



Serhiy I. Serbin
Сербін Сергій
Іванович

УДК 621.45.034

THREE-DIMENSIONAL STUDIES OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE WITH STEAM INJECTION OPERATING ON A MIXTURE OF AMMONIA AND HYDROGEN

**ТРИВИМІРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ВПОРСКУВАННЯМ ПАРИ,
ЩО ПРАЦЮЄ НА СУМІШІ АМІАКУ І ВОДНЮ**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).08](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).08)



Daifen Chen
Чен Дайфен

Serhiy I. Serbin¹

Сербін Сергій Іванович, докт. техн. наук, проф.
serhiy.serbin@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3423-2681

Daifen Chen²

Чен Дайфен, PhD, проф.
dfchen@just.edu.cn
ORCID: 0000-0002-4110-2199

Bohdan M. Lychko¹

Личко Богдан Михайлович, канд. техн. наук, доц.
bogdan.lychko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3943-9689



Bohdan M. Lychko
Личко Богдан
Михайлович

Kateryna S. Burunsuz¹

Бурунсуз Катерина Сергіївна, канд. техн. наук, доц.
kateryna.burunsuz@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5778-6663

¹*Adamirak Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*Jingsu University of Science and Technology, Zhenjiang*

¹Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

²Університет науки і технологій провінції Цзянсу, м. Чженьцзян



Kateryna S. Burunsuz
Бурунсуз
Катерина
Сергіївна

Abstract. The work is aimed at studying the characteristics of the combustion chamber of a gas turbine engine with steam injection, which operates on a mixture of ammonia and hydrogen. Such engines promising from the perspective of designing and utilizing decarbonized hybrid energy systems with zero carbon emissions. The work aims to conduct three-dimensional studies of the energy and emission characteristics of a combustion chamber with steam injection, which operates on a mixture of ammonia and hydrogen. The working processes of the combustion chamber of a marine gas turbine engine with a capacity of 32 MW were chosen as the object of study. To find the parameters of the burning combustion device, the computational fluid dynamics (CFD) method was used, which solves the system of differential equations of conservation of mass, energy, and transfer of chemical components in a multicomponent reacting turbulent system. The calculations used a detailed kinetic scheme of ammonia and hydrogen combustion, which includes 203 chemical reactions with 31 chemical components. As a result of three-dimensional modeling, new data were obtained on the processes of ammonia and hydrogen flame propagation in highly swirling flows and under conditions of staged air and steam supply through the cross-sections of the flame tube, as well as the main energy and environmental characteristics of such a fuel combustion device. Research shows that stable operation of the combustion chamber under the supply of water vapor is achieved exclusively under the condition of adding at least 30% hydrogen to the

fuel mixture. This is explained by the acceleration of chemical reactions and an increase in the number of active radicals in the combustion zone. It has been established that an increase in the share of steam in the primary combustion zone leads to a drop in temperature and a significant deterioration in the completeness of ammonia burnout, which manifests itself in the growth of its concentration at the combustion chamber outlet. Under conditions of intensive steam dilution, the formation of NO_x emissions is determined not only by the thermal mechanism, but also by complex pathways of nitrogen conversion from ammonia through intermediate radical compounds, which causes an increase in the share of N_2O and NO_2 in total emissions. The results obtained may be useful in the design of promising combustion chambers of gas turbine plants as part of hybrid energy systems.

Key words: gas turbine engine; combustion chamber; ammonia; hydrogen; hybrid energy systems.

Анотація. Робота спрямована на дослідження характеристик камери згоряння газотурбінного двигуна з впорскуванням водяної пари, яка працює на суміші аміаку і водню. Подібні двигуни є перспективними з точки зору проектування і використання декарбонізованих гібридних енергетичних систем без викидів вуглецю. Метою роботи є тривимірні дослідження енергетичних і емісійних характеристик камери згоряння з впорскуванням водяної пари, що працює на суміші аміаку і водню. В якості об'єкта дослідження вибрано робочі процеси камери згоряння суднового газотурбінного двигуна потужністю 32 МВт. Для знаходження параметрів паливоспалюючого пристрою застосовано метод обчислювальної гідродинаміки (CFD), який розв'язує систему диференціальних рівнянь збереження маси, енергії та перенесення хімічних компонентів в багатокомпонентній реагуючій турбулентній системі. В розрахунках використано детальну кінетичну схему горіння аміаку і водню, яка налічує 203 хімічні реакції з 31 хімічним компонентом. В результаті тривимірного моделювання отримано нові дані про процеси поширення полум'я аміаку і водню в сильно закручених потоках та умовах стадійного підведення повітря та водяної пари по перерізах жарової труби, а також отримано основні енергетичні і екологічні характеристики такого паливоспалюючого пристрою. Дослідження засвідчують, що стійке функціонування камери згоряння при подаванні водяної пари забезпечується винятково за умови додавання щонайменше 30 % водню до складу палива. Це пояснюється прискоренням хімічних перетворень і зростанням чисельності активних радикалів у області горіння. Виявлено, що підвищення концентрації пари в основній зоні спалювання спричиняє падіння температури та суттєве зниження ефективності вигорання аміаку, наслідком чого є збільшення його залишкового вмісту у продуктах згоряння на випуску. За значного розбавлення паливної суміші парою процес утворення оксидів азоту визначається не лише термічним механізмом, а й складними ланцюгами перетворення азоту, що надходить з аміаком, через утворення проміжних радикальних часток. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні перспективних камер згоряння газотурбінних установок в складі гібридних енергетичних систем.

Ключові слова: газотурбінний двигун; камера згоряння; аміак; водень; гібридні енергетичні системи.

References

- [1] 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. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.944315>
- [2] 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.
- [3] 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. <https://doi.org/10.3390/en14185604>
- [4] Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W.I.F., & Bowen, P.J. (2018) Ammonia for Power: A Literature Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, pp. 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>

- [5] 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, no. 1, 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.084>
- [6] Li, J., Lai, S., Chen, D., Wu, R., Kobayashi, N., Deng, L., & Huang, H. (2021) A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel. *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, 760356. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.760356>
- [7] 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, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2648/1/012009>
- [8] Vega, L.J., & O'Connell, A. (2024) Investigation of Ammonia for Combustion Turbines (IACT), GTI Energy. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review24/fe011_oconnell_2024_oe0995a72-c4cf-4d72-aabb-d504342b9a48.pdf?sfvrsn=229f6daa_3.
- [9] Serbin, S., Burunsuz, K., Dzida, M., Kowalski, J., & Chen, D. (2022) Investigation of ecological parameters of a gas turbine combustion chamber with steam injection for the floating production, storage, and offloading vessel. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 873–888. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00433-w>
- [10] Rocha, R.C., Costa, M., & Bai, X.S. (2021) Combustion and emission characteristics of ammonia under conditions relevant to modern gas turbines. *Combust. Sci. Technol.*, vol. 193, no. 14, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.1977023>
- [11] Jójka, J., & Ślęfarski, J. (2021) Emission Characteristics for Swirl Methane–Air Premixed Flames with Ammonia addition. *Energies*, vol. 14, no. 662, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/en14030662>
- [12] Li, J., Huang, H., Kobayashi, N., He, Z., & Nagai, Y. (2014) Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NO_x formation. *Int. J. Energy Res.* vol. 38, pp. 214–223. <https://doi.org/10.1002/er.3141>
- [13] Okafor, E.C., Naito, Y., Colson, S., Ichikawa, A., Kudo, T., Hayakawa, A., & Kobayashi, H. (2020). Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄–NH₃–air premixed flames. *Combustion and Flame*, vol. 212, pp. 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.034>
- [14] Khateeb, A.A., Guiberti, T.F., Zhu, X., Younes, M., Jamal, A., & Roberts, W.L. (2020). Stability limits and exhaust NO performances of ammonia-methane-air swirl flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 114, 110058. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110058>
- [15] Azimov, U., & Tomita, E. (2021). Combustion Characteristics of Ammonia and Ammonia/Hydrogen Mixtures in a Constant Volume Combustion Chamber. *Energies*, vol. 14, no. 18, 5785. <https://doi.org/10.3390/en14185785>
- [16] Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kobayashi, H., & Hayakawa, A. (2019). Performances and emission characteristics of NH₃–air and NH₃–CH₄–air combustion gas-turbine power generations. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 4597–4605. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.083>
- [17] Somarathne, K.D., Hatakeyama, S., Hayakawa, A., & Kobayashi, H. (2019). Numerical study of a low emission gas turbine like combustor for turbulent ammonia/air premixed swirl flames with a secondary air injection. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 14, pp. 7638–7647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.183>
- [18] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.041>
- [19] Mashruk, S., Xiao, H., & Valera-Medina, A. (2021). Rich-Quench-Lean model comparison for the clean combustion of ammonia-hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 61, pp. 31302–31318. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.010>
- [20] Mitsubishi Power, Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system.
- [21] Romanovskyi, H. F., Serbin, S. I., & Patlaichuk, V. M. (2005). Suchasni hazoturbinni ahrehaty [Modern gas turbine units]. NUK.

- [22] Movchan, S.N., Romanov, V.V., Chobenko, V.N., & Shevtsov, A.P. (2009) Contact steam-and-gas turbine units of the aquarius type the present status & future prospects. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 4, pp. 703–709. <https://doi.org/10.1115/GT2009-59536>
- [23] Serbin, S.I., Matveev, I.B., & Mostipanencko, G.B. (2015) Plasma-Assisted Reforming of Natural Gas for GTL: Part II – Modeling of the Methane-Oxygen Reformer. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43(12), pp. 3964–3968. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2438174>
- [24] Serbin, S.I., Kozlovskiy, A.V., & Burunsuz, K.S. (2016) Investigations of non-stationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44(12), pp. 2960–2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2607461>
- [25] Magnussen, B.F., & Hjertager, B.H. (1977) On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In 16th Symp. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, vol. 16(1), pp. 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [26] Bertolino, A., Fürst, M., Stagni, A., Frassoldati, A., Pelucchi, M., Cavallotti, C., Faravelli, T., & Parente, A. (2021) An evolutionary, data-driven approach for mechanism optimization: theory and application to ammonia combustion, *Combustion and Flame*, vol. 229, 111366. <https://doi.org/10.1016/j.combust-flame.2021.02.012>
- [27] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). ANSYS, Inc., pp. 1-780.
- [28] Matveev, I.B., & Serbin, S.I. (2024) Plasma-Assisted Ammonia Combustion – Part 3: Combustion of Ammonia in Air. *IEEE Trans Plasma Sci.* vol. 52, no. 4, pp. 1157–1161. <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3343389>

Постановка задачі. Аміак розглядається як одна з ключових альтернатив традиційним вуглецевим паливам для газотурбінних установок, зокрема в судновій енергетиці, що відповідає світовим трендам декарбонізації [1, 2]. Його розгляд як палива майбутнього є частиною стратегії «зеленого» водневого господарства, оскільки аміак слугує ефективним носієм для водню. Проте його фізико-хімічні властивості створюють серйозні технічні виклики [3-5]:

1. Низька швидкість полум'я та вузькі межі займання потребують радикальної модифікації класичних схем горіння для запобігання пульсаціям та згасанню, особливо в режимах низького навантаження.

2. Паливо, яке не містить вуглецю, через високий вміст зв'язаного азоту стає потенційним джерелом потужних викидів оксидів азоту, що вимагає інноваційних методів їх пригнічення без втрати ефективності.

3. Витоки незгорілого NH_3 небезпечні для персоналу та навколишнього середовища. Крім того, аміак може спричиняти крекінг міді та її сплавів і корозію деяких сталей, що обмежує вибір матеріалів для паливної системи.

Для нівелювання цих недоліків пропонуються різні підходи, такі як [4, 5]:

1. Використання композитних паливних сумішей шляхом додавання в аміак водню чи природного газу для покращення енергетичних характеристик та стабілізації процесу горіння. Домішка водню не лише підвищує реактивність суміші, але й дозволяє використовувати механізм горіння, спрямований на зменшення NO_x через утворення проміжних радикалів.

2. Впровадження двостадійного (багатофазного) горіння за принципом «багата-бідна» суміш для контролю утворення NO_x .

3. Поряд із двостадійним горінням перспективним є використання ефектів мікрозмішування (micro-mixing) та помірної інтенсифікації вихорів (MILD), які за рахунок однорідного розподілу температури пригнічують утворення NO_x .

4. Перспективні дослідження зосереджені на каталітичних попередніх реакторах для часткового розкладання NH_3 на H_2 та використанні плазмових розрядів для активного управління хімією полум'я.

Економічну привабливість аміаку зумовлює не лише відсутність прямих викидів CO_2 , а й зріла глобальна інфраструктура для його виробництва, зберігання та морських перевезень, що робить його практичним кандидатом для швидкої декарбонізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтенсивність досліджень останніх років свідчить про перехід від концептуального обґрунтування використання аміаку до фази технологічного інжинірингу [6-8]. Крім вивчення чистих процесів горіння NH_3 , значну увагу приділяється його інтеграції в гібридні та комбіновані цикли. Зокрема, перспективним напрямом є впровадження циклів із впорскуванням пари (STIG, Cheng cycle), що генерується за рахунок утилізації відхідного тепла [9]. Ця технологія дозволяє одночасно вирішити кілька завдань: підвищити питому потужність, покращити регульовальні характеристики суднового двигуна та знизити температуру полум'я.

Ключовим є те, що водяна пара виступає не лише робочим тілом, а й активним термохімічним агентом. Вона бере участь в реакціях парового риформінгу аміаку прямо в зоні горіння, сприяючи утворенню водню, що в ряді випадків може покращати стабільність полум'я. Оптимальне дозування пари дозволяє зсунути хімічну рівновагу в зоні реакції, мінімізуючи викиди як NO_x (за рахунок зниження пікової температури), так і негорілого аміаку (за рахунок інтенсифікації процесів окиснення).

Однак, гетерогенність процесу при введенні третього агента (пари) створює новий клас проблем:

1. Надмірне зниження температури полум'я при великій кількості пари, що веде до неповного окиснення палива та зростання викидів незгорілого аміаку та гідразину (N_2H_4).

2. Система керування має динамічно балансувати три незалежні потоки (паливо, повітря, пара) при змінних навантаженнях, що потребує нових алгоритмів.

3. Ризик недостатньої якості змішування, що призводить до формування локальних гарячих/холодних зон і неефективного контролю емісій.

4. Підвищена корозійна активність середовища (в суміші високотемпературних газів та пари), що вимагає використання спеціальних стійких матеріалів.

5. Можливість утворення вторинних шкідливих сполук, таких як закис азоту N_2O

або гідроксид амонію NH_4OH , за умов низькотемпературного чи неповного горіння.

6. Розбавлення паливно-повітряної суміші парою знижує швидкість розповсюдження полум'я, знижує стабільність та підвищує чутливість до згасання в нестационарних режимах.

Для рішення цієї проблеми можуть бути використані добавки палив з високою теплотворною спроможністю, наприклад, водню або природного газу до паливо-повітряної суміші [10-12].

Робота [13] досліджує ламінарну швидкість горіння преміксованих полум'їв сумішей CH_4 - NH_3 -повітря. Результати показують, як домішка аміаку впливає на кінетику горіння метану, що є критично важливим для розуміння поведінки гібридних палив ($\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{CH}_4$) та оптимізації процесу їх спалювання в камерах згоряння ГТД. Дослідження [14] присвячене практичній стороні застосування аміаку в реальних камерах згоряння. Автори аналізують межі стійкості та викиди NO_x закручених полум'їв сумішей аміак-метан-повітря. Робота дає дані про те, як домішка аміаку впливає на стабільність факела та екологічні характеристики в умовах, близьких до газотурбінних.

У статті [15] досліджується горіння чистого аміаку та його сумішей з воднем у камері згоряння постійного об'єму. Автори аналізують тиск, швидкість вигорання та емісійні характеристики. Робота показує, що додавання водню суттєво покращує реактивність аміаку, що є ключовим для застосування в ГТД. Дослідження [16] демонструє роботу реальної газотурбінної установки на аміаку та суміші аміак-метан. Автори наводять експериментальні дані щодо ефективності, стабільності роботи та, що найважливіше, викидів NO_x .

Стаття [17] присвячена числовому моделюванню роботи камери згоряння, схожої на газотурбінну, на преміксованій суміші аміак/повітря. Автори досліджують вплив конструкції камери (закрутка потоку, впорскування вторинного повітря) на стабільність полум'я та утворення NO_x . Результати показують шляхи до проектування оптимізованих камер згоряння під аміак. Робота [18]

зосереджена на стратегії горіння багатой суміші (rich-lean) для аміаку та водню. Експерименти на закрученому полум'ї показують, як можна досягти стабільного горіння та контролювати викиди NO_x за рахунок керування стадійністю процесу. Дослідження [19] детально порівнює різні варіанти концепції двостадійного горіння (Rich-Quench-Lean) для сумішей аміаку та водню за допомогою числового моделювання. Автори оцінюють вплив різних параметрів (співвідношення палива, ступінь розбавлення) на утворення оксидів азоту та незгорілого аміаку, пропонуючи рекомендації для оптимізації процесу в ГТД.

Таким чином, незважаючи на великий потенціал, широкомасштабне використання аміаку в суднових енергоустановках потребує поглиблених досліджень для подолання цих бар'єрів та забезпечення надійності та безпеки [13].

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на активні дослідження, залишаються недостатньо вивченими питання синергетичного впливу суміші NH_3/H_2 із одночасним впорскуванням перегрітої пари на структуру турбулентного реакційного потоку, механізми генерації/пригнічення забруднювачів та динамічну стійкість полум'я в реальній камері згоряння суднового ГТД. Не вистачає експериментально підтверджених даних для валідації складних кінетичних моделей, що описують такі багатокомпонентні процеси.

Метою роботи є тривимірні дослідження енергетичних і емісійних характеристик камери згоряння з впорскуванням водяної пари, що працює на суміші аміаку і водню.

В якості **об'єкта дослідження** вибрано робочі процеси в камері згоряння суднового газотурбінного двигуна потужністю 32 МВт, що працює на суміші аміаку і водню.

Предмет дослідження – закономірності сумісного вигорання аміаку і водню в камері згоряння газотурбінного двигуна.

Виклад основного матеріалу. Під час створення перспективних енергетичних установок на базі суднових газотурбінних двигунів, що використовують безвуглецеві

види палива, значну увагу було приділено застосуванню складних термодинамічних циклів типу STIG (Steam Injected Gas Turbine), які забезпечують поглиблену утилізацію теплоти відпрацьованих газів [21]. Аналогічно когенераційним системам, теплова енергія вихлопних газів двигуна використовується для генерації пари в утилізаційному парогенераторі. Проте, на відміну від традиційних схем, отримана пара не застосовується як теплоносіє, а безпосередньо подається в камеру згоряння та далі в проточну частину турбіни, виконуючи функцію додаткового робочого тіла та сприяючи зростанню механічної потужності установки.

З метою підвищення ефективності процесів горіння за умов упорскування водяної пари була запропонована спеціальна конструктивна схема паливоспалюючого пристрою [22], у якій передбачено розподіл пари на два функціонально різні потоки – екологічний та енергетичний. Такий підхід дозволяє одночасно оптимізувати екологічні показники та енергетичну ефективність роботи камери згоряння.

Камера згоряння виконана за протиточною трубчасто-кільцевою схемою (рис. 1). Підведення повітря після компресора високого тиску здійснюється через спеціальний дифузор 7, після чого повітря розподіляється в кільцевому просторі між внутрішнім та зовнішнім корпусами, обмеженому жаровими трубами 4. Через систему отворів у жаровій трубі 3-6 повітря поетапно подається в первинну та вторинну зони горіння, а також використовується для плівкового охолодження її стінок.

Паливо, що являє собою суміш аміаку та водню 2, разом з екологічною парою 1 надходить у камеру згоряння через пальник, тоді як енергетична пара подається окремим трубопроводом 9. Надалі ця пара через систему отворів вводиться всередину жарової труби, де інтенсивно змішується з продуктами згоряння, сформованими в первинній зоні. Після додаткового підведення вторинного повітря суміш продуктів згоряння і пари 8 спрямовується в турбінну частину газотурбінного двигуна.

У межах створення низьковуглецевих суднових енергетичних установок запропоновано відмовитися від традиційного використання природного газу в стаціонарних системах і реалізувати подачу через палинковий вузол альтернативного палива – суміші аміаку з воднем. Додавання водню спрямоване на підвищення хімічної активності пального та покращення стійкості робочого процесу.

Слід зазначити, що процес горіння в розглянутій камері реалізується за дифузійним механізмом, тобто без попереднього приготування паливно-повітряної суміші. Такий підхід забезпечує надійне й стабільне згоряння різних видів палива в широкому інтервалі навантажень. Водночас дифузійне спалювання традиційно супроводжується підвищенням утворенням оксидів азоту. Зазначений недолік істотно компенсується шляхом впорскування екологічної пари безпосередньо в зону інтенсивного горіння всередині жарової труби, що сприяє зниженню температурних піків і, відповідно, рівня NO_x .

Для дослідження процесів горіння в камері згоряння, що функціонує на паливній суміші аміаку з воднем, побудовано математичну модель хімічно активних газодинамічних потоків. Модель базується на фундаментальних рівняннях збереження маси,

імпульсу та енергії, а також на рівняннях переносу окремих хімічних компонентів багатоконпонентної суміші [23–25].

Рівняння балансу маси описує виконання умови нерозривності потоку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m. \quad (1)$$

Рух та енергетичний стан середовища визначаються рівняннями збереження кількості руху і повної енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}_{st}) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_h. \quad (3)$$

Для кожного хімічного компонента суміші додатково розв'язуються рівняння переносу маси, які враховують процеси дифузії та хімічного перетворення:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i. \quad (4)$$

В наведених рівняннях ρ – масова густина газового середовища; $\vec{v}$ – вектор швидкості потоку; S_m – джерельний член, що характеризує придбання або відтік маси; p – статичний тиск; $\rho \vec{g}$ – гравітаційна сила; $\vec{F}$ – вектор зовнішніх сил; $\vec{\tau}$ – тензор напружень; E – питома внутрішня енергія; Y_i – масова концентрація компонента i ; $\vec{J}_q$ – вектор теплового потоку суміші;

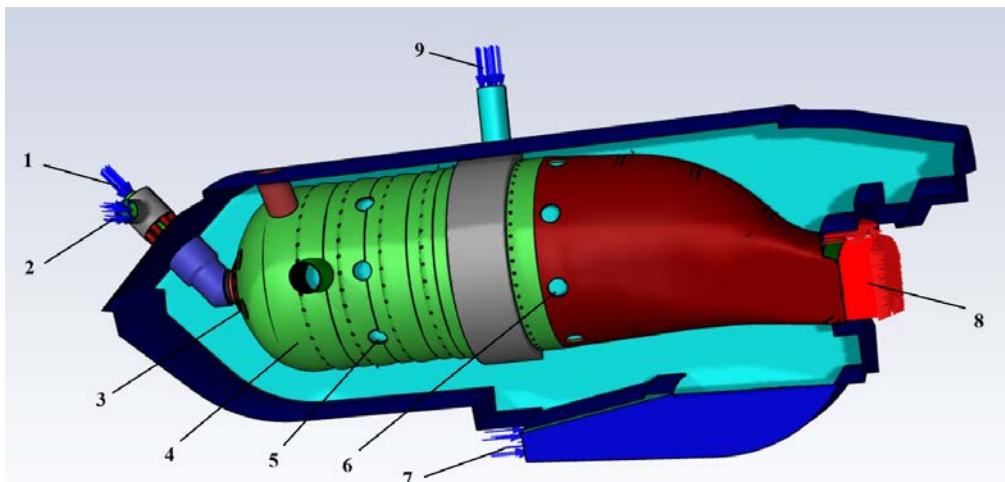


Рис. 1. Схема камери згоряння з впорскуванням пари: 1 – підведення екологічної пари; 2 – підведення палива (суміш аміаку і водню); 3 – фронтний пристрій з лопатковим завихрювачем; 4 – жарова труба; 5 – підведення первинного повітря; 6 – підведення вторинного повітря; 7 – підведення повітря в дифузор камери після компресора високого тиску; 8 – вихід продуктів згоряння; 9 – підведення енергетичної пари

$\bar{J}_j$ – вектор дифузійного потоку j -го компонента суміші; S_h – джерельний член тепловиділення внаслідок хімічної реакції; S_i – додаткове утворення i -го компонента з дисперсної фази або зовнішніх жерел; $\bar{J}_i$ – масова дифузія i -го компонента; R_i – швидкість утворення i -го компонента внаслідок хімічної реакції.

Для числового моделювання процесів згоряння аміачно-водневої суміші в камері згоряння газотурбінного двигуна застосовано модель Eddy Dissipation Concept (EDC), яка є розширенням класичної моделі турбулентного вихорового розпаду та поєднує опис турбулентності з детальним урахуванням хімічної кінетики [25].

У межах EDC-підходу вважається, що хімічні реакції відбуваються у локалізованих дрібномасштабних турбулентних структурах, які інтерпретуються як мікрореактори. Характерний лінійний розмір таких структур і характерний час перебігу реакцій у них визначаються співвідношеннями:

$$\left(\frac{v\varepsilon}{k}\right)^{3/4}; \quad C_\xi = 2,1377; \quad \tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{1/2}; \quad C_\tau = 0,4082, \quad (5)$$

де індекс $*$ вказує на дрібномасштабність турбулентного утворення; $C_\xi = 2.1377$ – емпірична константа. Значення характерного масштабу ξ^* залежать від кінематичної в'язкості середовища, турбулентної кінетичної енергії k та швидкості її дисипації ε .

У межах запропонованого підходу моделювання хімічних перетворень здійснюється із застосуванням реакторів із фіксованим тиском. Початковий стан кожного з них задається температурою середовища та масовими частками реагуючих компонентів на вході.

Кінетика елементарних реакцій описується залежностями типу Ареніуса, а числове інтегрування системи жорстких рівнянь хімічної кінетики виконується з використанням алгоритму ISAT. За цих умов миттєва молярна швидкість утворення або споживання i -го хімічного компонента визначається співвідношенням:

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i), \quad (6)$$

де Y_i^* – масова частка i -го реагенту об'ємі реактора після завершення характерного часу перебігу реакції τ^* .

Характерний час хімічних перетворень у дрібномасштабному реакторі визначається виразом:

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

де $C_\tau = 0,4082$ – емпірична константа часу.

Під час числових експериментів використовуються набори констант швидкостей елементарних реакцій механізму окиснення аміаку, підібрані таким чином, щоб забезпечити прийнятну узгодженість результатів моделювання з наявними експериментальними даними.

Для аналізу кінетичних характеристик процесу горіння суміші аміаку і водню в повітряному середовищі застосовано механізм [26], Загалом використана кінетична модель включає 203 елементарних реакцій за участю 31 хімічного компонента: NH_3 , O_2 , H_2O , H_2 , H , O , OH , H_2O_2 , HO_2 , NO , N_2O , NO_2 , HNO , HNO_2 , HONO , HONO_2 , N_2H_2 , H_2NN , NH_2OH , HN OH , N_2H_4 , N , NO_3 , NH , NNH , NH_2 , H_2NO , N_2H_3 , Ar , N_2 , He .

Обговорення результатів. З метою аналізу особливостей перебігу робочого процесу в камері згоряння суднового газотурбінного двигуна потужністю 32 МВт з впорскуванням водяної пари, що працює на суміші аміаку і водню, виконано числові дослідження з використанням обчислювального комплексу ANSYS Fluent [27]. Моделювання дозволило детально відтворити структуру течії, розподіли температури та концентрацій хімічних компонентів у характерних зонах паливоспалюючого пристрою, а також оцінити вплив парового впорскування на стабільність горіння та емісійні характеристики.

Попередні результати розрахунків свідчать, що у разі подачі чистого аміаку через паливковий пристрій після локального запалювання палива в області фронтового пристрою полум'я не поширюється в об'ємі камери згоряння, а його стабілізація не забезпечується навіть за умов інтенсивного закручування первинного повітря. Це зумовлено низькою реакційною здатністю

аміаку, обмеженою швидкістю поширення полум'я та значними втратами теплоти на нагрів інертних компонентів суміші.

У розглянутих режимах додаткове підведення екологічної водяної пари через фронтний пристрій призводить до подальшого зниження температури в зоні горіння, що спричиняє пригнічення хімічних реакцій окиснення і, як наслідок, згасання полум'я. Отримані результати вказують на необхідність використання активуючих добавок, зокрема водню, а також оптимізації схеми підведення пари з метою збереження термохімічних умов, достатніх для стабільного горіння аміако-водневої суміші.

Отримані попередні результати числового моделювання свідчать, що використання чистого аміаку як пального в досліджуваній камері згоряння за наявності впорскування водяної пари не забезпечує формування стабільного факела горіння в широкому діапазоні режимів роботи. Це обумовлює необхідність модифікації паливної суміші з метою підвищення її реакційної здатності та розширення меж стійкого горіння.

У цьому контексті доцільним є введення водню як активуючої добавки до аміаку. Водень, характеризуючись низькою енергією активації, високою швидкістю хімічних реакцій і значною швидкістю поширення полум'я, сприяє інтенсифікації процесів запалювання та стабілізації горіння в зоні первинного горіння. Крім того, присутність водню підвищує локальні температури та концентрації активних радикалів (H, OH), що компенсує охолоджувальний вплив водяної пари та забезпечує підтримання безперервного процесу окиснення аміаку в об'ємі камери згоряння.

Нижче наведено результати числового моделювання робочого процесу камери згоряння газотурбінного двигуна при використанні паливної суміші, що містить 30% водню за об'ємом. Як показали попередні дослідження, за меншої частки водню стабілізація полум'я в розглянутій камері згоряння не досягається навіть за умов інтенсивного закручування потоку, що зумовлює вибір саме цього складу палива для подальшого аналізу.

Розрахунки виконано для однієї жарової труби при таких початкових параметрах: витрата повітря 2,318 кг/с, температура повітря після компресора 785 К; витрата паливної суміші через пальник 0,17 кг/с при об'ємному вмісті аміаку 70% і водню 30%, температура палива 300 К; сумарна витрата екологічної та енергетичної пари 0,6911 кг/с при температурі перегрітої пари 743 К; тиск у камері згоряння 2,634 МПа. Просторова дискретизація розрахункової області здійснювалася за допомогою кінцево-різницевої сітки, що складалася з приблизно 3,8 млн тетраедральних комірок, що забезпечує достатню роздільну здатність для аналізу термохімічних процесів.

У роботі розглянуто два варіанти розподілу екологічної та енергетичної пари: 1) відношення витрат 0,01/0,6811 кг/с (0,015); 2) відношення витрат 0,1/0,5911 кг/с (0,17).

На рис. 2 наведено температурні поля в характерних перерізах камери згоряння для обох варіантів.

Аналіз отриманих результатів показує, що для першого варіанта (0,015) спостерігається дещо вищий рівень максимальної температури в зоні первинного горіння поблизу фронтального пристрою. Це пояснюється зменшенням кількості екологічної пари, яка безпосередньо подається в область формування факела, і, відповідно, зниженням інтенсивності теплового розбавлення та охолодження реакційної зони. Підвищення локальної температури сприяє інтенсифікації початкових стадій окиснення аміаку та водню.

Важливим критерієм ефективності робочого процесу є повнота вигорання аміаку в об'ємі камери згоряння. Навіть за наявності водню як хімічно активної добавки, інтенсивне впорскування пари може призводити до зниження температури та концентрації активних радикалів, що негативно впливає на швидкість реакцій розкладання та окиснення NH_3 . На рис. 3 наведено розподіли масових часток аміаку для обох варіантів розподілу пари.

Порівняльний аналіз показує, що у випадку другого варіанта (0,17) вигорання

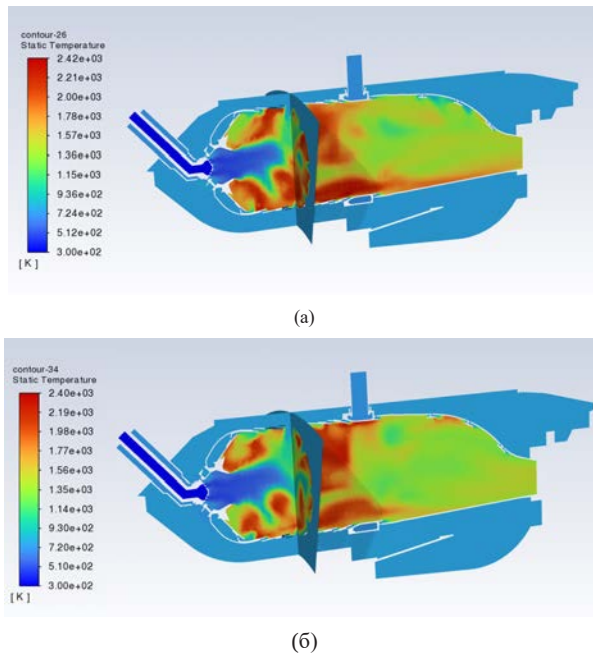


Рис. 2. Контури температури (К) в перерізах камери згоряння, що працює на суміші аміаку і водню, при відношеннях витрат екологічної і енергетичної пари 0,015 (а) та 0,17 (б)

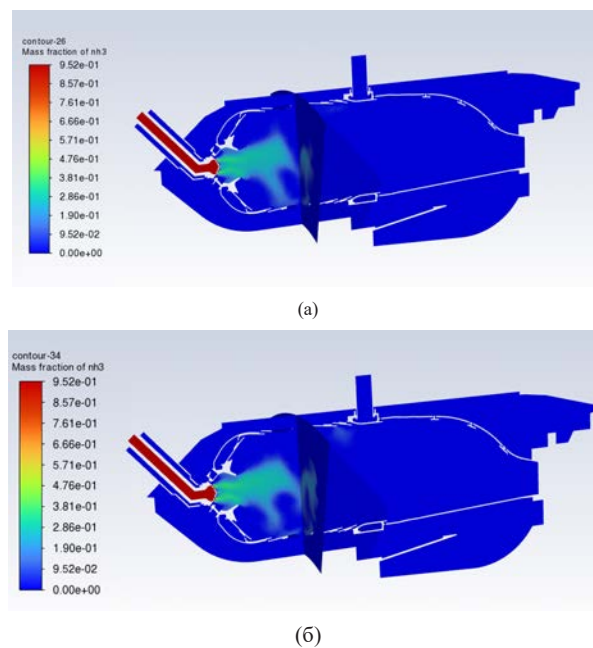


Рис. 3. Контури масових часток NH_3 при відношеннях витрат екологічної і енергетичної пари 0,015 (а) та 0,17 (б)

аміаку відбувається істотно повільніше. Це підтверджується значеннями об'ємної концентрації NH_3 на виході камери згоряння, які становлять 582 ppm, тоді як для першого варіанта цей показник зменшується до 198 ppm. Отримані результати свідчать про те, що надмірна подача екологічної пари в зону основного горіння суттєво знижує

ефективність окиснення аміаку, незважаючи на присутність водню.

Для підвищення повноти вигорання аміаку в таких умовах доцільно розглядати комплекс заходів, зокрема збільшення інтенсивності закрутки повітряного потоку в лопатковому завихрювачі, оптимізацію розподілу повітря між первинною та вторинною зонами жарової труби з метою підвищення температури у фронтів області, а також застосування методів хімічної активації горіння, зокрема плазових технологій [28].

На рис. 4 показані контури основних оксидів азоту, які утворюються при сумісному спалюванні суміші аміаку і водню в камері згоряння ГТД з впорскуванням водяної пари при відношенні витрат екологічної і енергетичної пари 0,015.

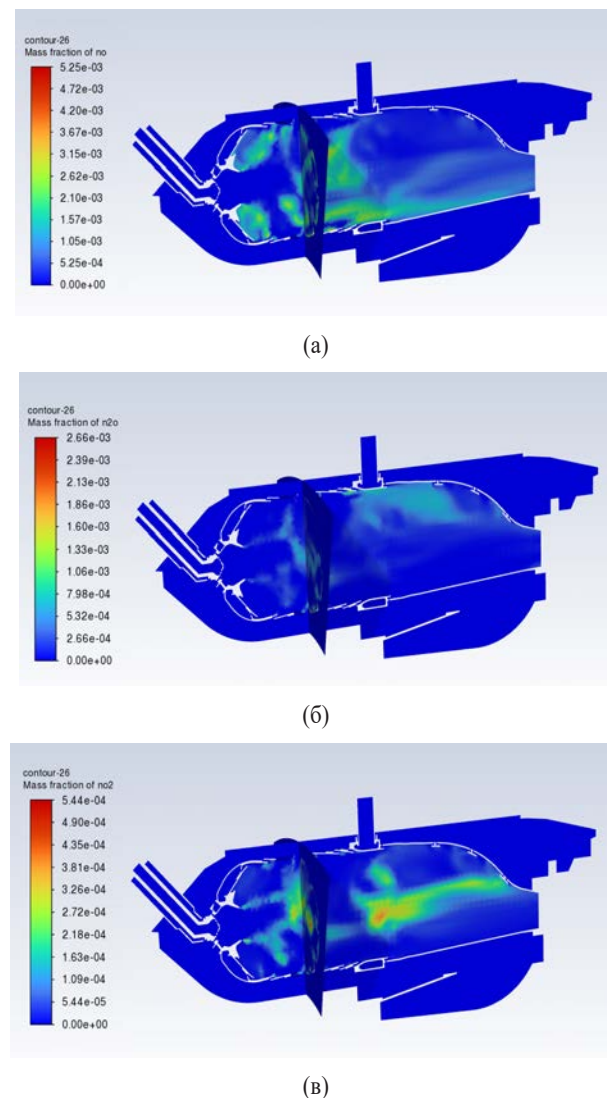


Рис. 4. Контури масових часток NO (а), N_2O (б) та NO_2 (в) при відношенні витрат екологічної і енергетичної пари 0,015

Як видно з результатів, домінуючим компонентом у складі NO_x є оксид азоту NO , що традиційно пов'язано з термічним механізмом його утворення. Водночас за розглянутих умов значну частку в сумарних викидах становить також N_2O , що вказує на активну участь «паливних» механізмів, характерних для азотовмісних палив. Оксид NO_2 утворюється переважно в периферійних та вихідних зонах жарової труби за умов знижених температур і надлишку кисню. Об'ємні концентрації NO , N_2O та NO_2 на виході камери згоряння становлять відповідно 472, 180 та 17 ppm.

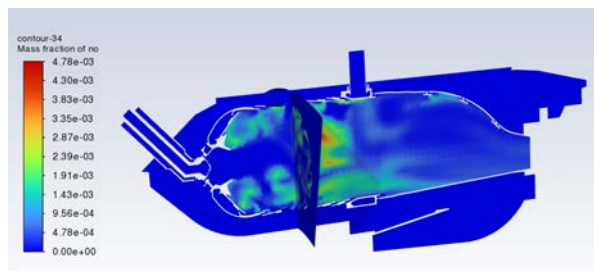
На рис. 5 показані контури основних оксидів азоту, які утворюються при сумісному спалюванні суміші аміаку і водню в камері згоряння ГТД з впорскуванням водяної пари при відношенні витрат екологічної і енергетичної пари 0,17.

Для другого варіанта збільшення подачі екологічної пари не приводить до очікуваного зниження концентрацій оксидів азоту. Навпаки, спостерігається зростання вмісту N_2O та NO_2 , тоді як концентрація NO залишається на близькому рівні. Сумарні концентрації NO , N_2O та NO_2 на виході камери згоряння складають 450, 263 та 39 ppm відповідно. Це свідчить про те, що за інтенсивного парового розбавлення роль класичного термічного механізму Зельдовича зменшується, а визначальний вплив на утворення NO_x починають відігравати складні шляхи трансформації азоту, що входить до складу аміаку, через проміжні нестабільні радикали NH_2 , NH та HNO .

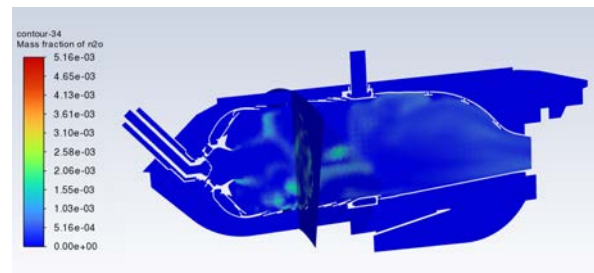
Висновки. Проведене числове дослідження робочого процесу в камері згоряння суднового газотурбінного двигуна з впорскуванням водяної пари, що працює на суміші аміаку і водню, дозволяє сформулювати такі основні висновки:

1. Для аналізу процесів горіння в камері згоряння ГТД потужністю 32 МВт застосовано тривимірну математичну модель хімічно реагуючих турбулентних потоків, засновану на розв'язанні рівнянь збереження маси, імпульсу, енергії та перенесення хімічних компонентів.

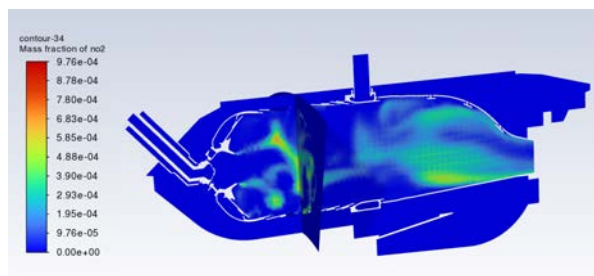
2. Моделювання виконано з використанням детальної кінетичної схеми окис-



(a)



(б)



(в)

Рис. 5. Контури масових часток NO (а), N_2O (б) та NO_2 (в) при відношенні витрат екологічної і енергетичної пари 0,17

нення суміші аміаку і водню, яка включає 203 елементарні реакції за участю 31 хімічного компонента, що забезпечує коректний опис як термічних, так і паливних механізмів утворення оксидів азоту.

3. Показано, що стабільна робота камери згоряння за умов впорскування водяної пари досягається лише за введення не менше 30% водню до паливної суміші, що пов'язано з інтенсифікацією хімічних реакцій та підвищенням концентрації активних радикалів у зоні горіння.

4. Встановлено, що збільшення частки екологічної пари в первинній зоні горіння призводить до зниження температурного рівня та істотного погіршення повноти вигорання аміаку, що проявляється у зростанні його концентрації на виході камери згоряння.

5. Показано, що в умовах інтенсивного парового розбавлення формування викидів NO_x визначається не лише термічним механізмом, але й складними шляхами пере-

творення азоту з аміаку через проміжні радикальні сполуки, що зумовлює зростання частки N_2O та NO_2 у сумарних викидах.

6. Отримані результати свідчать про необхідність подальших оптимізаційних досліджень конструкції камери згоряння, зо-

крема розподілу повітря і пари, параметрів закрутки потоку та методів хімічної активації горіння, а також експериментальної верифікації числових результатів з метою зниження викидів оксидів азоту та підвищення стабільності робочого процесу.

Список літератури

- [1] 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. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.944315>
- [2] 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.
- [3] 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. <https://doi.org/10.3390/en14185604>
- [4] Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W.I.F., Bowen, P.J. (2018) Ammonia for Power: A Literature Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, pp. 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- [5] 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, no. 1, 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.084>
- [6] Li, J., Lai, S., Chen, D., Wu, R., Kobayashi, N., Deng, L., Huang, H. (2021) A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel. *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, 760356. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.760356>
- [7] 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, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2648/1/012009>
- [8] Vega, L.J., O'Connell, A. (2024) Investigation of Ammonia for Combustion Turbines (IACT), GTI Energy. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review24/fe011_oconnell_2024_oe0995a72-c4cf-4d72-aabb-d504342b9a48.pdf?sfvrsn=229f6daa_3.
- [9] Serbin, S., Burunsuz, K., Dzida, M., Kowalski, J., Chen, D. (2022) Investigation of ecological parameters of a gas turbine combustion chamber with steam injection for the floating production, storage, and offloading vessel. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 873–888. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00433-w>
- [10] Rocha, R.C., Costa, M., Bai, X.S. (2021) Combustion and emission characteristics of ammonia under conditions relevant to modern gas turbines. *Combust. Sci. Technol.*, vol. 193, no. 14, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.1977023>
- [11] Jójka, J., Ślefarski, J. (2021) Emission Characteristics for Swirl Methane–Air Premixed Flames with Ammonia addition. *Energies*, vol. 14, no. 662, pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/en14030662>
- [12] Li, J., Huang, H., Kobayashi, N., He, Z., Nagai, Y. (2014) Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NO_x formation. *Int. J. Energy Res.* vol. 38, pp. 214–1223. <https://doi.org/10.1002/er.3141>
- [13] Okafor, E.C., Naito, Y., Colson, S., Ichikawa, A., Kudo, T., Hayakawa, A., Kobayashi, H. (2020). Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH_4 – NH_3 –air premixed flames. *Combustion and Flame*, vol. 212, pp. 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.034>
- [14] Khateeb, A.A., Guiberti, T.F., Zhu, X., Younes, M., Jamal, A., Roberts, W.L. (2020). Stability limits and exhaust NO performances of ammonia-methane-air swirl flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 114, 110058. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110058>

- [15] Azimov, U., Tomita, E. (2021). Combustion Characteristics of Ammonia and Ammonia/Hydrogen Mixtures in a Constant Volume Combustion Chamber. *Energies*, vol. 14, no. 18, 5785. <https://doi.org/10.3390/en14185785>
- [16] Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kobayashi, H., Hayakawa, A. (2019). Performances and emission characteristics of NH_3 -air and NH_3 - CH_4 -air combustion gas-turbine power generations. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 4, pp. 4597–4605. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.083>
- [17] Somarathne, K.D., Hatakeyama, S., Hayakawa, A., Kobayashi, H. (2019). Numerical study of a low emission gas turbine like combustor for turbulent ammonia/air premixed swirl flames with a secondary air injection. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 14, pp. 7638–7647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.183>
- [18] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.041>
- [19] Mashruk, S., Xiao, H., Valera-Medina, A. (2021). Rich-Quench-Lean model comparison for the clean combustion of ammonia-hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 61, pp. 31302–31318. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.010>
- [20] Mitsubishi Power, Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system.
- [21] Романовський, Г.Ф., Сербін, С.І., Патлайчук, В.М. (2005) Сучасні газотурбінні агрегати. Навчальний посібник. Миколаїв : НУК, 344 с.
- [22] Movchan, S.N., Romanov, V.V., Chobenko, V.N., Shevtsov, A.P. (2009) Contact steam-and-gas turbine units of the aquarius type the present status & future prospects. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 4, pp. 703–709. <https://doi.org/10.1115/GT2009-59536>
- [23] Serbin, S.I., Matveev, I.B., Mostipanencko, G.B. (2015) Plasma-Assisted Reforming of Natural Gas for GTL: Part II – Modeling of the Methane-Oxygen Reformer. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43(12), pp. 3964–3968. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2438174>
- [24] Serbin, S.I., Kozlovskyi, A.V., Burunsuz, K.S. (2016) Investigations of non-stationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44(12), pp. 2960–2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2607461>
- [25] Magnussen, B.F., Hjertager, B.H. (1977) On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In 16th Symp. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute, vol. 16(1), pp. 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [26] Bertolino, A., Fürst, M., Stagni, A., Frassoldati, A., Pelucchi, M., Cavallotti, C., Faravelli, T., Parente, A. (2021) An evolutionary, data-driven approach for mechanism optimization: theory and application to ammonia combustion, *Combustion and Flame*, vol. 229, 111366. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.02.012>
- [27] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). ANSYS, Inc., pp. 1–780.
- [28] Matveev, I.B., Serbin, S.I. (2024) Plasma-Assisted Ammonia Combustion – Part 3: Combustion of Ammonia in Air. *IEEE Trans Plasma Sci.* vol. 52, no. 4, pp. 1157–1161. <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3343389>

© Сербін С. І., Чен Дайфен, Личко Б. М., Бурунсуз К. С.

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0