

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.15](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.15)CHARACTERISTICS OF A GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER
WHEN USING HYDROGEN-AMMONIA FUELХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЕВО-АМІАЧНОГО ПАЛИВА**Serhiy I. Serbin¹**

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Bohdan M. Lychko¹

bogdan.lychko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3943-9689

Daifen Chen²

dfchen@just.edu.cn

ORCID: 0000-0002-4110-2199

С. І. Сербін¹,

докт. техн. наук, професор

Б. М. Личко¹,

канд. техн. наук, доцент

Д. Чен²,

PhD, професор

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*²*Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*Університет науки і технологій провінції Цзянсу, м. Чженьцзян, КНР*

Abstract. This article is devoted to the study of the characteristics of a gas turbine combustion chamber operating on a hydrogen-ammonia mixture. *The aim* of the work is to determine the energy and environmental characteristics of a gas turbine engine combustion chamber operating on a mixture of hydrogen and ammonia. The object of the study is the working process in a tubular-ring combustion chamber of a gas turbine engine operating on a hydrogen-ammonia mixture. *The research method* involved three-dimensional calculations of the working process in the gas turbine engine combustion chamber using computational fluid dynamics. The system of differential equations describing the laws of conservation of mass, momentum and transport of chemical components in a multicomponent turbulent system was used. *The scientific novelty* lies in the proposed approach to modeling the combustion processes of a hydrogen-ammonia mixture under conditions of preliminary mixing of gaseous fuel with an oxidizer in the channels of radial-axial swirlers of flame tubes. A detailed kinetic scheme of mixture combustion within the Eddy Dissipation Concept (EDC) approach was used in three-dimensional calculations of a tubular-ring combustion chamber of a 25 MW gas turbine engine. The kinetic scheme of hydrogen-ammonia mixture combustion contains 150 elementary reactions and 23 chemical components, which ensures adequate prediction of toxic components inside the combustion chamber. *As a result* of the performed three-dimensional calculations, it was found that for the studied combustion chamber, the stable operating range without the formation of a flame flashback zone in the channels of radial-axial swirlers is determined by an ammonia content in the mixture greater than 50% (by volume). The main features of the organization of the working process in the gas turbine engine combustion chamber at different compositions of the hydrogen-ammonia mixture are analyzed. The application of such a mixture requires optimization of the combustion process and the use of selective catalytic reduction methods for exhaust gases. *Practical significance.* The obtained results can be useful in the design and modernization of prospective gas turbine engine combustion chambers as part of decarbonized energy systems operating on alternative fuels.

Key words: hydrogen; ammonia; combustion chamber; hybrid system; heat engine; decarbonization; emissions of toxic components.

Анотація. Статтю присвячено дослідженню характеристик газотурбінної камери згоряння, що працює на суміші водню з аміаком. *Метою* роботи є визначенні енергетичних і екологічних характеристик камери згоряння газотурбінного двигуна, що працює на суміші водню і аміаку. Об'єкт дослідження – робочий процес в трубчасто-кільцевій камері згоряння ГТД, що працює на суміші водню і аміаку. *Методика* досліджень передбачала тривимірні розрахунки робочого процесу в камері згоряння газотурбінного двигуна з використанням обчислювальної гідро-газодинаміки. Використана система диференціальних рівнянь, що описують закони збережен-

ня маси, імпульсу і перенесення хімічних компонентів в багатокомпонентній турбулентній системі. *Наукова новизна* полягає в запропонованому підході до моделювання процесів вигорання суміші водню і аміаку в умовах попереднього перемішування газоподібного палива з окисником у каналах радіально-осьових завихрювачів жарових труб. Детальну кінетичну схему горіння суміші в рамках підходу Eddy Dissipation Concept (EDC) використано в тривимірних розрахунках трубчасто-кільцевої камери згорання газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт. Кінетична схема горіння воднево-аміачної суміші містить 150 елементарних реакцій і 23 хімічні компоненти, що забезпечує адекватне прогнозування токсичних компонентів всередині камери згорання. *В результаті* проведених тривимірних розрахунків виявлено, що для досліджуваної камери згорання діапазон стійкої роботи без формування зони проскоку полум'я в каналах радіально-осьових завихрювачів визначається вмістом аміаку в суміші більшим за 50% (за об'ємом). Проаналізовано основні особливості організації робочого процесу в камері згорання ГТД при різних складах воднево-аміачної суміші. Застосування такої суміші потребує оптимізації процесу горіння та використання методів селективного каталітичного очищення вихлопних газів. *Практична значимість.* Отримані результати можуть бути корисними при проєктуванні та модернізації перспективних камер згорання газотурбінних двигунів в складі декарбонізованих енергетичних систем, що працюють на альтернативних паливах.

Ключові слова: водень; аміак; камера згорання; гібридна система; тепловий двигун; декарбонізація; викиди токсичних компонентів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Дослідження, спрямовані на використання сумішей водню та аміаку в енергетичних установках, набувають дедалі більшої актуальності у контексті декарбонізації енергетики. Особливий інтерес у цьому напрямі становить газотурбінна техніка, яка широко застосовується в газотранспортних системах, стаціонарних енергетичних установках і суднових енергетичних установках. Проблематика адаптації газотурбінних двигунів до роботи на альтернативних видах палива, зокрема на сумішах водню та аміаку, протягом тривалого часу залишається предметом інтенсивних наукових досліджень.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Перспективи застосування газотурбінних двигунів у майбутніх низьковуглецевих енергетичних системах значною мірою визначаються можливістю підвищення їх теплової ефективності та забезпечення стабільної роботи на водні або водневмісних паливних сумішах. Згідно з прогнозами International Energy Agency (IEA), газотурбінні установки, що використовують водень як паливо, можуть стати однією з ключових технологій вуглецево-нейтральної енергетики [1].

Провідні світові виробники газових турбін, зокрема GE Power, Mitsubishi Heavy Industries, Siemens Energy, Rolls-Royce та Ansaldo Energia, вже тривалий час активно розробляють технічні рішення для реалізації таких концепцій [2, 3]. Так, у роботі [2] систематизовано етапи еволюції камер згорання газотурбінних двигунів, призначених для роботи на водневмісних паливах, розроблених компанією Mitsubishi Heavy Industries.

Однією з ключових експлуатаційних проблем камер згорання газотурбінних двигунів при використанні водню є виникнення термоакустичних нестабільностей. Зокрема, у дослідженні [3] показано, що водень чинить дестабілізуючий вплив на динаміку

горіння попередньо перемішаних паливно-повітряних сумішей. У роботі [4] зазначено, що традиційні низькоемісійні системи спалювання не можуть бути безпосередньо адаптовані для водневого палива; як альтернативу запропоновано використання технології Micro-Mix, що базується на застосуванні множини дифузійних пальників з метою запобігання проскоку полум'я.

Сучасний стан впровадження водню як домішки до природного газу або метану розглянуто у [5], де проаналізовано сценарії часткового заміщення традиційного палива. У роботі [6] за допомогою числового моделювання досліджено камеру згорання, що працює на суміші метану та водню, з метою визначення оптимальних геометричних параметрів і режимів експлуатації.

Результати CFD-досліджень, наведені в [7], показали, що базові конструкції камер згорання не забезпечують безпечну роботу на чистому водні через поширення полум'я в зону попереднього змішування. У зв'язку з цим запропоновано нову систему подачі палива та модифіковану геометрію фронтального пристрою. У роботі [8] розроблено аналітичну модель для оцінювання енергетичних характеристик газової мікротурбіни потужністю 30 кВт при використанні суміші природного газу з воднем у діапазоні до 10% (об'ємних), при цьому встановлено, що така домішка водню суттєво не впливає на експлуатаційні параметри установки.

У дослідженні [9] показано, що існуючі технології Dry Low NO_x (DLN), ефективні для природного газу, не можуть бути безпосередньо застосовані для водневого палива. Як альтернатива запропоновано концепцію DLN Micromix, що ґрунтується на перехресно-поточному змішуванні повітря та водню з формуванням множини мікрополум'їв дифузійного типу. Вплив геометричних параметрів Micromix-пальника на структуру полум'я та рівень NO_x

докладно проаналізовано в [12], де показано можливість керування довжиною полум'я та інтенсивністю утворення оксидів азоту за рахунок оптимізації стабілізуючих вихорів.

Числове моделювання камер згоряння малої потужності, що працюють на метані та водні, виконано в [11], де виявлено суттєві відмінності у теплових і газодинамічних характеристиках, здатні призводити до перегріву конструктивних елементів. Запропонована нова конструкція вихрового інжектора частково усунула зазначені проблеми. Аналогічні CFD-дослідження для мікрокамер згоряння наведено у [12], де сегментування подачі водню дозволило знизити максимальні температури стінок і покращити рівномірність температурного поля на виході.

У роботі [13] виконано тривимірне CFD-моделювання реагуючих потоків повітря і водню в жаровій трубі дифузійної камери згоряння одновальної газової турбіни, а числові результати підтверджено експериментальними даними. У [14] із застосуванням програмного комплексу Ansys Fluent досліджено камери згоряння простої геометрії, що працюють на метані та водні, при цьому зафіксовано відсутність викидів CO у випадку використання водню та підвищені температури і швидкості в зоні горіння.

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про стрімке зростання інтересу до сумісного спалювання водню та аміаку як перспективного напрямку декарбонізації газотурбінної енергетики. Це обумовлено поєднанням високої реакційної здатності водню та вуглецево-нейтрального характеру аміаку, що дозволяє розглядати їх суміші як реальну альтернативу природному газу для серійних і модернізованих газотурбінних двигунів.

У роботах [15–17] показано, що додавання водню до аміаку суттєво покращує характеристики займання, стабілізації полум'я та швидкість вигорання паливної суміші, що є критично важливим для камер згоряння з попереднім перемішуванням. Встановлено, що навіть відносно невелика об'ємна частка водню (20–40%) здатна компенсувати низьку швидкість поширення полум'я аміаку, зменшуючи ризик згасання та нестабільного горіння.

Разом із цим, результати числових і експериментальних досліджень свідчать, що зростання вмісту водню супроводжується підвищенням температури в зоні первинного горіння та інтенсифікацією утворення оксидів азоту, насамперед NO. При цьому в камерах згоряння, що працюють на сумішах аміаку і водню, істотну роль починають відігравати паливні (fuel-NOx) механізми, пов'язані з трансформацією азоту аміаку через проміжні радикали NH_2 , NH та HNO . Це принципово відрізняє такі системи від класичних камер згоряння на природному газі або чистому водні.

Дослідження [16, 17] демонструють, що геометрія паливкового пристрою, ступінь закрутки потоку та

спосіб підведення повітря істотно впливають як на повноту вигорання аміаку, так і на рівень викидів NO_x . Особливо ефективними виявляються закручені потоки зі сформованою зоною рециркуляції, які забезпечують довший час перебування реагентів у зоні високих температур і сприяють більш повному окисненню аміаку.

Роботи, присвячені термодинамічному та системному аналізу газотурбінних установок [15, 18], підтверджують, що сумісне спалювання водню й аміаку дозволяє досягти суттєвого скорочення викидів CO_2 без критичного зниження ККД, особливо за умови оптимізації складу палива та режимів роботи камери згоряння. При цьому аміак розглядається як ефективний носій водню, придатний для транспортування та зберігання у промислових масштабах.

Дослідження мікро- та малої газотурбінної техніки [19] додатково показують, що воднево-аміачні суміші забезпечують прийнятні теплові навантаження на елементи камери згоряння, за умови правильного розподілу палива вздовж жарової труби. Це підтверджує перспективність масштабування отриманих результатів на газотурбінні двигуни середньої та великої потужності.

Таким чином, сучасні дослідження однозначно вказують, що сумісне спалювання водню та аміаку є одним із найбільш перспективних шляхів переходу газотурбінної техніки до безвуглецевих палив. Водночас подальші наукові зусилля мають бути спрямовані на оптимізацію конструкції паливкових пристроїв, зменшення викидів паливних NO_x та забезпечення стійкого горіння без проскоку полум'я, що є ключовими умовами практичної реалізації цієї технології.

Отже, незважаючи на достатньо глибоку опрацьованість кінетики водневого горіння, перехід реальних газотурбінних двигунів на водневмісні палива супроводжується низкою складних проблем, пов'язаних із високою швидкістю поширення полум'я, ризиком проскоку полум'я (особливо в камерах з попереднім перемішуванням), зростанням теплових навантажень на елементи жарових труб і потенційним підвищенням викидів NO_x . Найбільш критичними ці питання є для камер згоряння з попереднім сумішоутворенням, що вимагає суттєвої модернізації паливкових пристроїв.

Разом із тим, на початкових етапах впровадження водню та водневмісних палив доцільно оцінити можливість надійної роботи серійних паливоспалюючих систем на сумішах водню з іншими носіями водню, зокрема аміаком, а також визначити екологічні характеристики та допустимі режими експлуатації, за яких забезпечується стабільне горіння без проскоку полум'я.

Метою даної роботи є дослідження енергетичних та екологічних показників газотурбінної камери згоряння з попереднім змішуванням палива й окисника

при роботі на сумішах водню та аміаку, а також визначення режимів експлуатації серійної камери згоряння газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт, за яких забезпечується стабільне горіння без проскоку полум'я в каналах радіально-осьових завихрювачів фронтового пристрою.

Об'єктом дослідження обрано робочий процес камери згоряння газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт виробництва НВКГ «Зоря»–«Машпроект» (м. Миколаїв), яка виконана за трубчасто-кільцевою протитоковою схемою з 16 жаровими трубами (рис. 1) та реалізує принцип сухого спалювання частково перемішаної збідненої суміші [20, 21].

Ключовим елементом камери є пальниковий пристрій, що містить внутрішній та зовнішній радіально-осьові завихрювачі з кільцевими камерами змішування. Через внутрішній завихрювач подається близько 12% сумарної витрати повітря, тоді як через зовнішній – приблизно 61% [16]. Паливна суміш водню з аміаком подається через систему отворів, розміщених у лопатках обох каналів завихрювачів. Для зниження рівня викидів оксидів азоту в камері згоряння реалізовано часткове попереднє змішування палива з повітрям у каналах завихрювачів. Закручена паливно-повітряна суміш надходить у первинну зону, де в приосьовій області формується протяжна рециркуляційна зона, що забезпечує надійне займання та стабілізацію горіння.

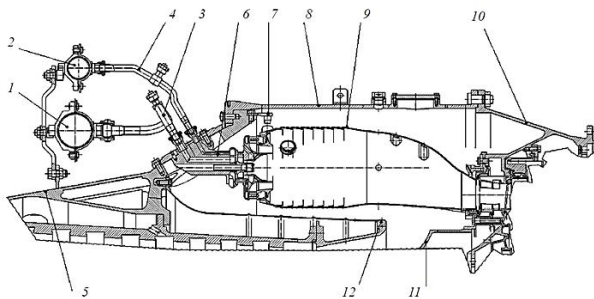


Рис. 1. Камера згоряння ГТД потужністю 25 МВт: 1, 2 – паливні колектори; 3, 4 – підведення паливної суміші; 5 – корпус компресора високого тиску; 6 – пальник; 7 – фіксатор; 8 – корпус камери згоряння; 9 – жарова труба; 10 – силовий корпус; 11 – дифузор; 12 – внутрішній корпус

Серійна камера згоряння спочатку призначена для роботи на природному газі з низькими викидами продуктів неповного згоряння та NO_x . У межах розвитку безвуглецевих енергетичних технологій розглядається можливість її адаптації до спалювання сумішей водню з аміаком.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Моделювання фізико-хімічних процесів у камері згоряння газової турбіни, що працює на суміші водню і аміаку, ґрунтується на розв'язанні системи диференціальних рівнянь збереження маси, імпульсу та

енергії для багатокомпонентної турбулентної системи, що хімічно реагує [22–25].

У цьому дослідженні для визначення енергетичних та екологічних характеристик камери згоряння газової турбіни використано модель згоряння Eddy Dissipation Concept (EDC), яка поєднує опис турбулентності з детальним урахуванням хімічної кінетики [25] та реалізована в програмному комплексі Ansys Fluent [26]. У межах EDC-підходу вважається, що хімічні реакції відбуваються у локалізованих дрібно-масштабних турбулентних структурах, які інтерпретуються як мікрореактори. Повний опис рівнянь та метод їх розв'язання наведено в [22, 23, 25].

Для коректного опису процесів горіння аміаку та сумішей аміаку з воднем у газотурбінних камерах згоряння ключове значення має вибір адекватного механізму хімічної кінетики. У даній роботі при аналізі окиснення аміаку та формування оксидів азоту використано детальний механізм хімічних реакцій, розроблений проф. Петером Гларборгом (Peter Glarborg) та його співробітниками в Technical University of Denmark (DTU) [27]. Кінетичний механізм містить 150 реакцій з 23 хімічними компонентами: NH_3 , O_2 , H_2O , H_2 , H , NO_2 , NO , N_2O , O , OH , HO_2 , H_2O_2 , NH_2 , NH , N , NNH , N_2H_4 , N_2H_3 , HNNH , H_2NO , HNO , HONO , N_2 .

Механізм Гларборга є одним з найбільш визнаних і широко застосовуваних у сучасних дослідженнях, присвячених горінню аміаку, зокрема в умовах високих температур і тисків, характерних для газотурбінних установок. Він ґрунтується на узагальненні результатів численних експериментальних досліджень у проточних реакторах, реакторах із заданим часом перебування, а також на квантово-хімічних розрахунках елементарних реакцій.

Кінетична схема охоплює детальний опис окиснення NH_3 через утворення проміжних радикалів NH_2 , NH , N , а також їх взаємодію з основними активними частинками киснево-водневої системи (O , H , OH , HO_2). Важливою особливістю механізму є коректний опис шляхів трансформації зв'язаного азоту аміаку в оксиди азоту, зокрема NO , NO_2 та N_2O , що є критичними з точки зору екологічних характеристик процесу горіння.

На відміну від спрощених підходів, механізм Гларборга дозволяє враховувати не лише термічний механізм Зельдовича, але й так звані паливні (fuel-NO) та проміжні механізми, пов'язані з участю нестабільних азотовмісних радикалів NNH , HNO , HONO , NH_2OH . Саме ці шляхи, як показано в роботах DTU, відіграють визначальну роль у формуванні сумарних викидів NO_x при спалюванні аміаку та його сумішей з воднем.

Розрахунки виконано для однієї жарової труби при таких початкових параметрах: витрата повітря 3,3098 кг/с, температура повітря після компресора 759 К; витрати паливної суміші через перший

і другий канали пального залежали від вмісту водню і аміаку в суміші при прийнятій температурі продуктів згоряння за камерою на рівні 1495–1515 К, температура паливної суміші 310 К, тиск у камері згоряння 1,505 МПа.

З урахуванням того, що досліджувана камера згоряння містить 16 жарових труб, числове моделювання виконувалося для симетричного сектору, що відповідає одній шістнадцятій частині повного об'єму камери. Паливна суміш водню та аміаку підводилася до паливкового пристрою, розташованого у фронтальній зоні жарової труби, окремими трубопроводами у два незалежні канали. Подальше підведення палива здійснювалося через систему малорозмірних отворів, виконаних у лопатках внутрішнього та зовнішнього радіально-осьових завихрювачів. У проточних каналах завихрювачів відбувалося інтенсивне перемішування палива з повітрям з формуванням квазіоднорідної паливо-повітряної суміші, яка надалі надходила до первинної зони камери згоряння, де її запалювання забезпечувалося за рахунок теплового впливу рециркуляційних потоків високотемпературних продуктів згоряння.

Просторова дискретизація розрахункової області здійснювалася за допомогою кінцево-різницевої сітки, що складалася з 2,7 млн тетрагедральних комірок, що забезпечує достатню роздільну здатність для аналізу термохімічних процесів.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

З метою встановлення впливу об'ємної частки аміаку в паливній суміші на характеристики робочого

процесу камери згоряння було виконано серію числових розрахунків. На рис. 2 наведено поля температури газу в поздовжніх перерізах камери згоряння для різних значень об'ємного вмісту аміаку в паливі.

Аналіз розподілів температури показує, що при згорянні чистого водню (рис. 2, а) в первинній зоні камери реалізуються максимальні температури, які досягають 2730 К. При цьому початок горіння спостерігається безпосередньо у проточній частині радіально-осьових завихрювачів першого та другого каналів. Такий режим є неприпустимим з точки зору забезпечення ресурсу елементів паливкового пристрою, оскільки наявність зони проскоку полум'я істотно підвищує ризик термічного пошкодження та прогару конструктивних елементів.

Формування зони проскоку полум'я зумовлене високою швидкістю поширення водневого полум'я, яка є наслідком специфічних теплофізичних і кінетичних властивостей водню, зокрема малої молекулярної маси, високої дифузійної здатності та низької енергії активації основних реакцій окиснення.

Додавання аміаку до водню призводить до зниження реакційної спроможності паливної суміші внаслідок зміни її фізико-хімічних властивостей, зокрема зменшення швидкості хімічних реакцій і температури полум'я. Відповідно, можна очікувати, що за певних співвідношень концентрацій водню й аміаку в паливі проскок полум'я в проточну частину радіально-осьових завихрювачів буде усунено. Для досліджених геометричних та режимних параметрів такий ефект спостерігається при об'ємному вмісті аміаку в паливній

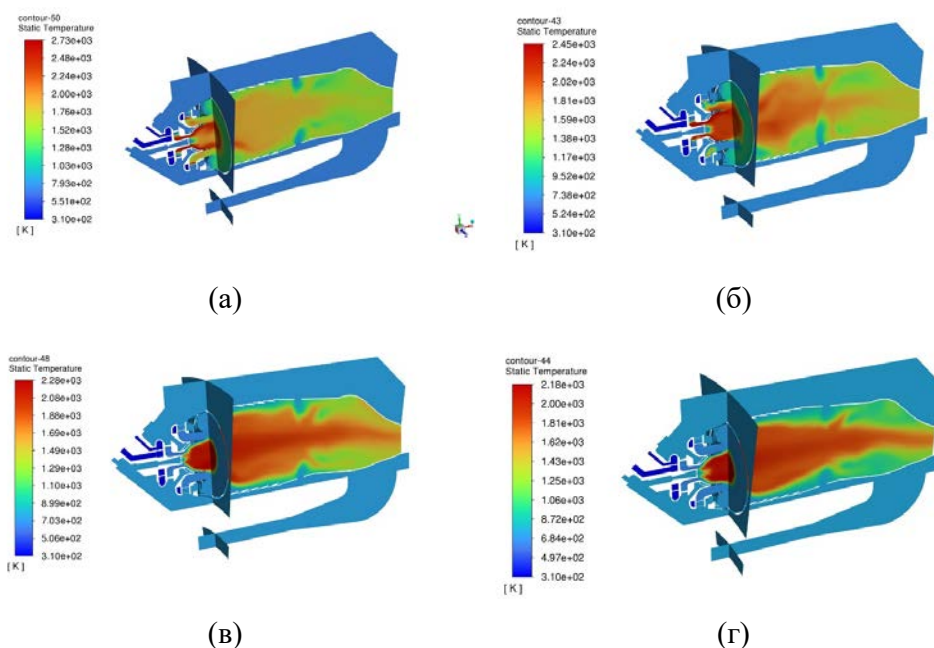


Рис. 2. Контури температури (К) в камері згоряння при різному об'ємному вмісті аміаку в суміші: (а) – 0%; (б) – 40%; (в) – 50%; (г) – 70%

суміші понад 50 % (рис. 2, в). У цьому випадку максимальна температура в зоні горіння зменшується до 2280 К, однак залишається достатньою для забезпечення стабільного горіння воднево-аміачної суміші.

Подальше збільшення частки аміаку в паливі до 70% (рис. 2, г) супроводжується подальшим зниженням максимальної температури в реакційній зоні до 2180 К. Це призводить до неповного вигорання паливної суміші та різкого зменшення температури продуктів згоряння на виході з камери – до 1185 К замість проєктного значення 1500 К. При ще більшому вмісті аміаку стабілізація горіння не забезпечується навіть за наявності розвиненої зони рециркуляції, що в кінцевому підсумку призводить до погасання полум'я.

Зміна температурного поля та положення зони горіння при зростанні вмісту аміаку суттєво впливає на аеродинамічну стабільність полум'я. Зменшення інтенсивності тепловиділення в первинній зоні призводить до ослаблення термохімічного зворотного зв'язку між зоною рециркуляції та фронтом полум'я, що зумовлює звуження діапазону стійких режимів роботи камери згоряння.

На рис. 3 наведено контури масової частки NO в камері згоряння при різному вмісті аміаку в суміші. Для досліджених режимів розрахункова об'ємна концентрація NO на виході з камери згоряння при роботі на воднево-аміачних сумішах із вмістом аміаку 0, 20, 40, 50 та 70% становить відповідно 53,2; 3140; 2500; 1315 та 383 ppm.

Отримані результати свідчать, що додавання аміаку навіть у відносно невеликих кількостях призводить до

різкого зростання викидів оксидів азоту. Це зумовлено складними процесами хімічної трансформації азоту, що міститься в паливі, з утворенням проміжних азотовмісних сполук і подальшим їх окисненням до NO.

Зменшення концентрації NO при 70% аміаку в суміші пояснюється істотним зниженням температури в реакційній зоні та неповнотою згоряння паливної суміші. Розрахунки показують, що мольна частка незгорілого NH_3 у продуктах згоряння на виході з камери досягає 3,1%, що свідчить про значну незавершеність процесів окиснення пального.

На відміну від традиційних вуглеводневих палив, для яких утворення оксидів азоту відбувається переважно за термічним механізмом Зельдовича, у випадку палив, що містять хімічно зв'язаний азот, визначальну роль відіграють реакції перетворення проміжних азотовмісних сполук. У зв'язку з цим у продуктах згоряння воднево-аміачних сумішей фіксуються підвищені концентрації не лише NO, але й таких оксидів, як NO_2 та особливо N_2O .

Розрахункова об'ємна концентрація N_2O на виході з камери згоряння для вмісту аміаку 0, 20, 40, 50 та 70% становить відповідно 0,3; 44; 563; 911 та 592 ppm. Встановлено, що інтенсивне утворення N_2O відбувається переважно в післяполум'яних зонах та зоні розбавлення. При роботі на чистому водні концентрація N_2O на виході з камери є практично нульовою. Зі зростанням частки аміаку в паливній суміші концентрація N_2O істотно збільшується, що узгоджується з механізмами паливного утворення оксидів азоту.

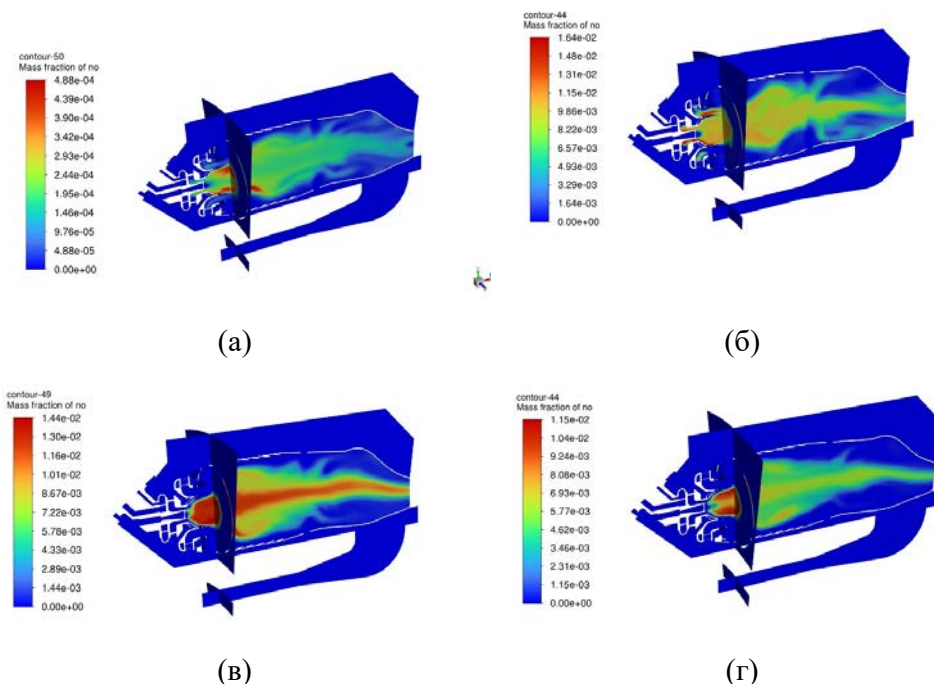


Рис. 3. Контури масової частки NO в камері згоряння при різному об'ємному вмісті аміаку в суміші: (а) – 0%; (б) – 40%; (в) – 50%; (г) – 70%

Зниження концентрації N_2O при 70% аміаку зумовлене неповнотою вигорання паливної суміші та зниженням температур у зоні розбавлення жарової труби, що обмежує перебіг реакцій подальшого окиснення азотовмісних проміжних сполук.

Таким чином, процес утворення оксидів азоту в камері згоряння з попереднім сумішоутворенням у каналах радіально-осьових завихрювачів є надзвичайно чутливим до об'ємного вмісту аміаку в паливній суміші. Проведені числлові дослідження показали, що використання воднево-аміачних сумішей супроводжується значним зростанням сумарних викидів оксидів азоту, зокрема NO та N_2O . Для забезпечення відповідності сучасним екологічним нормативам щодо викидів токсичних компонентів у таких умовах є необхідним застосування методів селективного каталітичного очищення (SCR) вихлопних газів [28].

Отримані закономірності вказують на доцільність оптимізації як складу паливної суміші, так і організації процесу горіння, зокрема за рахунок ступеневого підведення пального, локального збіднення суміші в первинній зоні або рециркуляції продуктів згоряння. Реалізація таких підходів може забезпечити зниження утворення оксидів азоту без втрати стабільності горіння та погіршення енергетичних характеристик камери згоряння.

ВИСНОВКИ

1. Для аналізу впливу об'ємного вмісту аміаку у суміші з воднем на робочий процес камери згоряння ГТД з попереднім сумішоутворенням у каналах радіально-осьових завихрювачів застосовано тривимірну числову модель багатокомпонентної хімічно реагуючої течії, що дозволила комплексно дослідити аеродинамічні, теплові та екологічні характеристики процесу горіння.

2. Розрахунки виконано з використанням детальної кінетичної схеми горіння воднево-аміачної суміші, яка містить 150 елементарних реакцій і 23 хімічні компоненти, що забезпечило адекватне прогнозування температурних полів та утворення оксидів азоту.

3. Встановлено, що згоряння чистого водню супроводжується проскоком полум'я в проточну частину завихрювачів і формуванням локальних зон надвисоких температур, тоді як додавання аміаку понад 50% (об'ємних) усуває проскок полум'я та зменшує рівень максимальних температур у камері згоряння.

4. Застосування воднево-аміачних палив у камерах згоряння з попереднім сумішоутворенням потребує оптимізації організації процесу горіння та використання методів селективного каталітичного очищення вихлопних газів, а подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення області стійкого горіння аміаку.

REFERENCES

- [1] ETN Global. (2020). Hydrogen gas turbines: The path towards a zero-carbon gas turbine. Retrieved February 6, 2022, from <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>
- [2] Nose, M., Kawakami, T., Araki, H., Senba, N., & Tanimura, S. (2018). Hydrogen-fired gas turbine targeting realization of CO₂-free society. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 55(4). <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e554/e554180.pdf>
- [3] Beital, J., Talibi, M., Sadasivuni, S., & Balachandran, R. (2021). Thermoacoustic instability considerations for high hydrogen combustion in lean premixed gas turbine combustors: A review. Hydrogen, 2(1), 33–57. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2010003>
- [4] Tekin, N., Ashikaga, M., Horikawa, A., & Funke, H. (2018). Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. Gas for Energy, 2. Retrieved February 5, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/332290711_Enhancement_of_fuel_flexibility_of_industrial_gas_turbines_by_development_of_innovative_hydrogen_combustion_systems
- [5] Soroka, B. S., Pyanykh, K. E., Zgursky, V. O., Gorupa, V. V., & Kudryavtsev, V. S. (2020). Energy and environmental characteristics of household gas appliances using methane-hydrogen mixture as a fuel gas. Oil and gas industry of Ukraine, 6, 3–13.
- [6] Amaduzzi, R., Ferrarotti, M., & Parente, A. (2021). Strategies for hydrogen-enriched methane flameless combustion in a quasi-industrial furnace. Frontiers in Energy Research. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.590300>
- [7] Cappelletti, A., Martelli, F., Bianchi, E., & Trifoni, E. (2014). Numerical redesign of 100kw MGT combustor for 100% H₂ fueling. Energy Procedia, 45, 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.148>
- [8] Barati, S., De Santoli, L., & Lo Basso, G. (2021). Modeling and analysis of a micro gas turbine fuelled with hydrogen and natural gas blends. E3S Web of Conferences, 312, 08012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131208012>
- [9] Ayed, A. H., Kusterer, K., Funke, H. H. W., Keinz, J., & Bohn, D. (2017). CFD based exploration of the dry-low-NO_x hydrogen micromix combustion technology at increased energy densities. Propulsion and Power Research, 6(1), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2017.01.003>
- [10] Ayed, A. H., Kusterer, K., Funke, H. H. W., & Keinz, J. (2016). CFD based improvement of the DLN hydrogen micromix combustion technology at increased energy densities. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS), 26(3), 290–303.
- [11] Vilag, V., Vilag, J., Carlanescu, R., Mangra, A., & Florean, F. (2019). CFD application for gas turbine combustion simulations. In G. Ji & J. Zhu (Eds.), Computational fluid dynamics. Retrieved February 7, 2022, from <https://www.intechopen.com/chapters/69672>

- [12] Sayed Reza, S., Rahimi, M., Khoshhal, A., & Alsairafi, A. A. (2010). CFD study on hydrogen-air premixed combustion in a micro scale chamber. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 29(4), 161–172.
- [13] Gobbato, P., Masi, M., Toffolo, A., & Lazzaretto, A. (2011). Numerical simulation of a hydrogen fuelled gas turbine combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7993–8002. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.039>
- [14] Attia, M. E. H., Khechekhouche, A., & Driss, Z. (2018). Numerical simulation of methane-hydrogen combustion in the air: Influence on combustion parameters. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(2), 1–8. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i2/119490>
- [15] Oh, J., Kim, I., Im, M., Kang, D., & Cho, S. (2025, September). Investigation of operational strategies of natural gas-hydrogen-ammonia co-fired gas turbine combined cycle in simultaneous consideration of performance and CO₂ emission. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106584. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106584>
- [16] El-Adawy, M., Ismael, M. A., & Nemitallah, M. (2025, October). Numerical investigation of combustion, performance, and emission attributes of premixed ammonia-hydrogen/air flames within a swirl burner of a gas turbine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76, 107287. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107287>
- [17] Liu, Z., Zhang, Y., Li, J., Wang, C., Chen, H., & Wu, Z. (2025). Insights into combustion and emission characteristics of ammonia co-firing with hydrogen-rich gas for gas turbine applications. *Energy*, 324, 135967. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135967>
- [18] Mustafa, L., Al-Halbouni, A., Al-Matar, A., Al-Hunaiti, A., Al-Abdallat, Y., & Abu-Jrai, A. (2025, June). Modeling the thermodynamics of oxygen-enriched combustion in a GE LM6000 gas turbine using CH₄/NH₃ and CH₄/H₂ blends. *Energies*, 18(12), 3221. <https://doi.org/10.3390/en18123221>
- [19] Yu, A., Akhtar, S., Hui, Y., & Yu, J. (2025, March). Heat transfer performance analysis of hydrogen-ammonia combustion in a micro gas turbine for sustainable energy solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 105, 619–631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.281>
- [20] 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 Transactions on Plasma Science*, 44(12), 2960–2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2521340>
- [21] Bondin, Y. N., Krivutsa, V. A., Movchan, S. N., Romanov, V. I., Kolomeev, V. N., & Shevtsov, A. P. (2004). Operation experience of a gas turbine unit GPU-16K with steam injection. *Gas Turbine Technologies*, 5, 18–20.
- [22] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press.
- [23] 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>
- [24] Matveev, I. B., & Serbin, S. I. (2010). Theoretical and experimental investigations of the plasma-assisted combustion and reformation system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(12), 3306–3312. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2077693>
- [25] 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)
- [26] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). ANSYS, Inc., pp. 1-780.
- [27] Glarborg, P. (2023) The NH₃/NO₂/O₂ system: Constraining key steps in ammonia ignition and N₂O formation. *Combustion and Flame*, 257, 112311. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112311>
- [28] Wang, Y., Zhang, H., Li, J., & Chen, X. (2023). Storage-reduction strategy for NO_x reduction from gas turbine exhaust with W–Ti–CeO_x catalyst in natural gas power plants. *Journal of Rare Earths*, 41(6), 933–940. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.11.011>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ETN Global. (2020). Hydrogen gas turbines: The path towards a zero-carbon gas turbine. Retrieved February 6, 2022, from <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>
- [2] Nose, M., Kawakami, T., Araki, H., Senba, N., & Tanimura, S. (2018). Hydrogen-fired gas turbine targeting realization of CO₂-free society. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 55(4). <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e554/e554180.pdf>
- [3] Beital, J., Talibi, M., Sadasivuni, S., & Balachandran, R. (2021). Thermoacoustic instability considerations for high hydrogen combustion in lean premixed gas turbine combustors: A review. *Hydrogen*, 2(1), 33–57. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2010003>
- [4] Tekin, N., Ashikaga, M., Horikawa, A., & Funke, H. (2018). Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. *Gas for Energy*, 2. Retrieved February 5, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/332290711_Enhancement_of_fuel_flexibility_of_industrial_gas_turbines_by_development_of_innovative_hydrogen_combustion_systems
- [5] Soroka, B. S., Pyanykh, K. E., Zgursky, V. O., Gorupa, V. V., & Kudryavtsev, V. S. (2020). Energy and environmental characteristics of household gas appliances using methane-hydrogen mixture as a fuel gas. *Oil and gas industry of Ukraine*, 6, 3-13.
- [6] Amaduzzi, R., Ferrarotti, M., & Parente, A. (2021). Strategies for hydrogen-enriched methane flameless combustion in a quasi-industrial furnace. *Frontiers in Energy Research*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.590300>

- [7] Cappelletti, A., Martelli, F., Bianchi, E., & Trifoni, E. (2014). Numerical redesign of 100kw MGT combustor for 100% H₂ fueling. *Energy Procedia*, 45, 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.148>
- [8] Barati, S., De Santoli, L., & Lo Basso, G. (2021). Modeling and analysis of a micro gas turbine fuelled with hydrogen and natural gas blends. *E3S Web of Conferences*, 312, 08012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131208012>
- [9] Ayed, A. H., Kusterer, K., Funke, H. H. W., Keinz, J., & Bohn, D. (2017). CFD based exploration of the dry-low-NO_x hydrogen micromix combustion technology at increased energy densities. *Propulsion and Power Research*, 6(1), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2017.01.003>
- [10] Ayed, A. H., Kusterer, K., Funke, H. H. W., & Keinz, J. (2016). CFD based improvement of the DLN hydrogen micromix combustion technology at increased energy densities. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 26(3), 290–303.
- [11] Vilag, V., Vilag, J., Carlanescu, R., Mangra, A., & Florean, F. (2019). CFD application for gas turbine combustion simulations. In G. Ji & J. Zhu (Eds.), *Computational fluid dynamics*. Retrieved February 7, 2022, from <https://www.intechopen.com/chapters/69672>
- [12] Sayed Reza, S., Rahimi, M., Khoshhal, A., & Alsairafi, A. A. (2010). CFD study on hydrogen-air premixed combustion in a micro scale chamber. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 29(4), 161–172.
- [13] Gobatto, P., Masi, M., Toffolo, A., & Lazzaretto, A. (2011). Numerical simulation of a hydrogen fuelled gas turbine combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7993–8002. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.039>
- [14] Attia, M. E. H., Khechekhouche, A., & Driss, Z. (2018). Numerical simulation of methane-hydrogen combustion in the air: Influence on combustion parameters. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(2), 1–8. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i2/119490>
- [15] Oh, J., Kim, I., Im, M., Kang, D., & Cho, S. (2025, September). Investigation of operational strategies of natural gas-hydrogen-ammonia co-fired gas turbine combined cycle in simultaneous consideration of performance and CO₂ emission. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106584. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106584>
- [16] El-Adawy, M., Ismael, M. A., & Nemitallah, M. (2025, October). Numerical investigation of combustion, performance, and emission attributes of premixed ammonia-hydrogen/air flames within a swirl burner of a gas turbine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76, 107287. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107287>
- [17] Liu, Z., Zhang, Y., Li, J., Wang, C., Chen, H., & Wu, Z. (2025). Insights into combustion and emission characteristics of ammonia co-firing with hydrogen-rich gas for gas turbine applications. *Energy*, 324, 135967. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135967>
- [18] Mustafa, L., Al-Halbouni, A., Al-Matar, A., Al-Hunaiti, A., Al-Abdallat, Y., & Abu-Jrai, A. (2025, June). Modeling the thermodynamics of oxygen-enriched combustion in a GE LM6000 gas turbine using CH₄/NH₃ and CH₄/H₂ blends. *Energies*, 18(12), 3221. <https://doi.org/10.3390/en18123221>
- [19] Yu, A., Akhtar, S., Hui, Y., & Yu, J. (2025, March). Heat transfer performance analysis of hydrogen-ammonia combustion in a micro gas turbine for sustainable energy solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 105, 619–631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.281>
- [20] 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 Transactions on Plasma Science*, 44(12), 2960–2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2521340>
- [21] Bondin, Y. N., Krivutsa, V. A., Movchan, S. N., Romanov, V. I., Kolomeev, V. N., & Shevtsov, A. P. (2004). Operation experience of a gas turbine unit GPU-16K with steam injection. *Gas Turbine Technologies*, 5, 18–20.
- [22] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*. Academic Press.
- [23] 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>
- [24] Matveev, I. B., & Serbin, S. I. (2010). Theoretical and experimental investigations of the plasma-assisted combustion and reformation system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(12), 3306–3312. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2077693>
- [25] 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)
- [26] ANSYS Fluent Theory Guide. (2013). ANSYS, Inc., pp. 1–780.
- [27] Iarborg, P. (2023) The NH₃/NO₂/O₂ system: Constraining key steps in ammonia ignition and N₂O formation. *Combustion and Flame*, 257, 112311. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112311>
- [28] Wang, Y., Zhang, H., Li, J., & Chen, X. (2023). Storage-reduction strategy for NO_x reduction from gas turbine exhaust with W–Ti–CeO_x catalyst in natural gas power plants. *Journal of Rare Earths*, 41(6), 933–940. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.11.011>

© Сербін С. І., Личко Б. М., Чен Д.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



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