

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.2\(505\).11](https://doi.org/10.15589/znп2026.2(505).11)**THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF THE WORKING PROCESS
OF A GAS TURBINE COMBUSTOR OPERATING ON GASEOUS AMMONIA****ТРИВИМІРНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД,
ЩО ПРАЦЮЄ НА ГАЗОПОДІБНОМУ АМІАКУ****Serhiy I. Serbin**

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Bogdan M. Lychko

bogdan.lychko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3943-9689

Mykola S. Bondarenko

bondarenko.nikola2308@gmail.com

ORCID: 0009-0003-7063-9889

С. І. Сербін,

докт. техн. наук, проф.

Б. М. Личко,

канд. техн. наук, доцент

М. С. Бондаренко,

канд. техн. наук, доцент

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

Abstract. Purpose. Three-dimensional numerical prediction of the energy and environmental performance of a gas turbine engine combustor operating on gaseous ammonia as a carbon-free fuel, utilizing a detailed chemical mechanism of its oxidation. **Method.** The working process was simulated using a continuum mathematical model based on solving the system of differential conservation equations for mass, momentum, and energy for a turbulent chemically reactive flow. The kinetic description of ammonia combustion was implemented using a detailed mechanism comprising 203 elementary reactions involving 31 chemical species. Numerical studies were performed for a combustor pressure of 2.0 MPa. **Results.** New insights were obtained regarding the flame propagation characteristics of ammonia in a high-pressure gas turbine engine combustor, as well as spatial distributions of temperature and concentrations of both stable and intermediate reaction products in characteristic cross-sections of the chamber. The dependencies of key process parameters on the ammonia flow rate supplied to the combustor were established. **Scientific novelty.** For the first time for domestic gas turbine units, a comprehensive three-dimensional analysis of the working process of a pure ammonia-fired combustor has been performed incorporating detailed chemical kinetics, enabling the identification of nitrogen oxide (NO, N₂O, NO₂) formation mechanisms under high-pressure conditions typical of real gas turbine engines. **Practical importance.** The obtained results can be used in the design and optimization of gas turbine engine combustors intended for operation within prospective decarbonized hybrid energy systems. The established patterns indicate the feasibility of further research aimed at reducing emissions of nitrogen-containing compounds by improving aerodynamics, co-firing with hydrogen, injecting water vapor, or using selective catalytic reduction systems.

Key words: gas turbine engine; combustor; decarbonization; ammonia; toxic emissions.

Анотація. Мета. Тривимірне числове прогнозування енергетичних та екологічних показників камери згоряння газотурбінного двигуна (ГТД), що працює на газоподібному аміаку як безвуглецевому паливі, із застосуванням детального хімічного механізму його окиснення. **Методика.** Моделювання робочого процесу виконано на основі континуальної математичної моделі, що базується на розв'язанні системи диференціальних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії для турбулентного хімічно реагуючого потоку. Кінетичний опис горіння аміаку реалізовано з використанням детального механізму, що включає 203 елементарні реакції за участю 31 хімічного компонента. Числові дослідження проведено для тиску в камері згоряння 2,0 МПа. **Результати.** Отримано нові відомості щодо особливостей поширення полум'я аміаку у високофорсованій камері згоряння ГТД, а також просторові розподіли температури й концентрацій стабільних та проміжних продуктів реакцій у характерних перерізах камери. Встановлено залежності ключових параметрів робочого процесу від витрати аміаку, що подається в камеру згоряння. **Наукова новизна.** Уперше для вітчизняних газотурбінних установок виконано комплексний тривимірний аналіз робочого процесу камери згоряння на чистому аміаку з урахуванням детальної хімічної кінетики, що дало змогу виявити механізми утворення оксидів азоту (NO, N₂O, NO₂) в умовах високого тиску, характерного для реальних ГТД. **Практична значимість.** Отримані результати

тати можуть бути використані при проектуванні та оптимізації камер згоряння газотурбінних двигунів, призначених для роботи в складі перспективних декарбонізованих гібридних енергетичних систем. Встановлені закономірності вказують на доцільність подальших досліджень щодо зменшення викидів нітрогеновмісних сполук шляхом удосконалення аеродинаміки, спільного спалювання з воднем, впорскування водяної пари або застосування систем селективного каталітичного очищення.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Глобальний курс на декарбонізацію, закріплений Європейським зеленим договором 2020 року, вимагає кардинального перегляду паливної бази енергетики та транспорту. Це, зокрема, стосується секторів, що традиційно залежали від спалювання вуглеводнів, – стаціонарної енергогенерації та, особливо, судноплавства. У цьому контексті аміак NH_3 все частіше розглядається не просто як альтернативний, а як стратегічний безвуглецевий носій енергії, здатний забезпечити технологічну та економічну життєздатність декарбонізованих систем [1].

Порівняльний аналіз основних безвуглецевих палив (водню та аміаку) виявляє критичні переваги останнього з точки зору практичної реалізації в енергетичних установках на основі газотурбінних двигунів (ГТД). Водень, маючи високу питому енергію, стикається з низкою серйозних технологічних бар'єрів: необхідність зберігання при екстремально низьких температурах (криогенні системи) або високих тисках; ризик водневої крихкості матеріалів; складність управління процесом горіння через широкі межі займистості та високу ймовірність зворотного проскоку полум'я; відсутність глобальної транспортної та бункерувальної інфраструктури. На противагу цьому, аміак володіє унікальним поєднанням властивостей, що роблять його більш «готовим» паливом: наявність добре відпрацьованої світової інфраструктури для виробництва, транспортування та зберігання в рідкому стані при помірних параметрах (-33°C або 8,6 бар); значно вища об'ємна щільність енергії порівняно зі стисненим воднем; відносно низька вибухонебезпечність; можливість прямого використання як у термічних двигунах, так і в паливних елементах після розкладу.

Однак ключовою проблемою, що обмежує широкі впровадження аміаку в ГТД, є фізико-хімічні особливості його горіння в повітряному середовищі. Низька швидкість поширення полум'я, висока температура запалення (понад 650°C) та схильність до утворення значної кількості оксидів азоту роблять стандартні конструкції камер згоряння, оптимізовані під вуглеводні, малопридатними. Тому постає нагальна потреба в розробці нових методів та концепцій організації процесу спалювання аміаку, спрямованих на одночасне забезпечення: стабільного запалення та ефективного згоряння; мінімізації викидів NO_x ; адаптації до робочих діапазонів тисків і температур сучасних ГТД.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних дослідженнях використання аміаку NH_3 як безвуглецевого палива розвивається по двох основних напрямках: його застосування в якості реагенту для високоефективних електрохімічних перетворювачів (твердоокисних паливних елементів – SOFC) та для прямої ко-генерації в газотурбінних двигунах. Останній напрямок, що є основним фокусом даної роботи, зіштовхується з фундаментальними викликами, пов'язаними з низькою швидкістю горіння, високою температурою запалення та схильністю до утворення оксидів азоту NO_x під час спалювання NH_3 у повітряному середовищі [1]. Аналіз останніх публікацій дозволяє виокремити ключові стратегії, що розробляються для подолання цих бар'єрів та ефективної інтеграції аміаку в камери згоряння ГТД.

Однією з найбільш досліджуваних тактик є додавання високореактивних добавок до аміаку, таких як водень H_2 або метан CH_4 . Дослідження [2], присвячене вивченню фронту полум'я в преміксованих сумішах NH_3/CH_4 , показало, що навіть невелика частка метану (понад 20 % за об'ємом) суттєво підвищує швидкість горіння та стабілізує процес. Автори виявили нелінійну залежність утворення NO_x від складу суміші, що вказує на складну конкуренцію між механізмами формування та відновлення NO_x . Аналогічно, робота [3] демонструє, що об'ємне допалювання аміаку з воднем дозволяє не тільки покращити запалюваність, але й активізувати механізми відновлення NO_x в багатих паливних зонах за рахунок збільшення концентрації радикалів H та OH . Однак такий підхід, з одного боку, частково компрометує мету повної декарбонізації (у випадку CH_4), а з іншого – ускладнює паливну логістику, додаючи вимоги до зберігання та подачі другого компонента.

Для застосування чистого аміаку пріоритетним є розвиток методів, що не вимагають паливних добавок. У цьому контексті інтенсивно вивчається потенціал технології обертового (swirl) спалювання. Дослідження [4] експериментально показало, що правильно сконфігурована обертова течія зі швидкісним градієнтом може створити стійку зону рециркуляції гарячих продуктів згоряння (Internal recirculation zone – IRZ), що виконує роль постійного запалювача для суміші NH_3 /повітря. Це дозволяє стабілізувати полум'я чистого аміаку в досить широкому діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря. Ключовим є оптимізація ступеня закрутки потоку (Swirl number) та

конфігурації сопел для досягнення оптимального балансу між стабільністю полум'я та рівнем викидів. Окрему категорію становлять роботи з багатоступеневої організації горіння. Концепція, представлена в [5], передбачає поділ процесу на дві зони: первинне горіння багатопаливним сумішшю з метою забезпечення стійкості та генерації проміжних продуктів (таких як H_2 та NO), з подальшим дожиганням у зоні допалювання вторинним повітрям для контролю температури та мінімізації термічного NO_x . Такий підхід показує обіцяючі результати у моделюванні, демонструючи можливість досягнення низьких викидів NO_x при високій ефективності згоряння.

Ефективне проектування камер згоряння для NH_3 неможливе без глибокого розуміння хімічної кінетики процесу. Сучасні дослідження спрямовані на уточнення детальних механізмів окиснення аміаку, особливо за високих тисків, характерних для ГТД. Нова кінетична модель, запропонована в [6], що включає понад 160 елементарних реакцій між 27 компонентами, була верифікована на експериментальних даних в діапазоні тисків 1–10 атм. Модель адекватно описує як характеристики запалення (час індукції), так і склад продуктів, зокрема динаміку утворення NO та N_2O . Особливу увагу дослідники приділяють механізмам формування та відновлення NO_x через проміжні сполуки, такі як NH , N_2H , та HNO , що стають домінуючими шляхами в умовах багатих сумішей або при середніх температурах.

Перспективним напрямком для інтенсифікації процесів у камері згоряння є застосування плазмохімічних методів. Дослідження [7] присвячене аналізу можливості використання неізотермічної плазми для попередньої активації паливно-повітряної суміші аміаку. Моделювання показало, що плазмовий розряд може ефективно генерувати активні частинки (радикали H , N , NH_2), що суттєво скорочують час індукції та знижують практичну температуру займання, відкриваючи шлях до розробки гібридних плазмово-паливних камер згоряння.

На промисловому рівні прагнення до комерціалізації технології підтверджується такими ініціативами, як розробка компанією Mitsubishi Power демонстраційної газової турбіни потужністю 40 МВт, повністю адаптованої для роботи на аміаку [8]. Цей проект акцентує увагу не тільки на модифікації камери згоряння, але й на адаптації всієї паливної траси та системи керування.

Окремий науковий інтерес становлять роботи, що розглядають аміак не лише як кінцеве паливо для горіння, але й як ключовий елемент складних гібридних енергосистем. Так, у дослідженні [9] представлена концепція, де відпрацьовані гази ГТД, що працює на аміаку, використовуються як джерело тепла для парової конверсії частини того ж NH_3 з отриманням об'ємної водневомісної суміші. Ця суміш потім може повертатися в камеру згоряння ГТД для покращення характеристик горіння або живити супутній

паливний елемент, формуючи високоефективний комбінований цикл. Для морських застосувань, де обмеження за вагою та об'ємом є критичними, актуальним є комплексний енерго-експертний аналіз. Робота [10] проводить порівняльну оцінку різних конфігурацій енергоустановок на аміаку для великих суден, враховуючи не тільки термодинамічну ефективність обладнання, але й енерговитрати на реліквіфікацію, зберігання та циркуляцію палива на борту, що забезпечує цілісне бачення технологічної доцільності.

Робота [11] досліджує вплив домішок водяної пари H_2O на процес горіння аміаку в умовах, що імітують роботу ГТД з регенеративним циклом або паровим впорскуванням для контролю NO_x . Автори виявили, що додавання води призводить до помітного зниження температури полум'я та швидкості горіння через її теплоємність та роль у проміжних реакціях. Однак паралельно спостерігається суттєве пригнічення механізмів утворення термічного NO_x . Це створює основу для стратегії впорскування пари в первинну зону горіння не лише як засобу зниження викидів, але й як інструменту для контролю теплових навантажень на лопатки турбіни при роботі на чистому аміаку. Дослідження надає емпіричні кореляції для моделювання та оптимізації такого процесу.

Дослідження [12] пропонує інноваційний підхід – використання каталітичного прошарку у вхідній частині камери згоряння ГТД. Автори дослідили керамічні монолітні структури з покриттям на основі оксидів благородних металів, які активують часткове окиснення аміаку при порівняно низьких температурах (понад 600 °C). Цей процес генерує суміш, багату воднем, яка потім легко догоряє у звичайній повітряній течії. Така гібридна (каталітично-гомогенна) схема дозволяє подолати основну проблему запалення та стабілізації полум'я чистого NH_3 , значно розширюючи робочий діапазон камери згоряння та знижуючи викиди негорілих речовин і NO_x .

У роботі [13] представлені результати масштабного тривимірного CFD-моделювання (RANS та LES) повномасштабної камери згоряння мікро-ГТУ на аміаку. Модель інтегрує детальну кінетику горіння з моделлю турбулентності, що дозволило проаналізувати просторову структуру течії, зони рециркуляції, розподіл температури та концентрацій забруднювачів. Ключовим результатом є ідентифікація локальних зон з підвищеною температурою як основних джерел NO_x , що вказує на необхідність оптимізації не лише загальної конфігурації, але й точної геометрії сопел та отворів для вторинного повітря для забезпечення максимально однорідного змішування.

Відмітимо, що більшість фундаментальних досліджень проводяться при атмосферному тиску, тоді як робота [14] надає експериментальні дані щодо характеристик горіння сумішей аміаку та водню при тисках до 5 бар. Автори виміряли швидкість полум'я,

проміжковий хімічний склад та викиди NO_x . Результати показують, що зростання тиску призводить до нелінійного збільшення швидкості горіння сумішей з високим вмістом H_2 , але має менш виражений ефект на чистий аміак. Це підкреслює важливість експериментальної валідації кінетичних моделей саме в діапазоні робочих тисків ГТД для точної прогнозовної здатності при проектуванні.

Дослідження [15] виходить за межі власне камери згоряння та проводить повний аналіз життєвого циклу (LCA) використання «зеленого» аміаку, виробленого за допомогою відновлюваної енергетики, у судновій енергетичній установці з ГТД. Робота кількісно оцінює енергетичну ефективність, вартість та повний вуглецевий слід ланцюжка постачання. Висновки дослідження мають стратегічне значення: вони показують, що навіть з урахуванням втрат при синтезі, транспортуванні та згорянні, «зелений» аміак може забезпечити радикальне (понад 80 %) зниження викидів парникових газів у порівнянні з традиційним судновим паливом, затверджуючи його роль не лише як технічної альтернативи, але й як екологічно обгрунтованого рішення для декарбонізації.

Таким чином, аналіз сучасної літератури свідчить про перехід від дослідження принципової можливості спалювання аміаку до розробки конкретних технічних рішень та стратегій управління процесом в умовах, максимально наближених до експлуатаційних у ГТД. Основними векторами розвитку є оптимізація аеродинаміки камери згоряння (зокрема, через використання закручених потоків), впровадження багатоступеневих схем, інтеграція каталітичних та плазмохімічних методів активації, а також глибоке моделювання кінетики для точного прогнозування емісійних характеристик.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень, присвячених використанню аміаку як безвуглецевого палива в гібридних енергетичних системах на основі газотурбінних двигунів, засвідчив наявність низки невіршених науково-технічних проблем, зумовлених специфічними фізико-хімічними властивостями цього палива. Зокрема, однією з ключових задач залишається забезпечення повного та стабільного вигорання аміаку в умовах високофорсованих камер згоряння газотурбінних двигунів.

Запропоновані в межах даного дослідження технічні підходи спрямовані на подолання зазначених обмежень і формування науково обгрунтованих рішень щодо ефективного використання аміаку як палива. Особливу увагу планується приділити оцінюванню доцільності впровадження аміаку в гібридні енергетичні системи, створені на базі газотурбінних двигунів українського виробництва, з урахуванням їх енергетичних та екологічних показників.

Метою роботи є тривимірне числове прогнозування енергетичних та емісійних характеристик камери згоряння газотурбінного двигуна, що функціонує на чистому аміаку, з використанням детального кінетичного механізму його окиснення.

Об'єктом дослідження є робочі процеси, що відбуваються в камері згоряння газотурбінного двигуна під час спалювання газоподібного аміаку. **Предметом дослідження** виступають закономірності вигорання аміаку та формування оксидів азоту в камері згоряння ГТД.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Початковий етап переходу вітчизняних газотурбінних двигунів з традиційних вуглеводневих палив на перспективне безвуглецеве паливо – аміак – потребує проведення комплексу поглиблених досліджень. Насамперед це стосується оцінювання можливостей формування та підтримання стійкого процесу горіння аміаку у високофорсованих камерах згоряння, а також кількісного прогнозування температурного рівня продуктів згоряння і утворення токсичних домішок. З огляду на специфічні фізико-хімічні властивості аміаку, такі дослідження є критично важливими для забезпечення надійності та екологічної безпеки роботи двигуна.

У межах даної роботи як паливоспалювальний пристрій розглянуто класичну дифузійну камеру згоряння, конструкція якої широко застосовується у газотурбінних двигунах і допускає експлуатацію як на рідких, так і на газоподібних вуглеводневих паливах. Обрання саме такої схеми дозволяє оцінити потенціал її адаптації до використання аміаку без кардинальної зміни базової конструкції. Додатково слід відзначити, що результати такого аналізу можуть слугувати основою для подальшої оптимізації процесів сумішоутворення та стабілізації полум'я при роботі на альтернативних безвуглецевих паливах.

Конструкція камери згоряння газотурбінного двигуна [16] передбачає використання з'єднаних між собою за допомогою полум'яперекидних патрубків жарових труб, в яких організується дифузійне згоряння палива. Жарові труби виконані за традиційною схемою з поділенням їх внутрішнього об'єму на зони горіння та розбавлення (первинну та вторинну зони) з плівковим охолодженням внутрішніх поверхонь повітрям, яке поступає крізь невеликі отвори в сегментах жарової труби, розташованих послідовно по її довжині. Для роботи на аміаку пропонується зберегти масову витрату повітря через компресорну частину і камеру згоряння двигуна.

У межах даного дослідження для оцінювання енергетичних і екологічних показників камери згоряння газотурбінного двигуна застосовано модель турбулентного горіння Eddy Dissipation Concept (EDC), яка забезпечує узгоджене поєднання моделей турбулентності з детальним описом хімічної кінетики

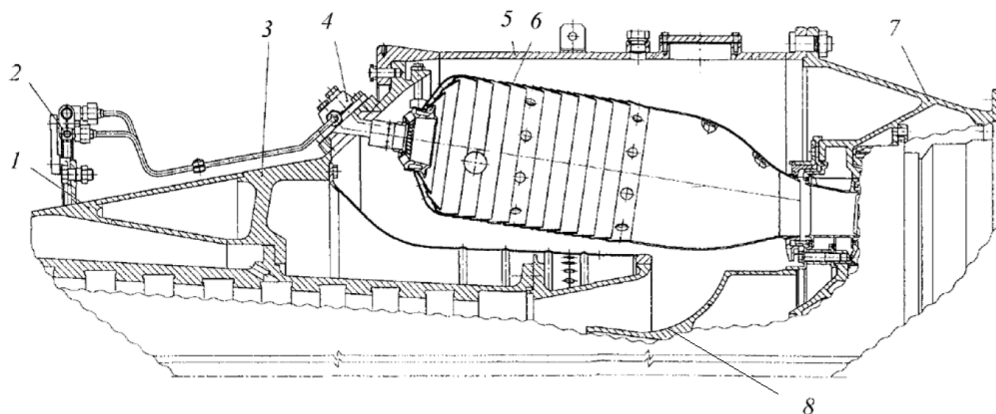
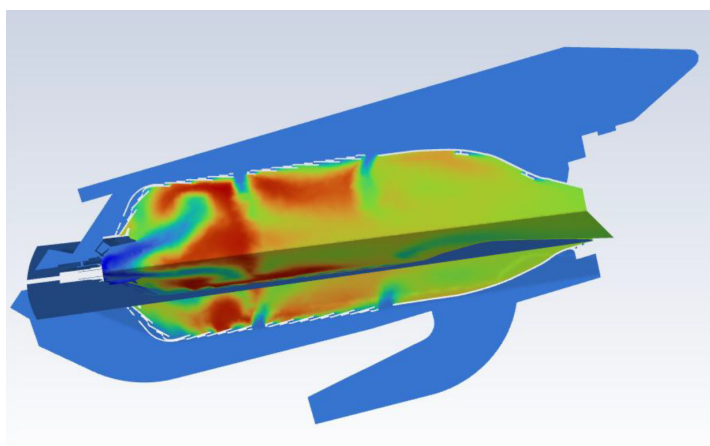


Рис. 1. Конструктивна схема камери згорання: 1 – підвіска; 2 – паливні колектори; 3 – корпус компресора високого тиску; 4 – паливні форсунки; 5 – зовнішній корпус камери згорання; 6 – жарова труба; 7 – силовий корпус; 8 – дифузор

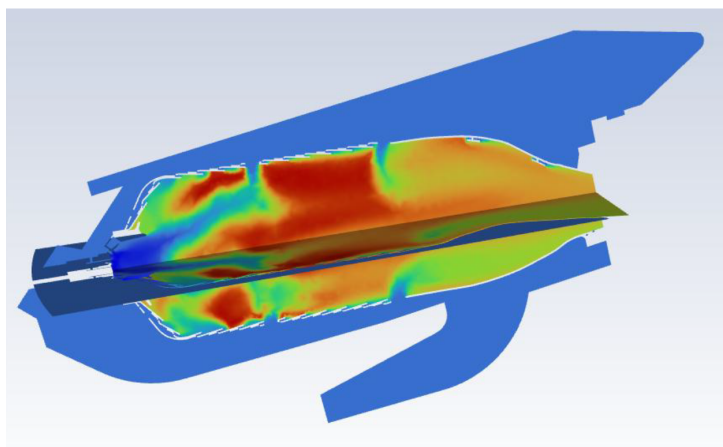
реакцій горіння [17]. Числова реалізація зазначеного підходу виконана з використанням програмного комплексу Ansys Fluent [18], що дозволяє проводити тривимірне моделювання реагуючих турбулентних потоків у складних геометріях камер згорання. У рамках EDC-підходу передбачається, що основні хімічні перетворення відбуваються в локалізованих

дрібномасштабних турбулентних структурах, які інтерпретуються як мікрореактори з характерними часами хімічної взаємодії. Повний виклад системи рівнянь моделі та числових методів їх розв'язання наведено у працях [17, 19, 20].

Коректне відтворення процесів горіння аміаку в газотурбінних камерах згорання значною мірою



(а)



(б)

Рис. 2. Контури температури (К) в об'ємі камери згорання при витраті аміаку 0,25 кг/с (а) та 0,255 кг/с (б)

визначається вибором адекватного механізму хімічної кінетики. У даній роботі для аналізу реакцій окиснення аміаку та процесів утворення оксидів азоту використано детальний кінетичний механізм [21], який враховує як основні, так і проміжні реакційні шляхи. Застосування такого механізму дає змогу підвищити достовірність прогнозування викидів NO_x та оцінити параметрів камери на стабільність полум'я і інтенсивність тепловиділення, що є важливим з огляду на перспективи декарбонізації газотурбінних енергетичних систем.

Використаний кінетичний механізм містить 150 реакцій з 23 хімічними компонентами: 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 , HNOH , N_2H_4 , N , NO_3 , NH , NNH , NH_2 , H_2NO , N_2H_3 , Ar , He , N_2 . Цей кінетичний механізм [21] розроблено на основі еволюційного, керованого даними підходу до оптимізації хімічних механізмів. Автори поєднали фізично обґрунтовану структуру реакційної схеми з автоматизованими методами калібрування кінетичних параметрів на базі широкого масиву експериментальних даних, що охоплюють різні умови тиску, температури та складу суміші.

Запропонований механізм детально описує ключові елементарні стадії окиснення аміаку, зокрема реакції за участю радикалів NH_x (NH , NH_2), а також шляхи утворення і перетворення NO та N_2O , які визначають рівень викидів оксидів азоту. Особлива увага приділена узгодженості механізму для широкого діапазону режимів – від ламінарного полум'я до умов, характерних для високотемпературних турбулентних потоків у камерах згоряння. Завдяки цьому механізм є придатним для використання в CFD-розрахунках газотурбінних камер згоряння та забезпечує підвищену точність прогнозування як тепловиділення, так і емісійних характеристик при спалюванні аміаку і його сумішей.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для детального аналізу особливостей перебігу робочого процесу у високофорсованій камері згоряння газотурбінного двигуна, що функціонує на газоподібному аміаку, виконано числові дослідження із застосуванням програмного комплексу ANSYS Fluent [18]. Просторова дискретизація розрахункової області здійснювалася на основі неструктурованої кінцево-різницевої сітки, яка включала близько 3,3 млн тетрагедральних

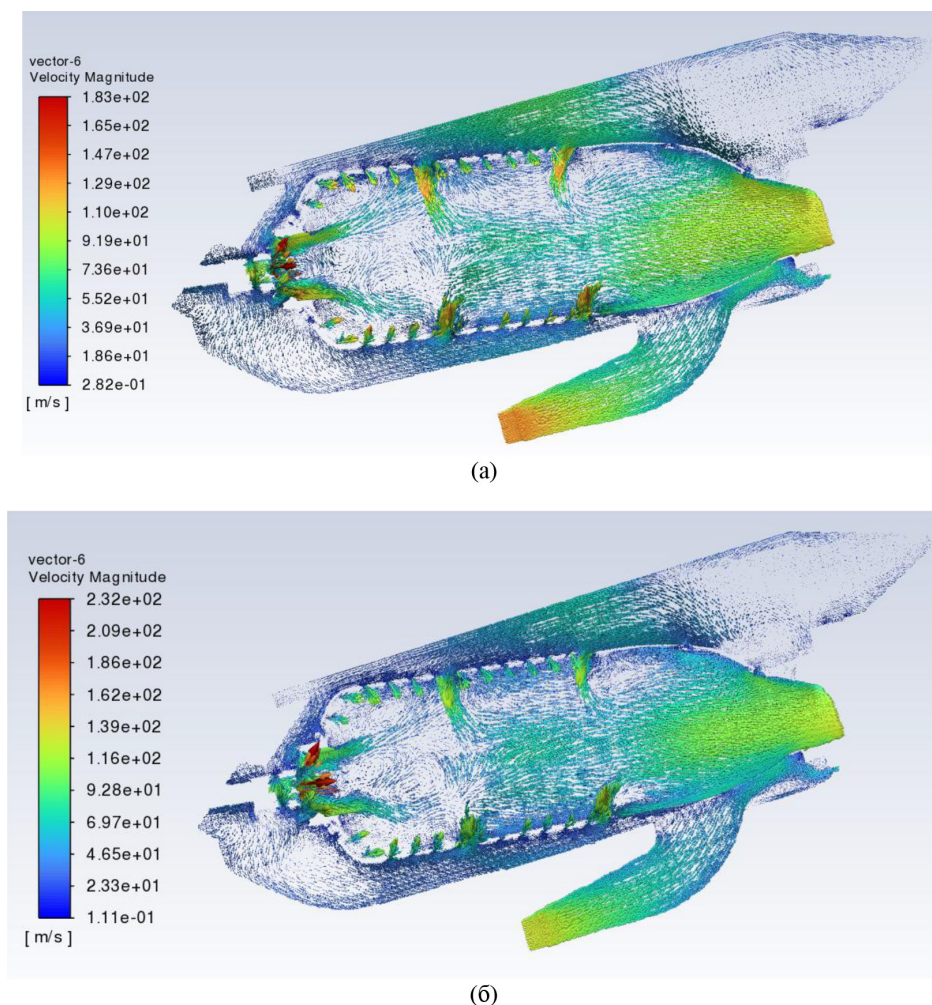


Рис. 3. Вектори швидкості (м/с) в об'ємі камери згоряння при витраті аміаку 0,25 кг/с (а) та 0,255 кг/с (б)

елементів, що забезпечило достатню точність відтворення складної аеротермохімічної структури потоку.

Розрахунки проводилися для однієї жарової труби камери згоряння за таких вхідних параметрів: масова витрата аміаку змінювалася в межах 0,20–0,255 кг/с, температура палива становила 313 К, витрата повітря 4,291 кг/с (або 5,1 кг/с з урахуванням відборів на охолодження лопаткових апаратів турбіни), температура повітря 748 К, тиск 2,0 МПа. Геометричні параметри жарової труби відповідали середньому діаметру 0,165 м та довжині 0,52 м.

Аналіз температурних полів у перерізах камери згоряння (рис. 2) свідчить, що зі зростанням витрати аміаку відбувається помітна перебудова теплової структури полум'я. Зона максимальних температур поступово зміщується від фронтової частини камери до області основного горіння, розташованої між рядами підведення первинного та вторинного повітря. Така тенденція зумовлена підвищенням імпульсу паливного струменя та інтенсифікацією процесів турбулентного змішування. Осереднена температура газів на виході камери згоряння зростає з 1497 К до 1578 К при збільшенні витрати аміаку з 0,25 до 0,255 кг/с, що відповідає підвищенню теплонапруженості камери.

Аеродинамічна структура потоку істотно впливає

на формування температурних і концентраційних полів. Як видно з векторних полів швидкості (рис. 3), у приосьовій зоні камери формується розвинена рециркуляційна область, обумовлена дією осьового завихрювача. Ця зона відіграє ключову роль у стабілізації фронту полум'я, забезпечуючи тривале перебування реагентів у високотемпературному середовищі та безперервне займання свіжих порцій палива. Додатково, у периферійній частині фронтового пристрою виникає система вторинних вихорів, сформованих взаємодією закрученого повітряного потоку з радіальними струменями первинного повітря. Сукупний ефект цих структур сприяє стабільному горінню аміаку навіть за умов високих швидкостей течії. Осереднена швидкість продуктів згоряння на виході камери згоряння зростає з 99,5 до 113,9 м/с при відповідному збільшенні витрати палива.

Розподіли масових часток аміаку (рис. 4) демонструють, що в основній зоні горіння відбувається практично повне його вигорання. Навіть за максимальної дослідженої витрати 0,255 кг/с аміак не виноситься за межі жарової труби, що підтверджує ефективність обраної схеми стабілізації полум'я. Розрахункові об'ємні концентрації аміаку на виході камери згоряння не перевищують 0,04–0,06 ppm, що

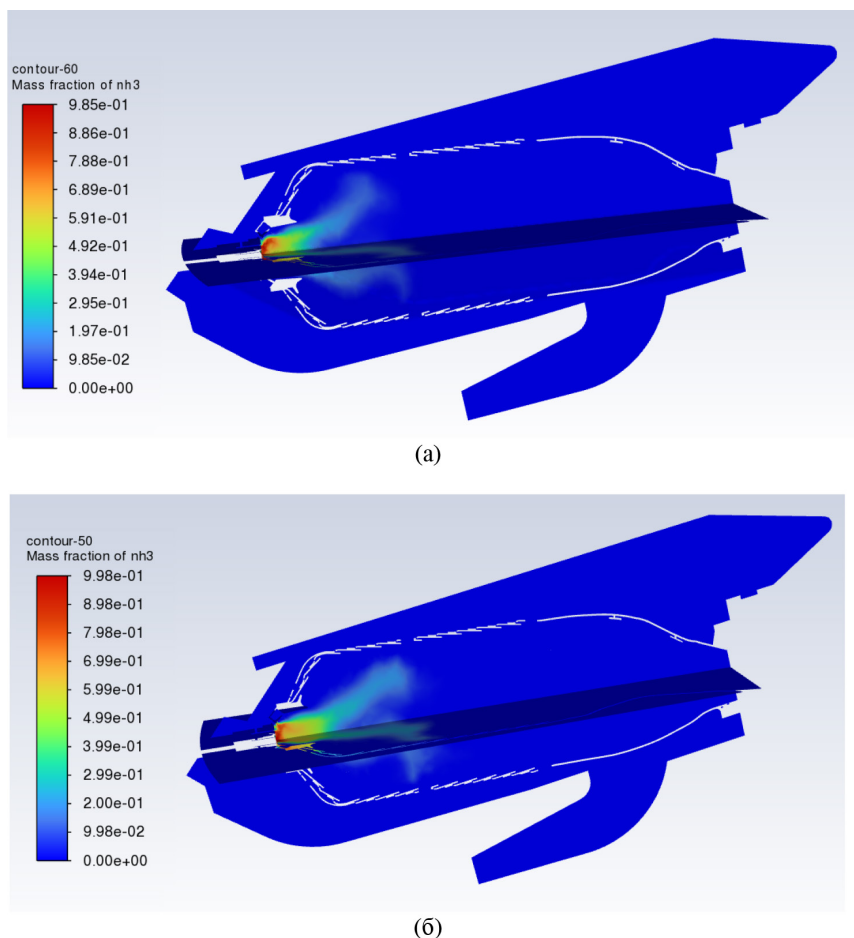


Рис. 4. Контури масової частки аміаку в об'ємі камери згоряння при витраті аміаку 0,25 кг/с (а) та 0,255 кг/с (б)

є важливим з точки зору екологічної безпеки та експлуатаційної надійності.

Дуже важливим є питання утворення оксидів азоту при спалюванні азотовмісних палив в повітряному середовищі в умовах високих температур і тисків. На рис. 5 та 6 наведено розподіли масових часток NO і N₂O в об'ємі камери згоряння при витраті аміаку 0,25 та 0,255 кг/с. Основним джерелом утворення оксиду NO є післяполум'яна зона з високими температурами. Таким чином, термічний механізм Зельдовича і в цьому випадку відіграє велику роль. З підвищенням теплонапруженності камери (зі зростанням масової витрати аміаку) збільшується і генерація оксидів NO. Так, розрахункові осереднені об'ємні концентрації NO на виході камери згоряння дорівнюють 789 і 1100 ppm при витратах аміаку 0,25 і 0,255 кг/с відповідно.

Слід зазначити, що механізм утворення оксидів азоту при спалюванні аміаку в камерах згоряння газотурбінних двигунів істотно відрізняється від класичних випадків окиснення вуглеводневих палив. Окрім термічного механізму Зельдовича, який активізується в післяполум'яних зонах з підвищеними температурами, суттєвий внесок у загальну емісію NO_x робить так

званий паливний механізм, безпосередньо пов'язаний із наявністю атомарного азоту в молекулі NH₃.

На початкових стадіях горіння аміаку формуються активні азотовмісні радикали NH₂, NH та N, які беруть участь у складній системі ланцюгових реакцій з кисневмісними радикалами (O, OH, HO₂). Саме ці реакції зумовлюють інтенсивне утворення оксиду NO вже у зоні фронту полум'я, навіть за відносно помірних температур, що принципово відрізняє аміачне горіння від вуглеводневого.

Подальше перетворення проміжних сполук, зокрема N₂O та HNO, у післяполум'яній зоні призводить до додаткової генерації NO, причому співвідношення між NO, NO₂ та N₂O суттєво залежить від локальних значень температури, коефіцієнта надлишку повітря та інтенсивності турбулентного перемішування. Отримані в роботі просторові розподіли N₂O підтверджують, що цей компонент є характерним маркером аміачного горіння і формується переважно в перехідних зонах між первинним і вторинним підведенням повітря.

Для аналізованої конструктивної схеми паливоспалюючого пристрою найбільш характерним з таких

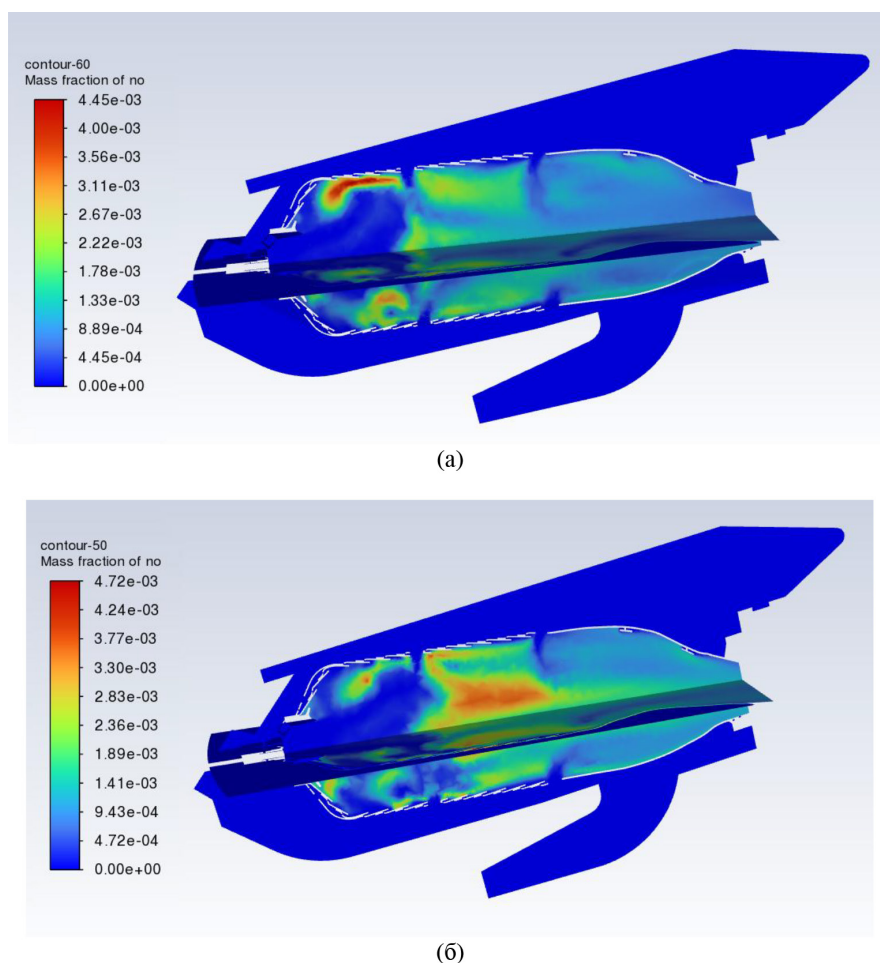


Рис. 5. Контури масової частки NO в об'ємі камери згоряння при витраті аміаку 0,25 кг/с (а) та 0,255 кг/с (б)

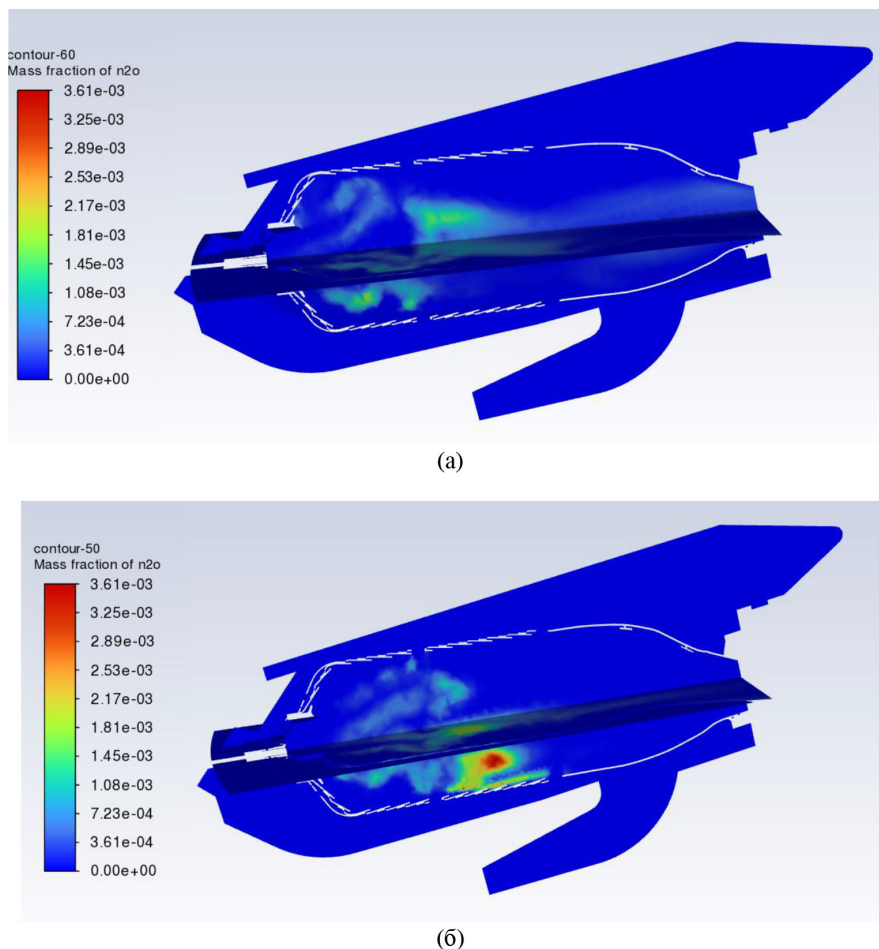


Рис. 6. Контури масової частки N_2O в об'ємі камери згоряння при витраті аміаку 0,25 кг/с (а) та 0,255 кг/с (б)

продуктів є оксид N_2O . Згідно з результатами числового моделювання, середні об'ємні концентрації N_2O на виході камери згоряння становлять 69 ppm при витраті аміаку 0,25 кг/с та зменшуються до 30 ppm при підвищенні витрати палива до 0,255 кг/с. Вміст діоксиду азоту NO_2 у продуктах згоряння за відповідних режимів дорівнює 21 та 16 ppm.

Таким чином, утворення оксидів азоту в традиційній дифузійній камері згоряння при переведенні газотурбінного двигуна з вуглеводневого палива на аміак значно посилюється із-за генерації паливних оксидів азоту. Кількість оксидів азоту NO_x на виході камери перевищує нормативні значення вмісту таких з'єднань в вихлопних газах теплових двигунів.

Для камер згоряння ГТД, які працюють на аміаку, класичні підходи до зниження NO_x , орієнтовані виключно на обмеження температурного рівня, є недостатніми. Ефективне скорочення викидів оксидів азоту потребує комплексного урахування кінетичних шляхів паливного NO , зокрема шляхом керування складом паливної суміші, локальними умовами окиснення та часом перебування реагентів у зоні високих температур. Тому потрібні додаткові теоретичні і експериментальні роботи з використання

перспективних способів подавлення утворення азотовмісних з'єднань або використання методів селективного каталітичного відновлення.

ВИСНОВКИ

1. Для дослідження робочого процесу камери згоряння газотурбінного двигуна, що працює на чистому аміаку, застосовано тривимірну математичну модель континуального типу, засновану на числовому розв'язанні рівнянь збереження маси, імпульсу, енергії та перенесення хімічних компонентів у турбулентному реагуючому потоці.

2. Прогнозування енергетичних і емісійних характеристик виконано з використанням детального кінетичного механізму горіння аміаку, який включає 150 елементарних реакцій за участю 23 хімічних компонентів, що забезпечує адекватний опис як тепловиділення, так і процесів утворення NO_x .

3. Показано вплив масової витрати аміаку на просторові розподіли температури, швидкості та концентрацій реагентів і продуктів згоряння в перерізах жарової труби за підвищеного тиску 2,0 МПа.

4. Встановлено, що за досліджених режимів аміак практично повністю вигоряє в об'ємі камери згоряння, однак рівень утворення оксидів азоту NO_x суттєво

перевищує показники, характерні для газотурбінних двигунів на вуглеводневих паливах.

5. Отримані результати свідчать про необхідність подальших теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на зниження емісії азотовмісних

сполук, зокрема шляхом оптимізації аеродинамічної схеми камери, застосування сумісного спалювання аміаку з воднем, впорскування водяної пари або використання систем селективного каталітичного відновлення продуктів згоряння.

REFERENCES

- [1] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Kunkuma, K. D., Somarathne, A., & Okafor, E. C. (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(1), 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
- [2] De Joannon, M., Matarazzo, A., Sabia, P., Sorrentino, G. (2022). Ammonia-methane combustion in a model swirl burner: An experimental and numerical study. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(4), 4343–4352. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.118>
- [3] Xiao, H., Valera-Medina, A., Bowen, P. J. (2022). Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels. *Energy*, 256, 124607. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124607>
- [4] Valera-Medina, A., Gutesa, M., Xiao, H., Pugh, D., Giles, A., Goktepe, B., Marsh, R., Bowen, P. (2022). Premixed ammonia/hydrogen swirl combustion under rich fuel conditions for gas turbines operation. *Fuel*, 310, 122300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122300>
- [5] 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-NO_x ammonia combustor for a micro gas turbine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4597–4606. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.083>
- [6] Stagni, A., Arunthanayothin, S., Debiagi, P., Frassoldati, A., Faravelli, T., Hasemann, O. (2024). An updated kinetic mechanism for ammonia oxidation and its interaction with nitrogen oxides. *Combustion and Flame*, 262, 113287. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113287>
- [7] Matveev, I. B., Serbin, S. I. (2020). A multitorch RF plasma system as a way to improve temperature uniformity for high-power applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(2), 332–337. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2950260>
- [8] Mitsubishi Power. (2022, March 1). Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system [Press release]. <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
- [9] Serbin, S., Washchilenko, N., Zhao, X., Dzida, M. (2024). Thermodynamic investigation of the efficiency of ammonia-powered marine solid oxide fuel cells with gas turbine. *Heliyon*, 10(20), Article e39645. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39645>
- [10] Chen, D., Serbin, S., Washchilenko, N., Burunsuz, K. (2024). Parameter evaluation for a hybrid marine system combining solid oxide fuel cells and overexpanded steam-injected gas turbine. *International Journal of Thermofluids*, 21, Article 100565. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100565>
- [11] Ichikawa, Y., Naito, Y., Hayakawa, A. (2023). Effects of steam addition on the combustion characteristics and NO_x formation of ammonia/air flames. *Fuel Processing Technology*, 250, 107904. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107904>
- [12] Cimino, S., Lisi, L. (2022). Catalytic combustion of ammonia over supported transition metal oxides for power generation applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 319, 121927. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121927>
- [13] Ferrarotti, M., Cresci, F., Parente, A. (2023). Large Eddy Simulation of an ammonia/hydrogen swirl burner for gas turbine applications: Flame structure and emissions analysis. *Energy*, 285, 129458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129458>
- [14] Wang, Z., Li, Y., Deng, S., Huang, Z. (2022). Experimental study on laminar burning velocities of ammonia/hydrogen/air mixtures at elevated pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(75), 32240–32251. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.124>
- [15] Bicer, Y., Dincer, I. (2024). Life cycle assessment of marine propulsion systems using green ammonia in gas turbines: A well-to-wake analysis. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140123>
- [16] Romanovskyy, G. F., Serbin, S. I., Patlaychuk, V. M. (2005) Suchasni hazoturbinni ahrehaty. Navchalnyy posibnyk. Mykolayiv : NUS, 344 p.
- [17] Magnussen, B. F., Hjertager, B. H. (1977). On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 16(1), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [18] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). ANSYS, Inc., pp. 1–780.
- [19] Launder, B. E., Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press.
- [20] Matveev, I. B., Serbin, S. I., Vilkul, V. V., Goncharova, N. A. (2015). Synthesis gas afterburner based on an injector type plasma-assisted combustion system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(12), 3974–3978. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2495242>
- [21] 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>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Kunkuma, K. D., Somarathne, A., & Okafor, E. C. (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(1), 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
- [2] De Joannon, M., Matarazzo, A., Sabia, P., Sorrentino, G. (2022). Ammonia-methane combustion in a model swirl burner: An experimental and numerical study. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(4), 4343–4352. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.118>
- [3] Xiao, H., Valera-Medina, A., Bowen, P. J. (2022). Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels. *Energy*, 256, 124607. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124607>
- [4] Valera-Medina, A., Gutesa, M., Xiao, H., Pugh, D., Giles, A., Goktepe, B., Marsh, R., Bowen, P. (2022). Premixed ammonia/hydrogen swirl combustion under rich fuel conditions for gas turbines operation. *Fuel*, 310, 122300. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122300>
- [5] 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-NO_x ammonia combustor for a micro gas turbine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4597–4606. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.083>
- [6] Stagni, A., Arunthanayothin, S., Debiagi, P., Frassoldati, A., Faravelli, T., Hasemann, O. (2024). An updated kinetic mechanism for ammonia oxidation and its interaction with nitrogen oxides. *Combustion and Flame*, 262, 113287. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113287>
- [7] Matveev, I. B., Serbin, S. I. (2020). A multitorch RF plasma system as a way to improve temperature uniformity for high-power applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(2), 332–337. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2950260>
- [8] Mitsubishi Power. (2022, March 1). Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system [Press release]. <https://power.mhi.com/news/20210301.html>
- [9] Serbin, S., Washchilenko, N., Zhao, X., Dzida, M. (2024). Thermodynamic investigation of the efficiency of ammonia-powered marine solid oxide fuel cells with gas turbine. *Heliyon*, 10(20), Article e39645. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39645>
- [10] Chen, D., Serbin, S., Washchilenko, N., Burunsuz, K. (2024). Parameter evaluation for a hybrid marine system combining solid oxide fuel cells and overexpanded steam-injected gas turbine. *International Journal of Thermofluids*, 21, Article 100565. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100565>
- [11] Ichikawa, Y., Naito, Y., Hayakawa, A. (2023). Effects of steam addition on the combustion characteristics and NO_x formation of ammonia/air flames. *Fuel Processing Technology*, 250, 107904. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107904>
- [12] Cimino, S., Lisi, L. (2022). Catalytic combustion of ammonia over supported transition metal oxides for power generation applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 319, 121927. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121927>
- [13] Ferrarotti, M., Cresci, F., Parente, A. (2023). Large Eddy Simulation of an ammonia/hydrogen swirl burner for gas turbine applications: Flame structure and emissions analysis. *Energy*, 285, 129458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129458>
- [14] Wang, Z., Li, Y., Deng, S., Huang, Z. (2022). Experimental study on laminar burning velocities of ammonia/hydrogen/air mixtures at elevated pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(75), 32240–32251. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.124>
- [15] Bicer, Y., Dincer, I. (2024). Life cycle assessment of marine propulsion systems using green ammonia in gas turbines: A well-to-wake analysis. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140123>
- [16] Романовський, Г. Ф., Сербін, С. І., Патлайчук, В. М. (2005) Сучасні газотурбінні агрегати. Навчальний посібник. Миколаїв : НУК, 344 с.
- [17] Magnussen, B. F., Hjertager, B. H. (1977). On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 16(1), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80366-4)
- [18] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). ANSYS, Inc., pp. 1–780.
- [19] Launder, B. E., Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press.
- [20] Matveev, I. B., Serbin, S. I., Vilkul, V. V., Goncharova, N. A. (2015). Synthesis gas afterburner based on an injector type plasma-assisted combustion system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(12), 3974–3978. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2495242>
- [21] 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>

© Сербін С. І., Личко Б. М., Бондаренко М. С.

Дата першого надходження статті до видання: 12.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)