування камер згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на альтернативних паливах.

Ключові слова: газотурбінний двигун; камера згоряння; декарбонізація; аміак; емісія токсичних компонентів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Аміак (NH_3) розглядається як перспективне альтернативне паливо для газотурбінних двигунів завдяки його високій енергетичній щільності, можливості зберігатися в рідкому стані та адаптації до існуючої інфраструктури транспортування. Його застосування є особливо актуальним у контексті декарбонізації, оскільки під час спалювання аміаку не утворюється вуглекислий газ CO_2 . Проте, впровадження аміаку як палива для газотурбінних двигунів пов'язане з низкою технічних та екологічних викликів, які необхідно подолати. Основні з них містять:

1. Швидкість горіння аміаку значно нижча, ніж у традиційних вуглеводневих палив, що може негативно впливати на ефективність згоряння в газотурбінних установках.

2. Процес згоряння аміаку супроводжується утворенням значної кількості оксидів азоту, які є екологічно шкідливими. Для їх зменшення необхідні складні системи очищення, наприклад, селективне каталітичне відновлення.

3. Труднощі із забезпеченням стабільного горіння, особливо під час запуску або роботи на часткових навантаженнях.

4. Аміак є агресивною речовиною, це потребує вибору спеціальних матеріалів для камер згоряння та інших компонентів.

5. Хоча аміак і може зберігатися в рідкому стані при відносно низькому тиску, він є токсичною і небезпечною речовиною.

Для інтеграції аміаку в якості палива в газотурбінні системи потрібні значні модифікації, зокрема вдосконалення конструкції камер згоряння та розробка технологій зниження викидів NO_x . Успішне впровадження аміаку як палива вимагає комплексних досліджень та інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесів горіння, мінімізацію впливу на навколишнє середовище і забезпечення довговічності конструктивних елементів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На початку 2020 року Європейська комісія [1] схвалила Європейський зелений договір, зобов'язавшись досягти практично нульових викидів парникових газів та ліквідувати забруднення навколишнього середовища. Враховуючи потенціал як життєздатного замінильника вуглеводнів у первинному енергетичному секторі, аміак заслуговує на увагу як перспективне паливо. Маючи майже 18 % водню за масою, аміак може слугувати ефективним носієм у виробництві електроенергії [2]. У відповідь на зростаючий попит

на низьковуглецеве виробництво аміак (NH_3) стає перспективною альтернативою традиційним вуглеводням [3]. За даними Ammonia Energy Association [4] загальновизнаний процес Габера-Боша для виробництва аміаку потребує значних енерговитрат та великих обсягів водню. Таким чином, досягнення вуглецевої нейтральності вимагає підвищення економічної привабливості методів виробництва аміаку та їх практичної інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

Перспективним напрямком є дослідження спалювання аміаку в поєднанні з різними видами органічних матеріалів. В роботі [5] описано результати експериментів із співспалювання аміаку (до 20%) з природним газом на тепловій електростанції потужністю 2 МВт. Аналогічно в роботі [6] представлено результати експериментів із співспалювання аміаку з вугіллям на тепловій електростанції потужністю 156 МВт. В роботах [7, 8] запропоновано, що низьку займистість аміаку можна компенсувати шляхом додавання до потоку спеціальних добавок, таких як метан та чистий водень. Однак цей підхід може нівелювати переваги спалювання чистого аміаку, зокрема його відносну простоту підведення до камери згоряння.

Численні роботи [9, 10] буди зосереджені на дослідженнях додавання водню до аміаку. Альтернативою є використання термохімічної технології переробки палива для отримання водню з аміаку [11]. В роботі [12] визначили необхідну кількість водню з урахуванням швидкості ламінарного полум'я для переобладнання існуючих двигунів із іскровим запалюванням на роботу з аміаком. В [13] досліджувалось оптимальне співвідношення водень-аміак для забезпечення стабільної роботи двигунів внутрішнього згоряння.

В дослідженні [14] дійшли висновку, що значне утворення оксидів азоту NO_x під час окиснення аміаку створює додаткові труднощі для камер згоряння газових турбін. Різні схеми спалювання аміаку в повітрі були розроблені в [15], але ці механізми потребують подальшого вдосконалення. В роботі [16] зазначено, що, попри наявність розвиненої інфраструктури для виробництва та транспортування аміаку, проблеми його спалювання все ще потребують постійної оцінки та інновацій. В дослідженні [17] указано, що збільшення тиску в камері приводить до зменшення часу затримки запалювання, однак супроводжується одночасним зниженням швидкості полум'я. Крім того, суттєве утворення оксидів азоту під час окиснення аміаку створює додаткові виклики, що підтверджує робота [18]. Автори [19] продемонстрували

потенціал для зменшення викидів оксидів азоту завдяки принципам багатоступеневого спалювання аміаку. Mitsubishi Power [20] представила розробку газової турбіни потужністю 40 МВт, призначеної для роботи виключно на аміаку, що свідчить про прогрес у подоланні цих викликів.

Щоб вирішити проблему низької швидкості поширення полум'я аміаку в камерах згоряння газових турбін, важливо ефективно використовувати закручення потоків та турбулентність у камері. Це сприяє збільшенню часу перебування палива в зоні горіння. Автори [21] дослідили нові двоступеневі камери згоряння для газових турбін, що працюють при рівнях теплової потужності до 230 кВт. Крім того, в [22] розроблено камеру згоряння для систем газових турбін із низьким рівнем викидів NO_x та режимом дифузійного спалювання аміаку в повітрі. В роботі [23] проведено дослідження можливості попереднього розкладання аміаку на суміш водню та азоту. Автори [24] провели числовий аналіз спалювання аміаку в сучасних конструкціях газових турбін: з використанням сухої низькоемісійної технології та багатоступеневого згоряння RQL (rich-burn, quick-quench, lean-burn). Використання багатоступеневого спалювання, як це продемонстровано в [25], виявилось ефективним для зменшення викидів, забезпечуючи оптимальну продуктивність.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Хоча аміак активно досліджується як альтернативне паливо для газотурбінних двигунів, деякі аспекти його використання залишаються відкритими і потребують додаткових рішень. Аналіз останніх досліджень щодо використання аміаку для газотурбінних двигунів висвітлив невирішені проблеми, пов'язані з його фізико-хімічними властивостями. Зокрема, проблеми викликають недостатня ефективність згоряння в камерах високого тиску газотурбінних двигунів, ризик погасання полум'я та нестабільність при високих швидкостях потоку, а також потенційно високі викиди оксидів азоту.

Сучасні технології зниження NO_x , такі як селективне каталітичне відновлення (SCR), можуть бути недостатньо економічно доцільними для високотемпературних процесів у газотурбінних двигунах. Важливо розробити нові підходи, які будуть інтегровані в саму камеру згоряння, наприклад, технології горіння зі ступінчастим підведенням повітря по довжині жарової труби.

Метою роботи є зменшення викидів оксидів азоту в камері згоряння газотурбінного двигуна, що працює на газоподібному аміаку, за рахунок ступінчастого підведення повітря по довжині жарової труби.

В якості **об'єкта дослідження** вибрано робочі процеси в високофорсованій камері згоряння газотурбінного двигуна, що працює на газоподібному аміаку. **Предмет дослідження** – закономірності утворення оксидів азоту при вигоранні аміаку в камері згоряння газотурбінного двигуна.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для аналізу можливостей зменшення викидів оксидів азоту шляхом використання ступінчастого підведення первинного і вторинного повітря по довжині жарової труби обрано схему дифузійної камери згоряння газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт [26] (рис. 1).

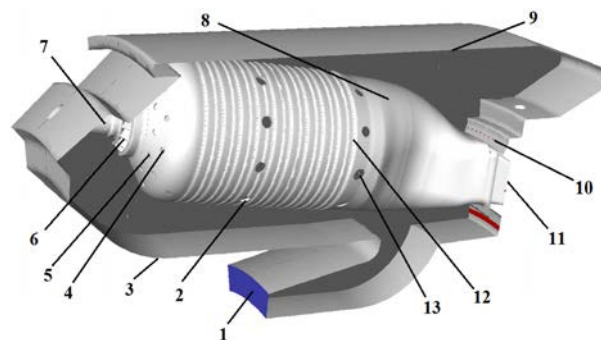


Рис. 1. Віртуальна модель камери згоряння: 1 – підведення повітря після компресора; 2 – радіальні отвори підведення первинного повітря; 3 – внутрішній корпус; 4 – другий ряд отворів фронтального пристрою; 5 – перший ряд отворів фронтального пристрою; 6 – лопатковий завихрювач; 7 – паливна форсунка; 8 – жарова труба; 9 – зовнішній корпус; 10 – отвори підведення повітря на охолодження лопаткових апаратів; 11 – підведення продуктів згоряння в турбіну; 12 – отвори охолодження жарової труби; 13 – радіальні отвори підведення вторинного повітря

Перерозподілом витрат повітря через отвори завихрювача (6), фронтального пристрою (4, 5) і жарової труби (2, 13) зміною їх прохідних перерізів планується мінімізувати викиди оксидів азоту.

Для цього використано математичну модель, засновану на реакторній теорії [27, 28], в якій певна сукупність різних реакторів заміщує відповідні об'єми камери згоряння. У гомогенному реакторі (ГР), також відомому як реактор з ідеальним змішуванням, усі параметри, що характеризують процес, є повністю однорідними у межах усього об'єму реактора. У проточному реакторі (ПР), який ще називають реактором ідеального витіснення, реагенти переміщуються, наслідуючи рух твердого поршня. У результаті цього вздовж реактора формується градієнт концентрацій, температури та інших властивостей, що залежить від кінетики процесу та супутніх фізичних явищ. В адіабатичному змішувачі (АЗ) відбувається лише змішування компонентів без протікання хімічних реакцій. Процеси в реакторах моделюються рівняннями збереження маси та енергії, які описують хімічно реагуючу систему. Детальний опис моделі наведено в [29].

В даній роботі досліджено характер протікання робочого процесу в високофорсованій камері згоряння газотурбінного двигуна, що працює на аміаку, з використанням детального хімічного механізму горіння, запропонованому в роботі [30], який містить 160 реакцій з 27 компонентами.

Для аналізу робочого процесу в камері згоряння газотурбінного двигуна, що працює на аміаку, проведено розрахунки з використанням обчислювального комплексу ANSYS Chemkin [31].

Початкові дані (на одну жарову трубу): витрата аміаку на розрахунковому режимі 0,255 кг/с, температура палива 313 К, витрата повітря 4,291 кг/с без урахування відборів на охолодження турбін, температура повітря 748 К, його тиск 2,0 МПа.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

В даній роботі запропоновано дослідити вплив характеру підведення повітря на утворення оксидів азоту в камері згоряння газотурбінного двигуна для шести різних варіантів, що відрізняються розподілом коефіцієнту надлишку повітря по довжині жарової труби. Зміна коефіцієнту надлишку повітря по довжині жарової труби для досліджених шести варіантів підведення повітря показана на рис. 2.

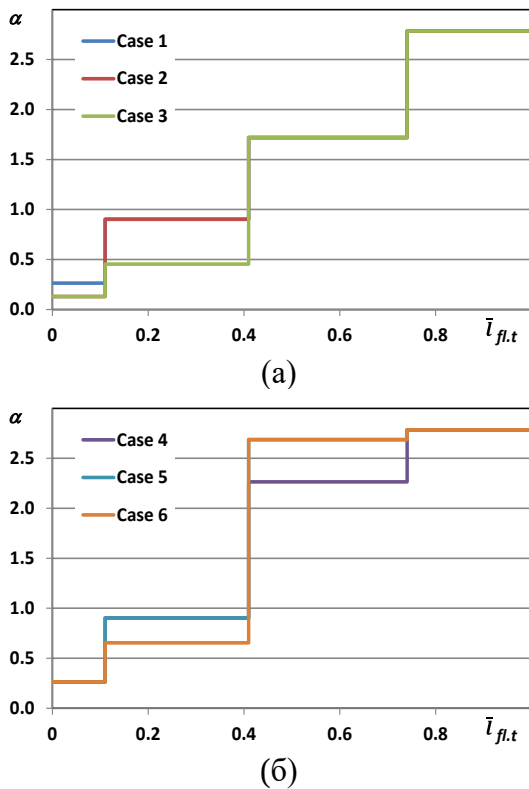


Рис. 2. Зміна коефіцієнту надлишку повітря по довжині жарової труби для досліджених шести варіантів розподілу повітря

Такий характер розподілу коефіцієнтів надлишку повітря визначається зміною площ прохідних перерізів лопаткового завихрювача, двох рядів отворів фронтального пристрою, а також радіальних отворів підведення первинного і вторинного повітря в жарову трубу камери згоряння. Для трьох перших варіантів характерна зміна прохідних перерізів тільки в лопатковому

завихрювачі і фронтальному пристрої, а в інших трьох варіантах додаються зміни і в площях перерізів отворів підведення первинного і вторинного повітря. Відмітимо, що базовим (без зміни проц отворів в серійній конструкції жарової труби) є варіант 1.

Мольні частки O_2 , H_2O , N_2 , NO , N_2O , NO_2 та об'ємні концентрації NO і NO_x на виході камери для досліджених шести випадків розподілу повітря показані на рис. 3.

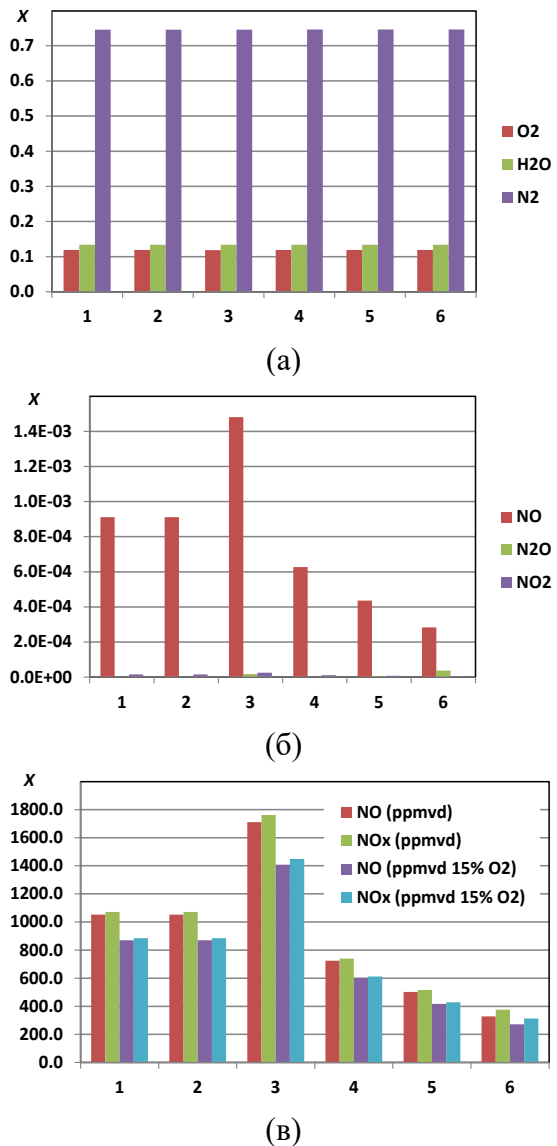


Рис. 3. Мольні частки O_2 , H_2O , N_2 (а), NO , N_2O , NO_2 (б) та об'ємні концентрації NO , NO_x (в) на виході камери для досліджених шести варіантів розподілу повітря

Розподіл повітря по довжині жарової труби не впливає на концентрації таких компонентів, як O_2 , H_2O , N_2 (рис. 3, а) на виході камери згоряння, але сильно впливає на емісію оксидів азоту. З даних рис. 3, б можна зробити висновок, що основним оксидом, що характеризує токсичність відхідних газів, є монооксид азоту NO . Найбільші викиди цього забруднювача

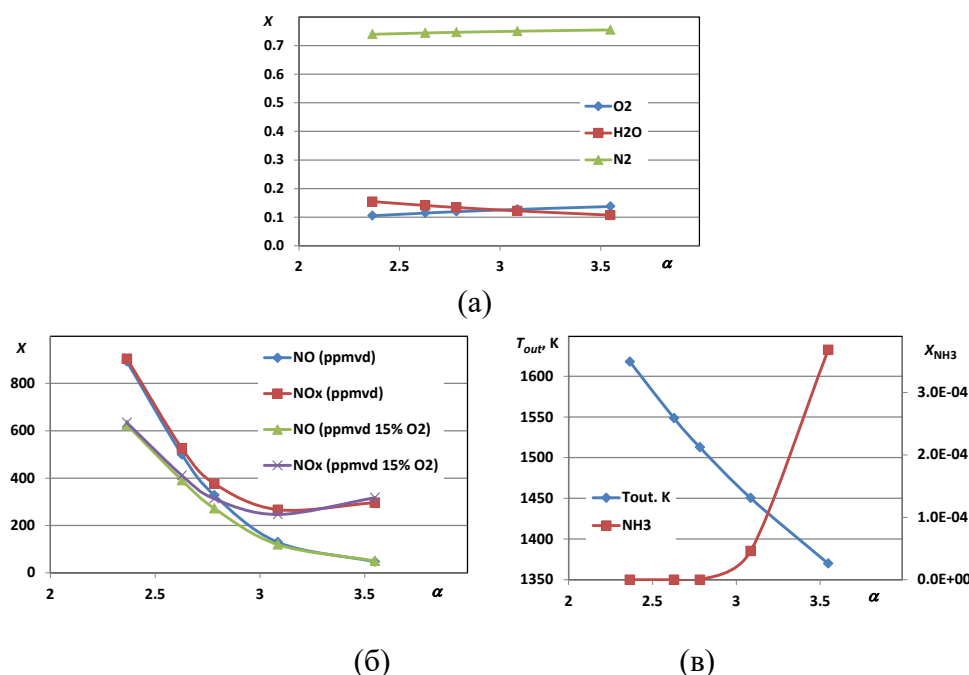


Рис. 4. Мольні частки O_2 , H_2O , N_2 (а), об'ємні концентрації NO , NO_x (б), температура газів і мольна частка аміаку (в) на виході камери в залежності від сумарного коефіцієнта надлишку повітря для варіанту раціонального розподілу повітря

характерні для схеми 3, а мінімальні – для схеми 6 (рис. 3, в). Відмітимо, що ця шоста (раціональна) схема розподілу повітря характеризується значним зростанням коефіцієнту надлишку повітря в районі підведення первинного повітря в жарову трубу (при відносній довжині жарової труби $\bar{l}_{fl,t} = 0,41$) з 0,654 (збагачена суміш) до 2,686 (збіднена суміш).

Мольні частки O_2 , H_2O , N_2 (а), об'ємні концентрації NO , NO_x (б), температура газів і мольна частка аміаку (в) на виході камери в залежності від сумарного коефіцієнта надлишку повітря для випадку раціонального розподілу повітря показані на рис. 4.

На відміну від базового варіанту 1, де об'ємна концентрація оксиду азоту NO_x на виході камери згоряння дорівнювала 885,4 ppmvd 15% O_2 , для раціонального варіанту 6 концентрація для розрахункового режиму (сумарний коефіцієнт надлишку повітря 2,78, середня температура газів на виході 1512 K) зменшилась до 312,8 ppmvd 15% O_2 . Збільшення коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha >$ призводить до погіршення умов вигорання палива та зростання концентрації незгорілого аміаку на виході.

ВИСНОВКИ

1. Для аналізу можливостей зменшення викидів оксиду азоту при роботі камери згоряння газотурбінного двигуна на газоподібному аміаку, використано математичну модель на основі реакторної теорії, яка базується на розв'язанні системи рівнянь збереження маси і енергії хімічно реагуючої системи.

2. Для розрахунку вигорання палива та утворення забруднюючих речовин використано механізм високотемпературного окиснення аміаку, який містить у собі 160 хімічних реакцій з 27 компонентами.

3. Отримано нові дані про процеси утворення оксидів азоту в високофорсованій камері згоряння газотурбінного двигуна при зміні підведення повітря по довжині жарової труби, виявлено раціональні параметри камери, які мінімізують викиди токсичних компонентів.

4. Для обраного раціонального варіанту жарової труби камери згоряння концентрація оксидів азоту NO_x на виході зменшилась зі значенням 885,4 ppmvd 15% O_2 (для базової конструкції) до 312,8 ppmvd 15% O_2 .

5. Існує потреба в подальших дослідженнях характеристик високофорсованої камери згоряння газотурбінного двигуна в рамках тривимірної CFD-моделювання.

REFERENCES

- [1] European Commission. A European Green Deal. (2023) Retrieved from: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, 05.12.2023.
- [2] Boerner, K.K. (2019). Industrial ammonia production emits more CO2 than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that. *Chemical & Engineering News*, vol. 97, no. 24.

- [3] Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., & Joannon, M.D. (2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Front. Mech. Eng., Sec. Engine and Automotive Engineering*, vol. 8.
- [4] Ammonia energy association. Ammonia Energy. (2023). Retrieved from: <https://www.ammoniaenergy.org>, 14.12.2023.
- [5] Ito, S., Uchida, M., Suda, T., Fujimori, T. (2020). Development of ammonia gas turbine co-generation technology. *IHI Engineering Review*, vol. 53, no. 1, pp. 1–6.
- [6] Lee, H., & Lee, M. (2021). Recent advances in ammonia combustion technology in thermal power generation system for carbon emission reduction. *Energies*, vol. 14, no. 18, 5604.
- [7] Rocha, R.C., Costa, M., & Bai, X.S. (2021). Combustion and emission characteristics of ammonia under conditions relevant to modern gas turbines. *Combustion Science and Technology*, vol. 193, no. 14, pp. 1–20.
- [8] Jójka, J., & Slefarski, R. (2021) Emission Characteristics for Swirl Methane-Air Premixed Flames with Ammonia addition. *Energies*, vol. 14, no. 662, pp. 1–19.
- [9] Yang, R., Liu, Z., & Liu, J. (2024). The methodology of decoupling fuel and thermal nitrogen oxides in multi-dimensional computational fluid dynamics combustion simulation of ammonia-hydrogen spark ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 55, pp. 300–318.
- [10] Yan, Y., Yang, R., Liu, Z., Liu, J. (2023) Nitrogen Oxides Emission Characteristics of Zero-Carbon Ammonia-Hydrogen Fuels for Internal Combustion Engines. *SAE Technical Paper*, vol. 01, no. 0334.
- [11] Liu, J., & Liu, Z. (2024). In-cylinder thermochemical fuel reforming for high efficiency in ammonia spark-ignited engines through hydrogen generation from fuel-rich operations. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 54, pp. 837–848.
- [12] Yan, Y., Liu, Z., & Liu, J. (2023). An Evaluation of the Conversion of Gasoline and Natural Gas Spark Ignition Engines to Ammonia/Hydrogen Operation From the Perspective of Laminar Flame Speed. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 145(1), no. 012302.
- [13] Yan, Y., Shang, T., Li, L., Liu, Z., & Liu, J. (2024). Assessing Hydrogen–Ammonia Ratios to Achieve Rapid Kernel Inception in Spark-Ignition Engines. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 146(6), no. 062301.
- [14] Valera-Medina, A., Gutesa, M., Xiao, H., Pugh, D., Giles, A., Goktepe, B., Marsh, R., & Bowen, P. (2019). Premixed ammonia/hydrogen swirl combustion under rich fuel conditions for gas turbines operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 16, pp. 8615–8626.
- [15] Stagni, A., Cavallotti, C., Arunthanayothin, S., Song, Y., Herbinet, O., Battin-Leclerc, F., & Faravelli, T. (2020). An experimental, theoretical and kinetic-modeling study of the gas-phase oxidation of ammonia. *Reaction Chemistry and Engineering*, vol. 5, pp. 696–711.
- [16] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Kunkuma, K.D., Somarathne, A., Okafor, E.C. (2019) Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, pp. 109–133.
- [17] Mathieu, O., & Petersen, E.L. (2014). Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of ammonia and related NOx chemistry. *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 3, pp. 554–570.
- [18] Gobbato, P., Masi, M., Toffolo, A., Lazzaretto, A., & Tanzini, G. (2012). Calculation of the flow field and NOx emissions of a gas turbine combustor by a coarse computational fluid dynamics model. *Energy*, vol. 45, pp. 445–455.
- [19] Okafor, E.C., Somarathne, K.D.K.A., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N., & Kobayashi, H. (2019). Towards the development of an efficient low-NOx ammonia combustor for a micro gas turbine. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 4597–4606.
- [20] Mitsubishi Power. Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system. (2023) Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025. Retrieved from: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>, 14.12.2023.
- [21] Okafor, E.C., Kurata, O., Yamashita, H., Inoue, T., Tsujimura, T., Iki, N., Hayakawa, A., Ito, S., Uchida, M., & Kobayashi, H. (2021). Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; relevance of combustion enhancement to flame stability and NOx control. *Applications in Engineering and Combustion Science*, vol. 7, no. 100038.
- [22] Kurata, O., Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kawano, M., Arai, K., Okafor, E.C., Hayakawa, A., & Kobayashi, H. (2019). Development of a wide range-operable, rich-lean low-NOx combustor for NH3 fuel gas-turbine power generation. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 4587–4595.
- [23] Ditaranto, M., Saanum, I., & Larfeldt, J. (2021). Experimental study on high pressure combustion of decomposed ammonia: how can ammonia be best used in a gas turbine? *Proceedings of ASME Turbo Expo 2021Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, GT2021–60057. Retrieved from: <https://doi.org/10.1115/GT2021-60057>.
- [24] Rocha, R.C., Costa, M., & Bai, X-S. (2020). Combustion and Emission Characteristics of Ammonia under Conditions Relevant to Modern Gas Turbines. *Combustion Science and Technology*, vol. 193, no. 14, pp. 2514–2533.
- [25] Langella, G., Sorrentino, G., Sabia, P., Ariemma, G.B., Amoresano, A., & Iodice, P. (2023). Ammonia as a Fuel for Gas Turbines: Perspectives and Challenges. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2648, no. 012009.
- [26] Romanovskyy, G.F., Serbin, S.I., & Patlaychuk, V.M. (2005). Suchasni hazoturbinni ahrehaty. Navchalnyy posibnyk. Mykolayiv: NUS, 344 p.
- [27] Kee, R.J., Rupley, F.M., & Miller, J.A. (1989). Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. *Sandia Report SAND89-8009B*, 127 p.
- [28] Lutz, A.E., Kee, R.J., & Miller, J.A. (1987). SENKIN: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis. *Sandia Report SAND87-8248*, 32 p.

- [29] Serbin, S.I., & Kolesnykov, A.B. (2023). Mozhyvosti efektyvnoho spaliuvannia amiaiku v kameri zghoriannia hazoturbinnoho dvyhuna z turbinoiu pere rozshyrennia. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiral Makarova*, vol. 1 (490), pp. 96–102.
- [30] Li, Y., Jin, Z., Wang, Z., Tan, H., Jia, Z., Cui, B., Zhou, S., Bai, F. (2023) Evaluation, Reduction, and Validation of a New Skeletal Mechanism for the Cofiring of NH_3 and CH_4 . *ACS Omega*, vol. 8, pp. 47113–47122.
- [31] Chemkin Theory Manual. (2016). Available: https://personal.ems.psu.edu/~radovic/ChemKin_Theory_PaSR.pdf.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] European Commission. A European Green Deal. (2023). Retrieved from: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, 05.12.2023.
- [2] Boerner, K.K. (2019). Industrial ammonia production emits more CO_2 than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that. *Chemical & Engineering News*, vol. 97, no. 24.
- [3] Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., & Joannon, M.D. (2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Front. Mech. Eng., Sec. Engine and Automotive Engineering*, vol. 8.
- [4] Ammonia energy association. Ammonia Energy. (2023). Retrieved from: <https://www.ammoniaenergy.org>, 14.12.2023.
- [5] Ito, S., Uchida, M., Suda, T., & Fujimori, T. (2020). Development of ammonia gas turbine co-generation technology. *IHI Engineering Review*, vol. 53, no. 1, pp. 1–6.
- [6] Lee, H., & Lee, M. (2021). Recent advances in ammonia combustion technology in thermal power generation system for carbon emission reduction. *Energies*, vol. 14, no. 18, 5604.
- [7] Rocha, R.C., Costa, M., & Bai, X.S. (2021). Combustion and emission characteristics of ammonia under conditions relevant to modern gas turbines. *Combustion Science and Technology*, vol. 193, no. 14, pp. 1–20.
- [8] Jójka, J., & Slefarski, R. (2021). Emission Characteristics for Swirl Methane-Air Premixed Flames with Ammonia addition. *Energies*, vol. 14, no. 662, pp. 1–9.
- [9] Yang, R., Liu, Z., & Liu, J. (2024). The methodology of decoupling fuel and thermal nitrogen oxides in multi-dimensional computational fluid dynamics combustion simulation of ammonia-hydrogen spark ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 55, pp. 300–318.
- [10] Yan, Y., Yang, R., Liu, Z., & Liu, J. (2023). Nitrogen Oxides Emission Characteristics of Zero-Carbon Ammonia-Hydrogen Fuels for Internal Combustion Engines. *SAE Technical Paper*, vol. 01, no. 0334.
- [11] Liu, J., & Liu, Z. (2024). In-cylinder thermochemical fuel reforming for high efficiency in ammonia spark-ignited engines through hydrogen generation from fuel-rich operations. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 54, pp. 837–848.
- [12] Yan, Y., Liu, Z., & Liu, J. (2023). An Evaluation of the Conversion of Gasoline and Natural Gas Spark Ignition Engines to Ammonia/Hydrogen Operation From the Perspective of Laminar Flame Speed. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 145(1), no. 012302.
- [13] Yan, Y., Shang, T., Li, L., Liu, Z., & Liu, J. (2024). Assessing Hydrogen–Ammonia Ratios to Achieve Rapid Kernel Inception in Spark-Ignition Engines. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 146(6), no. 062301.
- [14] Valera-Medina, A., Gutesa, M., Xiao, H., Pugh, D., Giles, A., Goktepe, B., Marsh, R., & Bowen, P. (2019). Premixed ammonia/hydrogen swirl combustion under rich fuel conditions for gas turbines operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 16, pp. 8615–8626.
- [15] Stagni, A., Cavallotti, C., Arunthanayothin, S., Song, Y., Herbinet, O., Battin-Leclerc, F., & Faravelli, T. (2020). An experimental, theoretical and kinetic-modeling study of the gas-phase oxidation of ammonia. *Reaction Chemistry and Engineering*, vol. 5, pp. 696–711.
- [16] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Kunkuma, K.D., Somarathne, A., & Okafor, E.C. (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, pp. 109–133.
- [17] Mathieu, O., & Petersen, E.L. (2014). Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of ammonia and related NOx chemistry. *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 3, pp. 554–570.
- [18] Gobato, P., Masi, M., Toffolo, A., Lazzaretto, A., & Tanzini, G. (2012). Calculation of the flow field and NOx emissions of a gas turbine combustor by a coarse computational fluid dynamics model. *Energy*, vol. 45, pp. 445–455.
- [19] Okafor, E.C., Somarathne, K.D.K.A., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N., & Kobayashi, H. (2019). Towards the development of an efficient low-NOx ammonia combustor for a micro gas turbine. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 4597–4606.
- [20] Mitsubishi Power. Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system. (2023) Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025. Retrieved from: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>, 14.12.2023.
- [21] Okafor, E.C., Kurata, O., Yamashita, H., Inoue, T., Tsujimura, T., Iki, N., Hayakawa, A., Ito, S., Uchida, M., & Kobayashi, H. (2021). Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; relevance of combustion enhancement to flame stability and NOx control. *Applications in Engineering and Combustion Science*, vol. 7, no. 100038.
- [22] Kurata, O., Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kawano, M., Arai, K., Okafor, E.C., Hayakawa, A., & Kobayashi, H. (2019). Development of a wide range-operable, rich-lean low-NOx combustor for NH_3 fuel gas-turbine power generation. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 4587–4595.

- [23] Ditaranto, M., Saanum, I., & Larfeldt, J. (2021). Experimental study on high pressure combustion of decomposed ammonia: how can ammonia be best used in a gas turbine? *Proceedings of ASME Turbo Expo 2021 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, GT2021-60057. Retrieved from: <https://doi.org/10.1115/GT2021-60057>.
- [24] Rocha, R.C., Costa, M., & Bai, X-S. (2020). Combustion and Emission Characteristics of Ammonia under Conditions Relevant to Modern Gas Turbines. *Combustion Science and Technology*, vol. 193, no. 14, pp. 2514–2533.
- [25] Langella, G., Sorrentino, G., Sabia, P., Ariemma, G.B., Amoresano, A., & Iodice, P. (2023). Ammonia as a Fuel for Gas Turbines: Perspectives and Challenges. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2648, no. 012009.
- [26] Романовський, Г.Ф., Сербін, С.І., & Патлайчук, В.М. (2005). Сучасні газотурбінні агрегати. Навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 344 с.
- [27] Kee, R.J., Rupley, F.M., & Miller, J.A. (1989). Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. *Sandia Report SAND89-8009B*, 127 p.
- [28] Lutz, A.E., Kee, R.J., & Miller, J.A. (1987). SENKIN: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis. *Sandia Report SAND87-8248*, 32 p.
- [29] Сербін, С.І., & Колесников, А.Б. (2023). Можливості ефективного спалювання аміаку в камері згоряння газотурбінного двигуна з турбіною пере розширення. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, № 1 (490), с. 96–102.
- [30] Li, Y., Jin, Z., Wang, Z., Tan, H., Jia, Z., Cui, B., Zhou, S., & Bai, F. (2023). Evaluation, Reduction, and Validation of a New Skeletal Mechanism for the Cofiring of NH_3 and CH_4 . *ACS Omega*, vol. 8, pp. 47113–47122.
- [31] Chemkin Theory Manual. (2016). Available: https://personal.ems.psu.edu/~radovic/ChemKin_Theory_PaSR.pdf.

© Сербін С. І., Личко Б. М., Колесников А. Б.
Дата надходження статті до редакції: 27.01.2025
Дата затвердження статті до друку: 10.02.2025