

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).12](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).12)

**POSSIBILITIES OF EFFECTIVE AMMONIA COMBUSTION
IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE ENGINE OPERATING
WITH OVER-EXPANSION TURBINE**

**МОЖЛИВОСТІ ЕФЕКТИВНОГО СПАЛЮВАННЯ АМІАКУ
В КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА
З ТУРБІНОЮ ПЕРЕРОЗШИРЕННЯ**

Serhiy I. Serbin

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Anatolii B. Kolesnykov

tolyamongol74@gmail.com

С. І. Сербін,

докт. техн. наук, професор

А. Б. Колесников,

аспірант

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

Abstract. The need to reduce the impact of energetics on the environment determines the need to develop and adapt energy-efficient decarbonized systems, as well as determine the ranges of their rational parameters. The aim of the work is to study the energy and emission characteristics of gaseous ammonia burning in the combustion chamber of a gas turbine engine with over-expansion. The combustion chamber for the afterburning of waste gases of a high-temperature fuel cell as part of a gas turbine unit with over-expansion was chosen as the object of the investigation. For detailed forecasting of the characteristics of the combustion chamber operating on ammonia, an approach was used, according to which the burning device is considered as a set of different chemical reactors (perfectly stirred, plug-flow), simulating the main processes of chemical transformations in different sections of the flame tube of the combustion chamber. A reactor model of the combustion chamber operating on gaseous ammonia has been developed, in which the relevant reactors simulate the primary zone of the combustion chamber, the dilution zone and the processes of mixing of secondary air, which is supplied to the respective zones, with the main flow. The mathematical model is based on the equations of conservation of mass and energy for a chemically reacting system. As a kinetic scheme of gaseous fuel burning in the combustion chambers of gas turbine engines, the mechanism of high-temperature oxidation of ammonia is used, taking into consideration the chemical reactions of hydrogen combustion, which includes 71 reactions with 22 components. The influence of operational parameters of the combustion chamber on the distribution of temperature and concentrations of chemically reactive components in the volume of the burning device is considered. Calculations of the working process of the combustion chamber were carried out for a thermal power of 1.0 MW, a pressure of 0.3 MPa and at variation of the excess air coefficient from 1.41 to 2.03. The possibility of stable operation of the combustion chamber on ammonia under the conditions of effective swirling of the primary air is shown. At the same time, the residence time of the reagents in the primary combustion zone should exceed 0.025 seconds, which is possible if there are powerful devices for stabilizing combustion. The results of the work can be used in the development of combustion chambers of gas turbine engines for decarbonized energy systems, as well as for afterburning products of solid oxide fuel cells operating as part of hybrid power plants.

Key words: gas turbine engine; combustion chamber; over-expansion turbine; fuel cell; ammonia.

Анотація. Необхідність зменшення впливу енергетики на навколишнє середовище визначає необхідність розробки та адаптації енергоефективних декарбонізованих систем, а також визначення діапазонів їх раціональних параметрів. Метою роботи є дослідження енергетичних і емісійних характеристик процесу горіння газоподібного аміаку в камері згоряння газотурбінного двигуна з перерозширенням. В якості об'єкта дослідження вибрано камеру згоряння для допалювання відхідних газів високотемпературного паливного елемента в складі газотурбінного агрегату з перерозширенням. Для детального прогнозування характеристик камери згоряння, що працює на аміаку, використано підхід, згідно якому паливоспалюючий пристрій розглядається як сукупність різних хімічних реакторів (гомогенних, проточних), що моделюють основні процеси хімічних перетворень в різних ділянках жарової труби камери згоряння. Розроблено реакторну модель камери згоряння, що

працює на газоподібному аміаку, в якій відповідні реактори моделюють первинну зону камери згоряння, зону розбавлення та процеси змішування вторинного повітря, яке подається в відповідні ділянки, з основним потоком. Математична модель ґрунтується на рівняннях збереження маси і енергії для хімічно реагуючої системи. В якості кінетичної схеми горіння газоподібного аміаку в камерах згоряння газотурбінних двигунів використано механізм високотемпературного окиснення аміаку з урахування хімічних реакцій горіння водню, який містить у собі 71 реакцію з 22 компонентами. Розглянуто вплив режимних параметрів камери згоряння на розподіл температури та концентрацій хімічно реагуючих компонентів в об'ємі паливоспалюючого пристрою. Розрахунки робочого процесу камери згоряння проведено для теплової потужності 1,0 МВт, тиску 0,3 МПа та варіюванні коефіцієнта надлишку повітря від 1,41 до 2,03. Показано можливість стабільної роботи камери згоряння на аміаку при умовах ефективного закручення первинного повітря. При цьому час перебування реагентів у первинній зоні камери має перевищувати 0,025 с., що можливо при наявності потужних пристроїв для стабілізації горіння. Результати роботи можуть бути використані при розробці камер згоряння газотурбінних двигунів для декарбонізованих енергетичних систем, а також при організації допалювання продуктів твердооксидних паливних елементів, що працюють в складі гібридних енергетичних установок.

Ключові слова: газотурбінний двигун; камера згоряння; турбіна перерозширення; паливний елемент; аміак.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Необхідність виконання вимог законодавчих актів міжнародних організацій щодо зниження впливу енергетики на навколишнє середовище визначає запит практики, спрямований на розробку та адаптацію енергоефективних декарбонізованих систем, а також визначення діапазонів їх досяжних параметрів. Ці параметри повинні забезпечувати вирішення проблеми підвищення ефективності використання палив за рахунок комплексного впровадження новітніх методів перетворення енергії та ресурсів, мінімізацію викидів CO₂ та інших шкідливих речовин в навколишнє середовище. Аміак розглядається як перспективне паливо для різних теплових двигунів: газових турбін, в тому числі для газотурбінних двигунів з перерозширенням, двигунів внутрішнього згоряння, паливних елементів та ін. Відмітимо, що хімічні реакції аміаку у повітрі відбуваються значно повільніше, ніж при використанні звичайних органічних палив. Тому створення перспективних камер згоряння, що працюють на аміаку та забезпечують декарбонізацію газотурбінних енергетичних систем, є актуальним.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аміак варто розглядати як перспективне паливо через його потенціал для забезпечення життєздатної заміни вуглеводнів як основного енергетичного вектора економіки. Аміак містить майже 18 % водню за масою і його можна використовувати як ефективну сполуку-носії при виробництві електроенергії [1]. В огляді [2] представлено результати досліджень щодо використання «зеленого» аміаку як альтернативного палива для теплових двигунів. Аміак виглядає більш привабливим для застосування в суднових або стаціонарних двигунах, де нестача місця не є критичною. Визначено, що аміак має чудовий потенціал для того, щоб відігравати

важливу роль в якості екологічного палива в майбутньому як для модернізованих, так і для нових теплових двигунів.

Великі перспективи має напрямок, пов'язаний зі спільним спалюванням аміаку і інших видів органічних палив. В роботі [3] проведено дослідження, що описує результати спільного спалювання аміаку (до 20 %) з природним газом при вихідній тепловій потужності установки 2 МВт, а в роботі [4] – результати експериментів зі спільного спалювання аміаку (до 0,8 %) з вугіллям при тепловій потужності 156 МВт, що відбувався без втрати ефективності та зі зменшенням викидів вуглекислого газу.

З пристроями для спалювання аміаку проведено ряд експериментів і випробувань, в тому числі і в промислових масштабах, для підвищення їх ефективності з метою виробництва електроенергії без викидів діоксиду вуглецю. Наприклад, у 2021 році Mitsubishi Power оголосила, що працює над газовою турбіною потужністю 40 МВт, призначеною для роботи виключно на аміаку, і планує комерціалізувати цю систему до 2025 року [5].

Незважаючи на те, що інфраструктура виробництва та транспортування аміаку існує десятиліттями, спалювання створює деякі невирішені завдання, які вимагатимуть постійної оцінки та інновацій. При окисненні в повітрі чистий аміак важко запалити, бо він має низьку швидкість поширення полум'я порівняно з вуглеводнями, що вимагає нових методів ефективного ініціювання та стабілізації. В роботі [6] показано, що збільшення тиску в камері приводить до зменшення часу затримки займання, хоча швидкість полум'я також зменшується. Для нівелювання низької швидкості поширення полум'я необхідні заходи з ефективного перемішування та закручення потоків в камері згоряння для збільшення часу перебування палива в зоні горіння.

Подальші труднощі виникають через утворення значної кількості оксидів азоту NO_x під час окиснення

аміаку. Ряд проведених досліджень показали можливість зменшення емісії оксидів азоту використанням як спеціальних присадок, так і за рахунок організації багатоступеневого спалювання аміаку [7-8].

Для підвищення показників ефективності газотурбінних установок використовують різні напрямки ускладнення теплових схем, одним з яких є цикл з перерозширенням [9]. За рахунок установки допоміжного ексгаустера досягається зменшення тиску в камері згоряння та підвищення питомих показників установок.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРИШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз останніх досліджень і напрямків використання аміаку в якості палива для газотурбінних двигунів виявив невирішені питання, які впливають з фізико-хімічних властивостей аміаку як пального, а саме: недостатня ефективність процесів спалювання аміаку в високофорсованих камерах згоряння ГТД, можливість погасання полум'я та зриву факела при зростанні швидкості потоку, можливість утворення високих концентрацій оксидів азоту на виході. Дана стаття присвячена розв'язанню науково-практичного завдання підвищення ефективності спалювання газоподібного аміаку в камерах газотурбінних двигунів.

Метою роботи є теоретичні дослідження характеристик процесу горіння газоподібного аміаку в камері згоряння газотурбінного двигуна з перерозширенням.

В якості **об'єкта дослідження** вибрано робочі процеси в камері згоряння для допалювання відхідних газів високотемпературного паливного елемента в складі газотурбінного агрегату з перерозширенням [9]. **Предмет дослідження** – закономірності вигорання газоподібного аміаку в камері згоряння газотурбінного двигуна при різних режимних параметрах.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Зазначимо, що останнім часом з метою детально прогнозування характеристик камер згоряння ГТД посилено розвивається підхід [10, 11], згідно з яким камера розглядається як сукупність різних хімічних реакторів. Найчастіше камера згоряння газотурбінного двигуна представляється у вигляді ряду послідовно і паралельно розташованих гомогенних і проточних реакторів.

Для гомогенного реактора (ГР), або реактора ідеального змішування, характерне повне вирівнювання всіх параметрів, що характеризують процес, в об'ємі реактора. У проточному реакторі (ПР), або реакторі ідеального витіснення, реагенти переміщуються аналогічно твердому поршню, причому по довжині реактора встановлюється певний розподіл концентрацій компонентів, температури та інших параметрів відповідно до особливостей кінетичного механізму та фізичних явищ, що його супроводжують. В адіабатичному змішувачі (АЗ) відбуваються процеси перемішування компонентів без протікання хімічних реакцій.

На рис. 1 показано розроблену реакторну модель камери згоряння, що працює на аміаку. Відповідні реактори моделюють первинну зону камери згоряння, зону розбавлення та процеси змішування вторинного повітря, яке подається в відповідні зони.

Гомогенний реактор ГР моделює процеси окиснення аміаку в первинній зоні камери згоряння. Продукти ГР направляються в адіабатний змішувач АЗ, де в умовах відсутності підведення або відведення теплоти організується їх змішування з часткою первинного повітря, що подається через перший ряд отворів жарової труби. Проточні реактори ПР моделюють процеси хімічного реагування у зоні розбавлення, змішувачу жарової труби і вихідному соплі камери. Повітря на розбавлення продуктів згоряння після первинної зони подається через адіабатний змішувач АЗ.

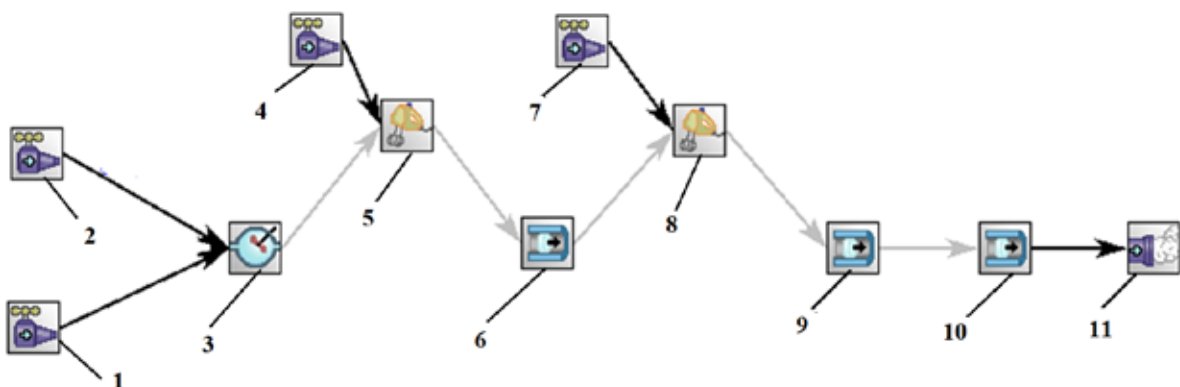


Рис. 1. Реакторна модель камери згоряння, що працює на аміаку: 1 – підведення аміаку; 2 – підведення повітря через завихрювач; 3 – ГР первинної зони камери; 4 – підведення повітря в первинну зону; 5 – АЗ; 6 – ПР зони розбавлення; 7 – підведення повітря в зону розбавлення; 8 – АЗ; 9 – ПР змішувача жарової труби; 10 – ПР вихідного сопла; 11 – вихід камери згоряння

Розглянемо особливості математичного опису всіх типів реакторів розробленої моделі камери згоряння. Процеси в гомогенних реакторах (ГР) моделюються з використанням рівнянь збереження маси і енергії для хімічно реагуючої системи. На практиці таким реакторам властиві всілякі геометричні конфігурації та схеми вхідних та вихідних каналів, які використовуються для якісного перемішування компонентів. При цьому температура і компонентний склад продуктів всередині об'єму реактора та на його виході однакові, а масова витрата суміші через реактор постійна.

Балансове рівняння утворення та розкладання хімічних компонентів має вигляд [11]:

$$\frac{dY_k}{dt} = -\frac{1}{\tau}(Y_k - Y_k^*) + \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho}, \quad (1)$$

де Y_k – масова частка k -го компонента; t – час; τ – час перебування суміші в Y_k об'ємі реактора; Y_k^* – масова частка компонентів на вході з реактора; $\dot{\omega}_k$ – ступінь утворення (розкладання) k -ої частинки в одиниці об'єму в результаті хімічної реакції; W_k – молекулярна вага k -го компонента; ρ – масова густина суміші.

Умовний час перебування компонентів в ГР знаходиться за залежністю

$$\tau = \frac{\rho V}{\dot{m}},$$

а масова густина суміші

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT},$$

де p – тиск в реакторі; \bar{W} – середня молекулярна вага суміші; R – універсальна газова стала; T – температура суміші.

Балансове рівняння енергії для гомогенного реактора записується таким чином:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K (Y_k h_k - Y_k^* h_k^*) - \frac{Q}{\rho V}, \quad (2)$$

де h – усереднена ентальпія суміші; K – загальна кількість хімічних компонентів в реакції; h_k та h_k^* – питома ентальпія k -го компонента в об'ємі та на вході з реактора; Q – теплові втрати у реакторі.

Так як усереднена ентальпія суміші в реакторі

$$h = \sum_{k=1}^K h_k Y_k, \text{ то}$$

$$\frac{dh}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} + \sum_{k=1}^K h_k \frac{dY_k}{dt}. \quad (3)$$

Тут $c_p = \sum_{k=1}^K Y_k c_{p,k}$ – питома теплоємність суміші при постійному тиску; $c_{p,k}$ – питома теплоємність k -го компонента при постійному тиску.

Об'єднавши рівняння (1)–(3), отримаємо наступний запис балансового рівняння перенесення хімічних компонентів

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^K Y_k^* (h_k^* - h_k) - \sum_{k=1}^K \frac{h_k \dot{\omega}_k W_k}{\rho} - \frac{Q}{\rho V}. \quad (4)$$

Алгоритм розв'язання системи «жорстких», нелінійних диференціальних рівнянь (4) для кращої ітераційної збіжності вимагає завдання рівноважного стану системи, що хімічно реагує, як початкове наближення. Рівноважний стан компонентів системи обчислюється шляхом мінімізації функції вільної енергії Гіббса при заданій температурі [11].

Процеси в адіабатних змішувачах (АЗ) розраховуються виходячи з допущення про їх ідеальну теплоізоляцію. Масова частка хімічних компонентів при змішуванні двох різних газів 1 та 2

$$Y_k = \frac{(Y_k \dot{m})_1 + (Y_k \dot{m})_2}{\dot{m}},$$

де сумарна масова витрата $\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$.

Ентальпія суміші у результаті змішування в поточці знаходиться за залежністю

$$h = \frac{(c_p T)_1 \dot{m}_1 + (c_p T)_2 \dot{m}_2}{\dot{m}},$$

а температура суміші

$$T = h / c_p,$$

де питома теплоємність суміші при постійному тиску у першому наближенні розраховується як функція масового складу суміші і середньої температури $\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2$ і далі уточнюється для обчисленого значення температури суміші.

Розрахунок процесів хімічного реагування в проточних реакторах (ПР) полягає у прогнозуванні зміни стану гомогенної хімічно реагуючої газової суміші з початковими значеннями концентрацій компонентів та температури в закритій системі протягом певного часу перебування.

Зазначимо, що індивідуальні речовини утворюються та розкладаються відповідно до рівняння

$$\frac{dm_k}{dt} = V \dot{\omega}_k W_k,$$

причому об'єм системи V може змінюватись у часі.

Оскільки загальна маса системи стала, то рівняння матеріального балансу компонентів має вигляд:

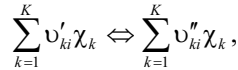
$$\frac{dY_k}{dt} = v \dot{\omega}_k W_k, \quad (5)$$

де $v = V / m$ – питомий об'єм, а масова частка k -го компонента $Y_k = m_k / m$.

Для повного опису процесів в ПР рівняння (5) необхідно доповнити рівнянням збереження енергії. Рівняння збереження енергії виглядатиме так:

$$c_p \frac{dT}{dt} + v \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k W_k = 0. \quad (6)$$

Розглянемо I елементарних зворотних (або незворотних) реакцій, що містять K хімічних компонентів, які записані в наступній формі:



де ν_{ki} – стехіометричні коефіцієнти реакцій; χ_k – хімічний символ k -го компонента.

Зазначимо, що в якості кінетичної схеми розрахунку процесів спалювання аміаку в камерах згоряння газотурбінних двигунів може бути рекомендований механізм високотемпературного окиснення аміаку [12] з урахування хімічних реакцій горіння водню [13], який містить у собі 71 реакцію з 22 компонентами: $\text{NH}_3, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{H}, \text{O}, \text{OH}, \text{HO}_2, \text{H}_2\text{O}_2, \text{NO}, \text{NO}_2, \text{N}_2\text{O}, \text{HNO}, \text{HONO}, \text{H}_2\text{NO}, \text{N}, \text{NNH}, \text{NH}_2, \text{NH}, \text{HONO}_2, \text{AR}, \text{N}_2$.

Швидкість утворення (розкладання) k -го компонента може бути визначена підсумовуванням відповідних змінних для всіх елементарних хімічних реакцій, що містять цей компонент:

$$\dot{\omega}_k = \sum_{i=1}^I \nu_{ki} q_i,$$

де $\nu_{ki} = (\nu''_{ki} - \nu'_{ki})$; q_i – коефіцієнт розвитку i -ої хімічної реакції.

Значення q_i знаходиться з виразу

$$q_i = k_{fi} \prod_{k=1}^K [X_k]^{\nu'_{ki}} - k_{ri} \prod_{k=1}^K [X_k]^{\nu''_{ki}},$$

де k_{fi}, k_{ri} – константи швидкості прямої і зворотної i -ї реакції; $[X_k]$ – мольна концентрація k -го компонента.

Константа швидкості i -ї прямої реакції в загальному випадку знаходиться із співвідношення Арреніуса

$$k_{fi} = A_i T^{\beta_i} \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right),$$

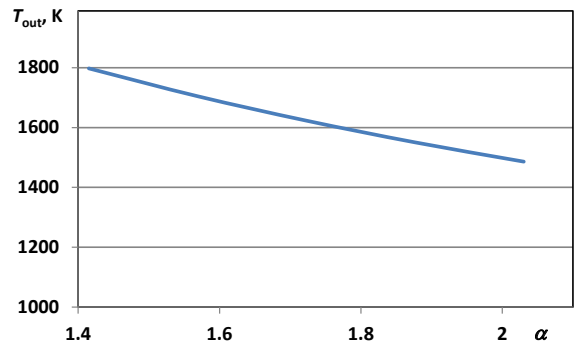
де A_i – передекспоненційний множник; β_i – температурний експонент; E_i – енергія активації.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

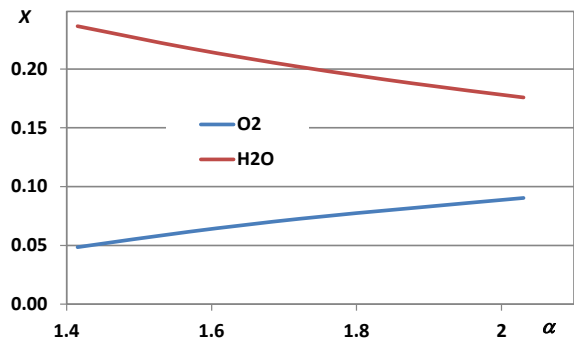
Для попередньої оцінки параметрів камери згоряння газотурбінного двигуна проведено кінетичні розрахунки горіння аміаку в повітрі. Розрахунки проводились з використанням теорії гомогенних та проточних реакторів. Для цього використано комп'ютерний комплекс ANSYS Chemkin [14].

Залежності температури продуктів згоряння, мольних часток X компонентів $\text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$ та оксидів азоту на виході з камери від сумарного коефіцієнта надлишку повітря α наведено на рис. 2.

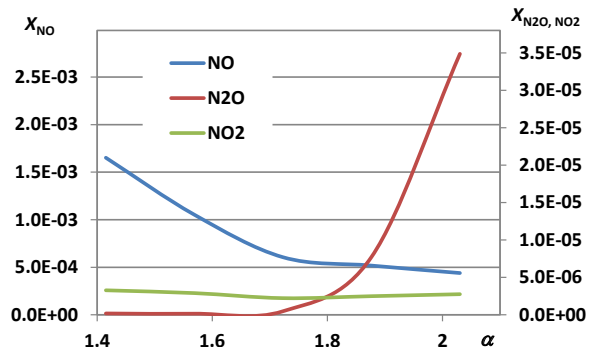
Видно, що температура продуктів згоряння падає, концентрація кисню монотонно зростає, а концентрація



(a)



(б)



(в)

Рис. 2. Залежності температури продуктів (а), мольних часток O_2 і H_2O (б) та оксидів азоту (в) на виході камери від коефіцієнта надлишку повітря

ція водяної пари зменшується зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря (витрати повітря через камеру). Концентрація оксиду азоту NO максимальна при мінімальному коефіцієнті надлишку повітря ($\alpha = 1,41$) в камері згоряння, а потім поступово знижується за рахунок змішування повітря з продуктами згоряння аміаку у зоні розбавлення. Також відзначимо збільшення вмісту оксиду N_2O зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря.

Залежності мольних часток аміаку NH_3 від коефіцієнта надлишку повітря в первинній зоні α_1 , а також від часу перебування реагентів в первинній зоні камери згоряння τ_1 наведено на рис. 3. Зі збільшенням

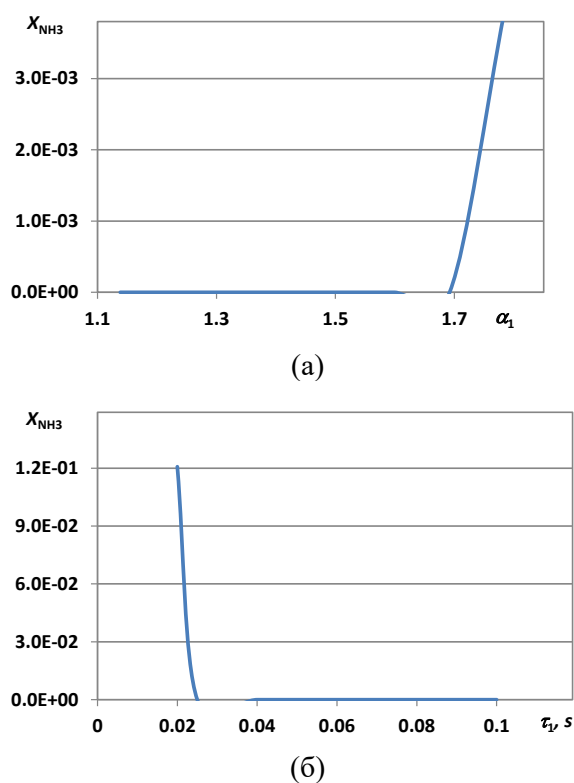


Рис. 3. Залежності мольних часток NH_3 від коефіцієнта надлишку повітря в первинній зоні (а) та часу перебування реагентів в первинній зоні (б)

коефіцієнта надлишку повітря в первинній зоні більше, ніж 1,7 процес горіння аміаку різко погіршується і полум'я перестає поширюватися.

Поширення полум'я аміаку практично завершується при часі перебування реагентів в первинній зоні більшим, ніж 0,025 с. Це говорить про необхідність підвищення інтенсивності закручення повітря, що

проходить крізь лопатковий завихрювач, або використання додаткових стабілізаторів та ініціаторів горіння. В цілому, в дослідженій камері згоряння аміак стабільно вигоряє в достатньо широкому діапазоні визначальних параметрів, що дає змогу проєктувати та випробувати перспективні зразки камер згоряння газотурбінних двигунів з метою їх декарбонізації.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено реакторну модель камери згоряння газотурбінного двигуна з турбіною перерозширення, що працює на газоподібному аміаку, в якій відповідні гомогенні та проточні реактори, а також адіабатичні змішувачі моделюють основні локальні зони камери. Математична модель ґрунтується на рівняннях збереження маси і енергії для хімічно реагуючої системи.

2. В якості схеми горіння газоподібного аміаку в камерах згоряння ГТД використано кінетичний механізм високотемпературного окиснення аміаку та водню, який містить у собі 71 реакцію з 22 компонентами.

3. Розглянуто вплив режимних параметрів камери згоряння на розподіл температури та концентрацій хімічно реагуючих компонентів в об'ємі паливоспалюючого пристрою при тиску 0,3 МПа, зміні коефіцієнта надлишку повітря від 1,41 до 2,03.

4. Показано можливість стабільної роботи камери згоряння тепловою потужністю 1,0 МВт. Для організації стійкого горіння аміаку час перебування реагентів у первинній зоні горіння має перевищувати 0,025 с, що забезпечується інтенсивним закрученням первинного повітря.

5. Необхідні подальші експериментальні та теоретичні дослідження робочого процесу камери згоряння газотурбінного двигуна, що працює на аміаку, з метою визначення та оптимізації її емісійних характеристик.

REFERENCES

- [1] Boerner, K.K. (2019) Industrial ammonia production emits more CO₂ than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that. *Chemical & Engineering News*, vol. 97, no. 24.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Mitsubishi Power. (2022) Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system. Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025. Available: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>.
- [6] Mathieu, O., Petersen, E.L. (2015) Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of ammonia and related NO_x chemistry. *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 3, pp. 554-570.
- [7] 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*, vol. 37, no. 4, pp. 4597-4606.
- [8] 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.

- [9] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., Dzida, M., Chen, D. (2022) Application analysis of a hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine system for marine power plants. *Ships and Offshore Structures*, vol. 17(4), pp. 866–876.
- [10] Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A. (1989) Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. *Sandia Report SAND89-8009B*, 127 p.
- [11] Lutz, A.E., Kee, R.J., Miller, J.A. (1987) SENKIN: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis. *Sandia Report SAND87-8248*, 32 p.
- [12] Xiao, H., Valera-Medina, A., Bowen, P.J. (2017) Modeling Combustion of Ammonia/Hydrogen Fuel Blends under Gas Turbine Conditions. *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 8, pp. 8631-8642.
- [13] Connaire, M.O., Curran, H.J., Simmie, J.M., Pitz, W.J., Westbrook, C.K. (2004) A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation. *International Journal of Chemical Kinetics*, vol. 36, pp. 603-622.
- [14] Chemkin Theory Manual (2016). Available: https://personal.ems.psu.edu/~radovic/ChemKin_Theory_PaSR.pdf.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Boerner, K.K. (2019) Industrial ammonia production emits more CO₂ than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that. *Chemical & Engineering News*, vol. 97, no. 24.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Mitsubishi Power. (2022) Mitsubishi Power commences development of world's first ammonia-fired 40MW class gas turbine system. Targets to expand lineup of carbon-free power generation options, with commercialization around 2025. Available: <https://power.mhi.com/news/20210301.html>.
- [6] Mathieu, O., Petersen, E.L. (2015) Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of ammonia and related NO_x chemistry. *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 3, pp. 554-570.
- [7] 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*, vol. 37, no. 4, pp. 4597-4606.
- [8] 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.
- [9] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., Dzida, M., Chen, D. (2022) Application analysis of a hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine system for marine power plants. *Ships and Offshore Structures*, vol. 17(4), pp. 866–876.
- [10] Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A. (1989) Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. *Sandia Report SAND89-8009B*, 127 p.
- [11] Lutz, A.E., Kee, R.J., Miller, J.A. (1987) SENKIN: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis. *Sandia Report SAND87-8248*, 32 p.
- [12] Xiao, H., Valera-Medina, A., Bowen, P.J. (2017) Modeling Combustion of Ammonia/Hydrogen Fuel Blends under Gas Turbine Conditions. *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 8, pp. 8631-8642.
- [13] Connaire, M.O., Curran, H.J., Simmie, J.M., Pitz, W.J., Westbrook, C.K. (2004) A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation. *International Journal of Chemical Kinetics*, vol. 36, pp. 603-622.
- [14] Chemkin Theory Manual (2016). Available: https://personal.ems.psu.edu/~radovic/ChemKin_Theory_PaSR.pdf.

© С. І. Сербін, А. Б. Колесников

Дата надходження статті до редакції: 05.04.2023

Дата затвердження статті до друку: 10.04.2023