

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.1\(494\).8](https://doi.org/10.15589/znп2024.1(494).8)

STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE EXHAUST GAS AFTERBURNER OF THE SOLID OXIDE FUEL CELL

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОПАЛЮВАЧА ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ТВЕРДООКСИДНОГО ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА

Serhiy I. Serbin

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Oleksii V. Patlaichuk

alexpatlaichuk@gmail.com

ORCID: 0009-0008-0887-1173

С. І. Сербін,

д-р техн. наук, професор

О. В. Патлайчук,

аспірант

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

Abstract. The article is devoted to the analysis of the efficiency of the afterburner of waste gases of solid oxide fuel cells, which is located in front of the gas turbine and serves to organize the combustion of residual combustible components at the exit from the anode section. The afterburner is an important element of the ship's hybrid power system, which includes a solid oxide fuel cell and a gas turbine (SOFC-GT), which is necessary to utilize the heat of waste gases and increase the efficiency of the system as a whole. The purpose of the work is to analyze the efficiency of the afterburner of solid oxide fuel cells exhaust gases by the method of three-dimensional modeling. In contrast to previous studies, the promising use of an afterburner of the ejection type in the combustion of waste gases with a low calorific value of combustible components and a high content of water vapor has been proven. Theoretical studies of the working process of burning of the combustible components of waste gases of fuel cells in the ejection type afterburner have been carried out. Three-dimensional calculations of the parameters of the combustion device, carried out on the basis of the developed model of turbulent reacting flows, made it possible to determine the main directions of increasing its efficiency in conditions of low calorific value of waste gases. These calculations showed the potential of using the proposed waste gas combustion technology in SOFC-GT ship power systems. The obtained results determined scientifically based directions for improving the efficiency of promising energy systems with fuel cells and gas turbines, expanded the understanding of the processes that occur during afterburning of waste gases. This will make it possible to develop and create highly efficient decarbonized energy systems for ship and stationary purposes.

Key words: afterburner; hybrid energy system; solid oxide fuel cell; gas turbine.

Анотація. Стаття присвячена аналізу ефективності допалювача відхідних газів твердооксидних паливних елементів, який розташований перед газовою турбіною і служить для організації спалювання залишків горючих компонентів на виході з анодної секції. Допалювач є важливим елементом суднової гібридної енергетичної системи, що містить твердооксидний паливний елемент і газову турбіну (SOFC-GT), яка необхідна для утилізації теплоти відхідних газів і підвищення ефективності роботи системи в цілому. Метою роботи є аналіз ефективності роботи допалювача відхідних газів твердооксидних паливних елементів методом тривимірного моделювання. На відміну від попередніх досліджень доведено перспективність використання допалювача ежекторного типу при спалюванні відхідних газів з низькою теплотворною здатністю горючих компонентів і високим вмістом водяної пари. Проведено теоретичні дослідження процесу спалювання горючих складових відхідних газів паливних елементів в допалювачі ежекторного типу. Тривимірні розрахунки параметрів паливоспалюючого пристрою, проведені на основі розробленої моделі турбулентних реагуючих потоків, дозволили визначити основні напрями підвищення їх ефективності в умовах низької теплотворної здатності відхідних газів. Ці розрахунки показали потенціал використання запропонованої технології спалювання відхідних газів в суднових енергетичних системах SOFC-GT. Отримані результати визначили науково обґрунтовані напрямки підвищення ефективності перспективних енергетичних систем з паливними елементами та газовими турбінами, розширили уявлення про процеси, які відбуваються при допалюванні відхідних газів. Це дасть змогу розробити та створити високоефективні декарбонізовані енергетичні системи суднового та стаціонарного призначення.

Ключові слова: допалювач; гібридна енергетична система; твердооксидний паливний елемент; газова турбіна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Використання твердооксидних паливних елементів в складі гібридних суднових енергетичних систем є актуальним питанням. В таких системах основні перетворення енергії відбуваються в паливних елементах, де мають місце електрохімічні процеси, а утилізація теплоти їх відхідних газів здійснюється в газових турбінах. В твердооксидному паливному елементі робоча температура підтримується в діапазоні 873-1373 К, тому це дозволяє встановлювати на виході газову турбіну для додаткового генерування електричної енергії. Подібні цикли конкурентоспроможні в порівнянні з традиційними гібридними циклами, що містять газову турбіну та котел-утилізатор, оскільки їх електрична ефективність становить біля 70 % і вище.

Допалювач (камера згоряння) в гібридній системі SOFC-GT використовується після стеків паливних елементів для допалювання залишкового палива (зазвичай коефіцієнт утилізації палива в SOFC становить близько 80 %). Допалювач повинен бути спеціально розроблений для такої гібридної системи. Звичайні серійні камери згоряння газотурбінних двигунів не можуть бути використані безпосередньо в таких системах без їх модифікацій, оскільки паливна суміш після SOFC має дуже низьку теплотворну здатність, а повітря, яке використовується в якості окиснювача, має менший вміст кисню порівняно з атмосферним повітрям. Таким чином, камеру згоряння потрібно спеціально конструювати (модифікувати) для використання в складі SOFC-GT системи. Ще одним обмеженням є необхідність стабільної роботи камери в широкому діапазоні навантажень з низькими виходами токсичних компонентів.

Проведені попередні дослідження технологій низькоемісійного спалювання палив в енергетичних системах дозволили вибрати основні напрямки підвищення їх стабільності в умовах низьких значень теплотворної здатності газоподібних палив різного складу і показали можливість застосування в системах SOFC-GT технологій спалювання частково перемішаних збіднених паливно-повітряних сумішей за умови використання інтенсифікаторів горіння.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В гібридних системах SOFC-GT газова турбіна термодинамічно зв'язана з твердооксидним паливним елементом і працює за рахунок утилізації теплоти його відхідних газів [1–3].

Виходячи з аналізу можливостей вдосконалення енергетичних систем з паливними елементами і газовими турбінами, в роботах [4–5] розроблено схему судової електростанції, що використовує стеки твердооксидних паливних елементів в комплексі з контактним газотурбінним агрегатом, який працює з перерозширенням.

Для комплексу SOFC-GT прийнято складну схему газотурбінної частини, що працює з перерозширенням, в якій реалізується цикл з впорскуванням водяної пари в допалювач. Така схема дозволяє знизити до прийнятних значень величину тиску в корпусі стеку SOFC і істотно підвищити ККД гібридної електростанції.

Особливістю роботи допалювача в такій системі є потреба в організації стійкого горіння відхідних газів твердооксидного паливного елемента в умовах не тільки низької теплотворної здатності цих газів, але й додаткового впорскування водяної пари, що збільшує вірогідність погасання полум'я без додаткових засобів інтенсифікації процесів перемішування і згоряння.

Проведений аналіз наявної літератури показав, що на сьогоднішній час існують реальні можливості організації ефективного спалювання низькокалорійних газів в допалювачах. Запропоновано різноманітні їх конструктивні форми і засоби інтенсифікації [6–8]. Проведено CFD-розрахунки процесів вигорання відхідних газів паливних елементів в пористих пальниках в умовах попереднього перемішування, в системах спалювання, аналогічних камерам згоряння ГТД, в каталітичних опалювачах, тощо. Точність результатів моделювання досліджувався шляхом порівняння з експериментальним даних [9–11]. Однак до сих пір існують серйозні проблеми, пов'язані з недостатньою стійкістю роботи допалювачів на основних режимах роботи системи SOFC-GT.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений аналіз останніх досліджень та напрямків використання допалювачів відхідних газів твердооксидних паливних елементів показав, що існують невирішені питання, які пов'язані як з особливостями експлуатації допалювачів в складі систем SOFC-GT, так і недосконалістю організації робочих процесів в самих камерах допалювання, пов'язаних з низькою теплотворною здатністю відхідних газів та великої кількості водяної пари, яка впорскується в паливоспалюючий пристрій.

У даній статті методом числового моделювання проводяться теоретичні дослідження ефективності допалювання відхідних газів твердооксидних паливних елементів, які працюють в складі гібридної судової енергетичної установки з контактним газотурбінним агрегатом з перерозширенням.

Метою роботи є дослідження ефективності допалювання відхідних газів паливних елементів судової гібридної енергетичної системи, що складається з твердооксидних паливних елементів і газової турбіни з перерозширенням.

В якості **об'єкта дослідження** вибрано робочі процеси в допалювачі ежекторного типу судової гібридної системи для виробництва електричної та

теплової енергії. **Предмет дослідження** – закономірності процесів змішування та турбулентного горіння низькокалорійних відхідних газів твердооксидного паливного елемента.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Важливим кроком до використання суднових енергетичних систем SOFC-GT є модифікація допалювачів (камер згоряння) для спалювання термохімічних продуктів, що утворюються в стеках твердооксидних паливних елементів. Для визначення раціональних технологій допалювання важливе значення має використання 3D CFD аналізу робочих процесів. При розробці моделі хімічно реагуючих турбулентних течій в допалювачі прийнято, що вона повинна містити серію підмоделей для найважливіших фізико-хімічних процесів, таких як утворення горючої суміші, турбулентне перенесення компонентів і їх горіння в присутності великої кількості водяної пари.

Розроблено математичну модель допалювача відхідних газів твердооксидних паливних елементів на основі розв'язування системи рівнянь, що описує конвективний і дифузійний перенос концентрацій для кожного з компонентів реагуючої суміші. Детальний опис моделі наведено в [12–15].

Запропонована математична модель заснована на рівняннях нерозривності, збереження кількості руху, збереження енергії, переносу хімічних компонентів суміші, а також рівняннях моделі турбулентності:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) &= S_m; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_{st}) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) &= -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_h; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) &= -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon, \end{aligned}$$

де ρ – масова густина потоку; $\vec{v}$ – вектор локальної швидкості потоку; S_m – джерельний член, який визначає масу, привнесу в потік будь-яким способом; p – статичний тиск; $\rho \vec{g}$ – гравітаційна сила; $\vec{F}$ – зовнішні сили; $\vec{\tau}$ – тензор тисків; E – внутрішня енергія; Y_i – масова концентрація хімічного компонента i ; $\vec{J}_i$ – густина теплового потоку суміші; $\vec{J}_j$ – густина дифузійного теплового потоку j -го компонента суміші; S_h – джерельний член, що описує тепловиділення в результаті хімічних реакцій; S_i – рівень додаткового утворення i -го компонента із дисперсної фази чи інших джерел; $\vec{J}_i$ – масова дифузія i -го компонента; R_i – рівень утворення i -го компонента в результаті хімічної реакції; i, j, k – одиничні вектори у напрямі x, y, z ; t – час; ρ – масова густина суміші; k і ϵ – кінетична енергія турбулентності і питома швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності; μ_{eff} – коефіцієнт

ефективної в'язкості; G_k – генерація турбулентної кінетичної енергії в залежності від градієнтів усереднених швидкостей; G_b – генерація турбулентної кінетичної енергії в результаті дії сил плавучості; Y_M – внесок пульсаційного розширення для стислих потоків; величини α_k і α_ϵ – зворотні значенням ефективного числа Прандтля для k і ϵ відповідно; S_k і S_ϵ – джерельні члени; $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ – емпіричні константи моделі турбулентності.

При проведенні розрахунків використано схему горіння хімічних реагентів kee58, запропоновану в [16]. Вона містить 58 хімічних реакцій з 18 хімічними компонентами: CH_4 , H_2 , CO , O_2 , H_2O , CO_2 , H , O , OH , HO_2 , CH_3 , HCO , CH_2 , CH , CH_2O , H_2O_2 , N , N_2 .

Так як кінетичний механізм для спалювання вихлопного газу містить велику кількість реакцій, то для своєї числової реалізації потребує модель горіння, яка в змозі прогнозувати особливості хімічного реагування в опалювачі в умовах турбулентного перемішування. Такою моделлю є модель EDC (Eddy-Dissipation-Concept), що враховує взаємодію кінетики і турбулентності потоків [17]. Вона допускає, що реакції проходять в невеликих турбулентних структурах, званих дрібномасштабними реакторами. Швидкості реакцій визначаються з рівняння Арреніуса і інтегруються за допомогою числових методів.

Характерний розмір дрібномасштабного реактора і час, протягом якого відбувається реакція в реакторі, визначаються за формулами:

$$\xi^* = C_\xi \left(\frac{v \epsilon}{k^2} \right)^{1/4}; \quad C_\xi = 2.1377,$$

де $*$ вказує на дрібномасштабність структури; $C_\xi = 2.1377$ – константа.

Величина ξ^* залежить від кінематичної в'язкості ν , кінетичної енергії турбулентності k і швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ϵ .

У даній моделі використовуються реактори постійного тиску, початкові умови для яких визначаються концентрацією компонентів і температурою реагування.

Тоді молярна швидкість утворення/розкладання i -го компонента в реакції визначається:

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

де Y_i^* – масова частка i -го реагенту в реакторі після закінчення часу τ^* .

Час протікання реакції в реакторі

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2},$$

де $C_\tau = 0.4082$ – константа часу.

Використана в даній роботі математична модель емісії оксидів азоту являє собою систему рівнянь масового переносу, які враховують конвекцію, дифузію, а також утворення і розкладання оксидів азоту і споріднених сполук [13].

В якості об'єкта дослідження обрано камеру допалювання синтез-газу ежекторного типу [14].

Конструктивна схема допалювача представлена на рис. 1. Окиснювач (катодний газ) через чотири вхідні патрубки 1 надходить в ресивер 2, де розділяється на чотири потоки. Перший потік надходить в ежектор 3 через три канали 4. Відхідні гази після твердооксидного паливного елемента (анодні гази) поступають через патрубок 5, частково перемішується з окиснювачем в змішувачі 6 і далі надходять у жарову трубу 7.

Другий потік окиснювача подається в завихрювач 8, закручується і надходить в жарову трубу 7, утворюючи вихрову зону горіння. Третій потік окиснювача поступає в жарову трубу через ряд отворів 9. Четвертий потік окиснювача підводиться в канал 10 для охолодження стінки жарової труби, і далі після завихрювача 11 перемішується з продуктами згоряння для досягнення необхідної температури на виході з допалювача. Через канал 12 для підтримки стабільності процесів горіння в зону горіння по осі камери може подаватися природний газ.

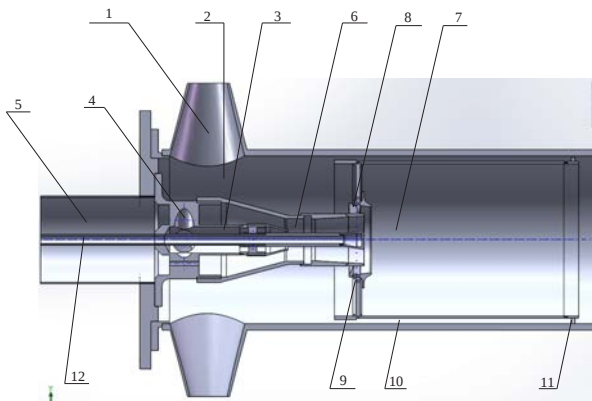


Рис. 1. Конструкція допалювача: 1 – вхідні патрубки; 2 – ресивер; 3 – ежектор; 4 – канал подачі окиснювача в ежектор; 5 – патрубок підведення відхідних газів від паливного елемента; 6 – змішувач; 7 – жарова труба; 8 – завихрювач; 9 – отвори подачі окиснювача; 10 – щілина для охолодження жарової труби; 11 – завихрювач; 12 – канал підведення додаткового палива (при потребі)

Перевірка адекватності використаної математичної моделі здійснювалася шляхом зіставлення результатів тривимірних розрахунків з експериментальними даними, отриманими при дослідженні параметрів камери допалювання на спеціалізованому стенді. Аналіз отриманих результатів [14] показав прийнятний рівень збігу експериментальних і розрахункових значень і можливість використання подібної моделі для розрахунків допалювачів ежекторного типу, що працюють на низькокалорійному паливі.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розрахунки аеродинамічної структури потоку та вигорання відхідних газів твердооксидного паливного елемента в допалювачі проведені для горючої суміші наступного складу (масові частки): $H_2 = 1,177\%$, $H_2O = 38,876\%$, $CO = 7,064\%$, $CO_2 = 52,883\%$. Склад

окиснювача (масові частки): $O_2 = 16,53\%$, $H_2O = 3,84\%$, $CO_2 = 0,52\%$, $N_2 = 79,11\%$. Витрата окиснювача після катодної секції паливного елемента дорівнювала $2,8254\text{ кг/с}$, його температура 1193 К ; витрата відхідних газів після анодної секції паливного елемента приймалася рівною $0,4077\text{ кг/с}$, їх температура 1193 К . Тривимірні розрахунки проведено з використанням кінцево-різницевої розрахункової сітки, що складалася з $1,55\text{ млн.}$ тетраедричних елементів.

В результаті проведення тривимірних розрахунків з використанням програмного комплексу Ansys Fluent [15] із застосуванням кінетичного механізму [16] отримано нові дані про робочий процес допалювача відхідних газів твердооксидного паливного елемента.

На рис. 2 наведено лінії треків окиснювача, вектори швидкості робочого тіла, а також розподіл температури по перерізах допалювача. В даній конструкції за рахунок взаємодії потоків окиснювача, які

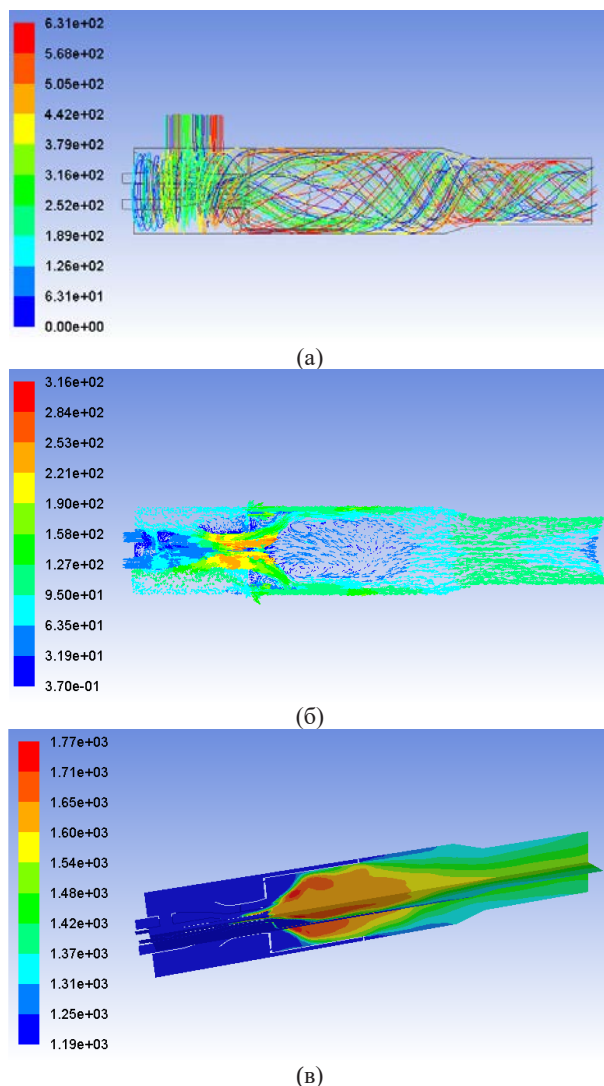


Рис. 2. Лінії треків окиснювача (а), вектори швидкості робочого тіла, м/с (б) та розподіл температури, К (в) по довжині допалювача

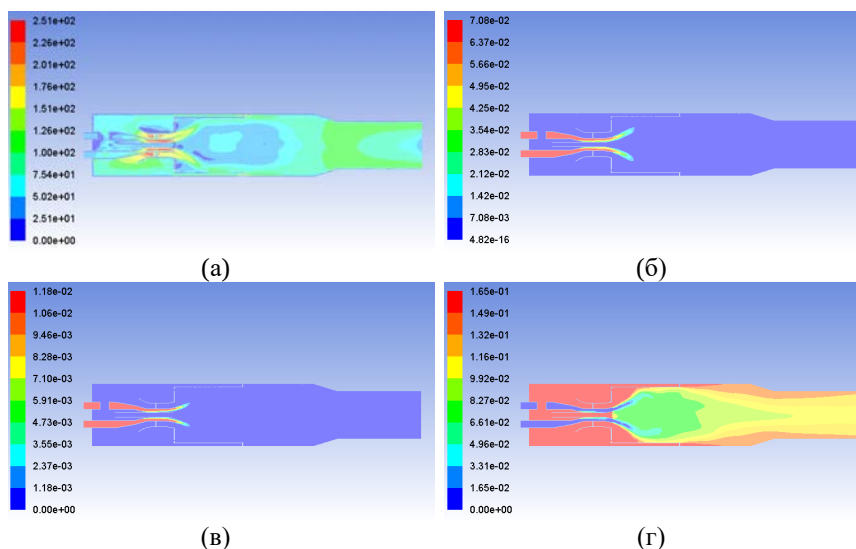


Рис. 3. Розподіл швидкості, м/с (а), масових часток: CO (б), H_2 (в), O_2 (г) по довжині допалювача

проходять відповідно через завихрювач, ежектор та радіальні отвори в первинній зоні паливоспалюючого пристрою, має місце утворення інтенсивної зони рециркуляції (рис. 2, а, б) в головній частині допалювача. Ця центральна зона рециркуляції достатньо сильно розвинута і служить для ефективної стабілізації положення фронту полум'я (рис. 2, в).

На рис. 3 приведено розподіл швидкості потоку, масових часток горючих компонентів: оксиду вуглецю CO і водню H_2 , а також молекулярного кисню O_2 по довжині допалювача. Через наявність протяжної рециркуляційної зони (рис. 3, а), де знаходяться продукти згоряння з відносно високою температурою,

горючі компоненти (CO та H_2) інтенсивно вигоряють (рис. 3, б, в) в головній частині допалювача при взаємодії з киснем (рис. 3, г).

Зміну масових часток продуктів повного згоряння (H_2O , CO_2), активних радикалів (O , OH , H) та оксиду азоту NO по перерізах допалювача представлено на рис. 4.

Видно, що кількість продуктів повного згоряння визначається не тільки процесами допалювання горючих компонентів анодних газів, але й початковим їх вмістом в горючій суміші. З активних проміжних з'єднань найбільшу концентрацію має гідроксил OH . Відмітимо, що нестабільні з'єднання (радикали) через високу температуру відхідних газів твердооксидних паливних елементів починають утворюватись ще в внутрішніх секціях ежектора, що обумовлює початок процесів допалювання всередині ежектора. Це може призвести до перегріву елементів конструкції допалювача та потребує додаткових досліджень з метою усунення цього явища.

Оксид азоту NO утворюється в основному в зонах найбільших температур. Але так як максимальні температури горіння всередині допалювача не перевищують 1770 K, то концентрації оксиду азоту по його перерізах і на виході мінімальні.

Мольні частки основних компонентів на виході допалювача представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Мольні частки компонентів на виході допалювача

CO	H_2	CO_2	H_2O	O_2	NO
2.3846e-07	2.3329e-06	0.0544	0.1481	0.1107	9.5092e-09

Дані табл. 1 свідчать, що горючі компоненти повністю вигоряють всередині допалювача, а концентрація оксидів азоту на виході паливоспалюючого пристрою наближається до нульових значень.

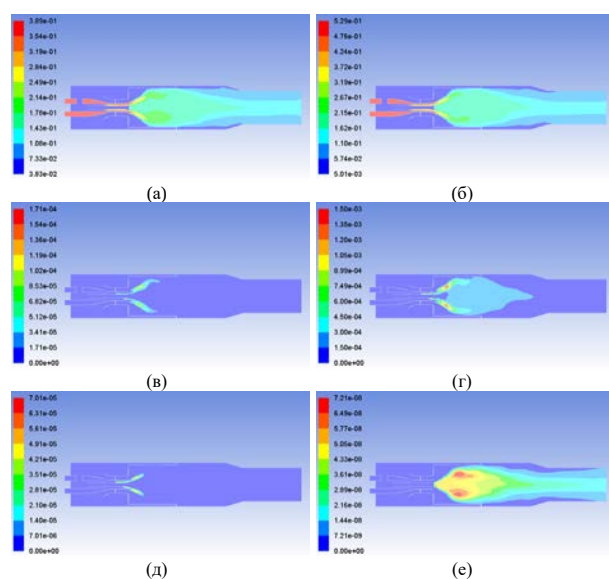


Рис. 4. Розподіл масових часток: H_2O (а), CO_2 (б), O (в), OH (г), H (д), NO (е) по довжині допалювача

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичну модель допалювача відхідних газів перспективної суднової системи SOFC-GT, яка містить стеки твердооксидних паливних елементів, а також контактний газотурбінний агрегат, що працює з перерозширенням.

2. Проведено тривимірні розрахунки аеродинаміки потоків і вигорання горючих компонентів в допалювачі відхідних газів твердооксидних паливних елементів ежекторного типу.

3. Встановлено, що запропонована схема допалювача забезпечує стабільне і повне вигорання

горючих компонентів відхідних газів в умовах низької теплотворної здатності і великої кількості водяної пари в анодних газах твердооксидних паливних елементів.

4. Концентрація оксидів азоту на виході допалювача ежекторного типу наближається до нульових значень.

5. Потрібні подальші теоретичні та експериментальні дослідження ефективності допалювачів подібного типу в напрямку оптимізації характеристик їх робочого процесу та усунення можливостей займання горючої суміші в каналі ежектора.

REFERENCES

- [1] Faleh, S., & Khir, T. (2022) SOFC-Gas Turbine Hybrid Power Plant: Exergetic Study. Rotating Machines. Edited by Y. Li., 16 p.
- [2] Wang, Z., Chen, H., Xia, R., Han, F., Ji, Y., & Cai, W. (2022) Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 32, 101342.
- [3] Zhang, B., Maloney, D., Harun, N.F., Zhou, N., Pezzini, P., Medam, A., Hovsapien, R., Bayham, S., & Tucker, D. (2022) Rapid Load Transition for Integrated Solid Oxide Fuel Cell - Gas Turbine (SOFC-GT) Energy Systems: A Demonstration of the Potential for Grid Response. *Energy Conversion and Management*, vol. 258, no. 15, 115544.
- [4] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., & Burunsuz, K. (2023) Energy System with Solid Oxide Fuel Cells and Steam-Injected Gas Turbine. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, pp. 1-5.
- [5] 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*, vol. 21, 100565.
- [6] Li, M., Wang, J., Chen, Z., Qian, X., Sun, C., Gan, D., Xiong, K., Rao, M., Chen, C., & Li, X. (2024) A Comprehensive Review of Thermal Management in Solid Oxide Fuel Cells: Focus on Burners, Heat Exchangers, and Strategies. *Energies*, vol. 17, 1005.
- [7] Pianko-Oprych, P., & Jaworski, Z. (2017) Numerical investigation of a novel burner to combust anode exhaust gases of SOFC stacks. *Polish Journal of Chemical Technology*, vol. 19, no. 9, pp. 20-26.
- [8] Lingstädt, T., Grimm, F., Kutne, P., & Aigner, M. (2019) Design and setup of a low calorific SOFC off-gas combustion chamber for a pressurized MGT hybrid power plant test rig. *E3S Web of Conferences*, vol. 113, 02016.
- [9] Yanyi, Y., Weijuan, Y., Jingyi, C., Xiaoyu, Z., & Junhu Z (2024) Numerical investigation on the exhaust gas combustion of an SOFC in a catalytic multichannel burner. *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 1322956.
- [10] Lingstädt, T., Grimm, F., Krummrein, T., Bücheler, S., & Aigner, M. (2018) Experimental investigation of an SOFC off-gas combustor for hybrid power plant usage with low heating values realized by natural gas addition. *Proceedings of GPPS Forum 18 Global Power and Propulsion Society Montreal*.
- [11] Kashmiri, S.A., Tahir, M.W., & Afzal, U. Combustion Modeling and Simulation of Recycled Anode-off-Gas from Solid Oxide Fuel Cell. *Energies*, vol. 13, 5186.
- [12] Launder, B.E., & Spalding, D.B. (1972) Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 169 p.
- [13] Serbin, S.I., Kozlovskiy, A.V., & Burunsuz, K.S. (2016) Investigations of non-stationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44, no. 12, pp. 2960-2964.
- [14] 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 Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 12, pp. 3974-3978.
- [15] ANSYS Fluent Theory Guide (2013) ANSYS, Inc., 780 p.
- [16] Bilger, R.W., Starner, S.H., & Kee, R.J. (1990) On Reduced Mechanisms for Methane-Air Combustion in Nonpremixed Flames. *Combustion and Flame*, vol. 80, pp. 135-149.
- [17] Magnussen, B.F., & Hjertager, B.H. (1977) On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *16-th Symp. (Int.) on Combustion: the Combustion Institute*, vol. 16, no. 1, pp. 719-729.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Faleh, S., Khir, T. (2022) SOFC-Gas Turbine Hybrid Power Plant: Exergetic Study. Rotating Machines. Edited by Y. Li., 16 p.
- [2] Wang, Z., Chen, H., Xia, R., Han, F., Ji, Y., Cai, W. (2022) Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 32, 101342.
- [3] Zhang, B., Maloney, D., Harun, N.F., Zhou, N., Pezzini, P., Medam, A., Hovsapien, R., Bayham, S., Tucker, D. (2022) Rapid Load Transition for Integrated Solid Oxide Fuel Cell - Gas Turbine (SOFC-GT) Energy Systems: A Demonstration of the Potential for Grid Response. *Energy Conversion and Management*, vol. 258, no. 15, 115544.

- [4] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., Burunsuz, K. (2023) Energy System with Solid Oxide Fuel Cells and Steam-Injected Gas Turbine. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, pp. 1–5.
- [5] 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*, vol. 21, 100565.
- [6] Li, M., Wang, J., Chen, Z., Qian, X., Sun, C., Gan, D., Xiong, K., Rao, M., Chen, C., Li, X. (2024) A Comprehensive Review of Thermal Management in Solid Oxide Fuel Cells: Focus on Burners, Heat Exchangers, and Strategies. *Energies*, vol. 17, 1005.
- [7] Pianko-Oprych, P., Jaworski, Z. (2017) Numerical investigation of a novel burner to combust anode exhaust gases of SOFC stacks. *Polish Journal of Chemical Technology*, vol. 19, no. 9, pp. 20–26.
- [8] Lingstädt, T., Grimm, F., Kutne, P., Aigner, M. (2019) Design and setup of a low calorific SOFC off-gas combustion chamber for a pressurized MGT hybrid power plant test rig. *E3S Web of Conferences*, vol. 113, 02016.
- [9] Yanyi, Y., Weijuan, Y., Jingyi, C., Xiaoyu, Z., and Junhu Z (2024) Numerical investigation on the exhaust gas combustion of an SOFC in a catalytic multichannel burner. *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 1322956.
- [10] Lingstädt, T., Grimm, F., Krummrein, T., Bücheler, S., Aigner, M. (2018) Experimental investigation of an SOFC off-gas combustor for hybrid power plant usage with low heating values realized by natural gas addition. *Proceedings of GPPS Forum 18 Global Power and Propulsion Society Montreal*.
- [11] Kashmiri, S.A., Tahir, M.W., Afzal, U. Combustion Modeling and Simulation of Recycled Anode-off-Gas from Solid Oxide Fuel Cell. *Energies*, vol. 13, 5186.
- [12] Launder, B.E., Spalding, D.B. (1972) *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 169 p.
- [13] Serbin, S.I., Kozlovskyi, A.V., Burunsuz, K.S. (2016) Investigations of non-stationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44, no. 12, pp. 2960–2964.
- [14] 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 Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 12, pp. 3974–3978.
- [15] ANSYS Fluent Theory Guide (2013) ANSYS, Inc., 780 p.
- [16] Bilger, R.W., Starnner, S.H., Kee, R.J. (1990) On Reduced Mechanisms for Methane-Air Combustion in Nonpremixed Flames. *Combustion and Flame*, vol. 80, pp. 135–149.
- [17] Magnussen, B.F., Hjertager, B.H. (1977) On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *16-th Symp. (Int.) on Combustion: the Combustion Institute*, vol. 16, no. 1, pp. 719–729.

© Сербін С. І., Патлайчук О. В.

Дата надходження статті до редакції: 13.02.2024

Дата затвердження статті до друку: 20.02.2024