



**Serhiy
I. Serbin**
Сербін Сергій
Іванович



**Oleksii
V. Patlaichuk**
Патлайчук
Олексій
Володимирович

УДК 621.45.034

EFFICIENCY OF ANODE GASES AFTERBURNERS FOR MARINE HYBRID SYSTEM “SOLID OXIDE FUEL CELL – GAS TURBINE”

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ДОПАЛЮВАЧІВ АНОДНИХ ГАЗІВ
СУДНОВОЇ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ «ТВЕРДООКСИДНИЙ
ПАЛИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ – ГАЗОВА ТУРБІНА»**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).02](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).02)

Serhiy I. Serbin

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

Oleksii V. Patlaichuk

Патлайчук Олексій Володимирович,
аспірант
alexpatlaichuk@gmail.com
ORCID: 0009-0008-0887-1173

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв*

Abstract. The article is devoted to a theoretical study of the possibilities of using fuel combustion devices of various types for post-burning of anode gases of the marine hybrid system «Solid oxide fuel cell – gas turbine (SOFC-GT)». The anode gases of fuel cells contain a small amount of combustible components such as hydrogen and carbon monoxide, and they need to be combusted to increase the initial gas temperature before the gas turbine, which utilizes the heat of the waste gases, and to improve the thermodynamic efficiency of the entire hybrid power system. Three-dimensional numerical modeling methods were used to analyze the aerodynamic structure of flows, the burning of combustible components of the waste gases of solid oxide fuel cells, as well as the formation of nitrogen oxides in afterburners of the traditional (diffusion) type and the proposed one – with the preliminary formation of a fuel-oxidative mixture. A mathematical model based on the solution of differential equations of convective and diffusive transfer of concentrations of chemically reactive components was used to calculate the working process in the afterburners of various types of the prospective marine hybrid system. The purpose of the work is a comparative analysis of the efficiency of diffusion-type afterburner and afterburner with the preliminary formation of a fuel-oxidative mixture in the hybrid system «Solid oxide fuel cell – gas turbine». In contrast to previous studies, the effectiveness of the afterburner of anode gases of solid oxide fuel cells based on a fuel-burning device with the preliminary formation of a fuel-air mixture has been proven. The stability of operation of the proposed afterburner with the preliminary formation of the fuel-air mixture and practically zero values of emissions of toxic components at its output has been proven. The obtained new data determined the directions for improving the efficiency of promising marine hybrid systems with fuel cells and gas turbines, which will give an impetus to the creation of environmentally friendly decarbonized energy systems.

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

Анотація. Стаття присвячена теоретичному дослідженню можливостей використання паливоспалюючих пристроїв різних типів для допалювання анодних газів суднової гібридної системи “Твердооксидний паливний елемент – газова турбіна (SOFC-GT)”. В складі анодних газів паливних елементів є невелика кількість горючих компонентів, таких як водень і оксид вуглецю, і їх необхідно допалити для підвищення початкової температури газів перед газовою турбіною, що утилізує теплоту відхідних газів, з метою покращення термодинамічної ефективності всієї гібридної енергетичної системи. Методами тривимірного числового моделювання проведено аналіз аеродинамічної структури потоків, вигорання горючих компонентів відхідних газів твердооксидних паливних елементів, а також утворення оксидів азоту в допалювачах традиційного (дифузійного) типу і запропонованого – з попереднім утворенням паливо-окисної суміші. Для розрахунків робочого процесу в допалювачах різних типів перспективної суднової гібридної системи використано математичну модель, засновану на розв’язуванні диференціальних рівнянь конвективного і дифузійного переносу концентрацій хімічно реагуючих компонентів. Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності роботи допалювачів дифузійного типу та з попереднім утворенням паливо-окисної суміші в складі гібридної системи “Твердооксидний паливний елемент – газова турбіна”. На відміну від попередніх досліджень доведено ефективність допалювача анодних газів твердооксидних паливних елементів на основі паливоспалюючого пристрою з попереднім утворенням паливо-окисної суміші. Показано стійкість роботи запропонованого допалювача з попереднім утворенням паливо-окисної суміші у фронтівому пристрої жарової труби з практично нульовими викидами токсичних компонентів. Отримані нові дані визначили напрямки підвищення ефективності перспективних суднових гібридних систем з паливними елементами та газовими турбінами, що дасть імпульс для створення екологічно чистих декарбонізованих енергетичних систем.

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

References

- [1] 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.
- [2] Zhang, B., Maloney, D., Harun, N.F., Zhou, N., Pezzini, P., Medam, A., Hovsapian, 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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*.
- [8] Launder, B.E., & Spalding, D.B. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 169 p.
- [9] Serbin, S., Cherednichenko, O., Lychko, B., Patlaichuk, V., & Ratuszniak, I. (2023). Characteristics of the Afterburner for the SOFC-GT Marine Hybrid Power System. *Transport Means: Proceedings of the International Conference*, Palanga, Lithuania, vol. 1, pp. 374–379.

- [10] 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.
- [11] Menter, F.R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605.
- [12] Wilcox, D.C. (1998). Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California.
- [13] Bilger, R.W., Starnes, S.H., & Kee, R.J. (1990). On Reduced Mechanisms for Methane-Air Combustion in Nonpremixed Flames. *Combustion and Flame*, vol. 80, pp. 135-149.
- [14] ANSYS Fluent Theory Guide (2013) ANSYS, Inc., 780 p.

Постановка завдання. Роботу спрямовано на розробку та створення декарбонізованих суднових енергетичних систем, що складаються з твердооксидних паливних елементів та газових турбін, з практично нульовими викидами екологічно шкідливих компонентів. Дослідження є актуальними та важливими для галузі суднової енергетики, бо передбачають розробку та створення перспективних гібридних суднових енергетичних систем SOFC-GT для комплексного та швидкого забезпечення електроенергією суден та об'єктів морської інфраструктури.

Гібридні енергетичні системи, що складаються з твердооксидних паливних елементів і газових турбін, дозволяють поліпшити не тільки показники енергоефективності й надійності устаткування, але й значно покращити екологічну обстановку в районах їх експлуатації. Створення сучасних декарбонізованих модулів передбачає також розробку принципово нових конструктивних схем паливоспалюючих пристроїв (допалювачів), що працюють на відхідних газах паливних елементів з низькою теплотворною здатністю.

Реалізація подібної гібридної SOFC-GT технології забезпечить вирішення проблеми створення високоефективних та конкурентоздатних вітчизняних енергетичних систем нового покоління, що відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки та переходу до екологічно чистої енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз літератури показав, що системи SOFC-GT, які працюють при відносно невеликому тиску, є перспективними як з точки зору ефективності системи в цілому, так і з точки зору надійності і довговічності, і можуть бути рекомендовані

для суднового використання в якості джерел електроенергії і теплоти [1-3].

Для подальших досліджень обрано схему суднової електростанції, що використовує стеки твердооксидних паливних елементів в комплексі з контактним газотурбінним агрегатом, який працює з перерозширенням [3, 4]. Така схема дозволяє знизити величину тиску в корпусі твердооксидного паливного елемента та підвищити ККД гібридної системи.

Допалювання відхідних газів паливних елементів, що мають високу температуру, але дуже низьку теплотворну здатність і забаластовані водяною парою, в таких гібридних системах необхідно здійснювати в спеціальних допалювачах (камерах згоряння), які можуть використовувати різні технології спалювання горючих компонентів [5-7].

Відмітимо, що отримання фізико-хімічних закономірностей вигорання низькокалорійних відхідних газів паливних елементів, забаластованих водяною парою, являє собою окрему і актуальну задачу, а її розв'язування дозволить інтенсифікувати впровадження декарбонізованих гібридних систем в суднову енергетику.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проведений аналіз можливостей допалювачів відхідних газів твердооксидних паливних елементів показав, що існують невирішені проблеми, які пов'язані з недосконалістю організації робочих процесів в допалювачах, а також зі складністю забезпечення стійкого горіння термохімічних продуктів в умовах великих концентрацій водяної пари.

У даній роботі методом числового тривимірного моделювання проводяться дослідження характеристик турбулентного го-

ріння продуктів термохімічних перетворень паливного елемента суднового генератора електричної та теплової енергії, який складається з твердооксидного паливного елемента і газотурбінного агрегату контактного типу, в допалювачах різних конструктивних типів.

Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності допалювання відхідних газів твердооксидних паливних елементів суднової гібридної енергетичної системи в паливоспалюючих пристроях традиційного (дифузійного) типу та в запропонованому допалювачі з попереднім утворенням паливо-окисної суміші.

В якості **об'єкта дослідження** вибрано робочі процеси в традиційному допалювачі дифузійного типу і запропонованому допалювачі з попереднім змішуванням компонентів суднової гібридної системи для виробництва електричної та теплової енергії. **Предмет дослідження** – закономірності процесів змішування та турбулентного горіння відхідних газів твердооксидного паливного елемента в допалювальних пристроях суднової енергетики.

Виклад основного матеріалу. Для визначення найбільш ефективної технології допалювання відхідних газів твердооксидних паливних елементів суднової гібридної енергетичної установки вибрано тривимірний метод CFD-аналізу робочих процесів.

Розроблено математичну модель допалювача відхідних газів на основі розв'язування системи рівнянь, що описує конвективний і дифузійний перенос концентрацій для кожного з компонентів реагуючої суміші в турбулентній системі. Детальний опис моделі наведено в [8–10].

Для підвищення ефективності розрахунків в пристінних областях допалювача в якості моделі турбулентності використано модель переносу напруги зсуву SST $k - \omega$, яка розроблена Ментером в [12] для ефективного поєднання емпіричної $k - \omega$ моделі Вілcoxа [12] у пристінній області з $k - \varepsilon$ моделлю Лаундера – Сполдінга [8] в області основного потоку. Відмітимо, що k , ε , ω , – це відповідно кінетична енергія турбулентності, швидкість її дисипації та питома швидкість дисипації турбулентної енергії.

Для SST $k - \omega$ моделі характерний поступовий перехід від стандартної моделі $k - \omega$ у внутрішній області прикордонного шару до версії моделі $k - \omega$ із високим числом Рейнольдса у зовнішній частині прикордонного шару (ці прийоми застосовуються до потоків, обмежених стінкою допалювача), і подальший перехід до моделі турбулентності $k - \varepsilon$ в основному потоці, а також використання модифікованих формул для турбулентної в'язкості при врахуванні транспортних ефектів турбулентних напружень зсуву.

Ці особливості роблять модель SST $k - \omega$ точнішою та надійнішою для широкого класу потоків. Основні рівняння моделі SST $k - \omega$ мають наступний вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k;$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega.$$

У цих рівняннях $\tilde{G}_k$ являє собою генерацію кінетичної енергії турбулентності через градієнти середньої швидкості; G_ω – генерація питомої швидкості дисипації; Γ_k і Γ_ω – ефективна дифузія для k і ω відповідно; Y_k і Y_ω – дисипація k і ω через ефекти турбулентності; D – член, що враховує перехресну дифузію; S_k і S_ω – джерельні члени, які визначаються користувачем.

При проведенні розрахунків використано схему горіння хімічних реагентів [13], яка 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 .

В якості об'єктів дослідження обрано дві конструктивні схеми допалювачів (рис. 1): традиційна (дифузійного типу), заснована на використанні принципів турбулентного горіння вуглеводнів в газотурбінних камерах згорання, та з попереднім утворенням паливо-окисної суміші в каналах фронтового пристрою допалювача, запропонована авторами.

В першому випадку відхідні анодні гази паливного елемента направляються до форсунки камери допалювання і витікають через ряд отворів в зону горіння, куди спрямовується також первинний окиснювач

(катодні гази) через лопатковий завихрювач і радіальні отвори в жаровій трубі. В другому випадку анодні гази через спеціальні трубопроводи спрямовуються в район фронтового пристрою допалювача, куди направляється частина первинного окиснювача (катодні гази) для попереднього утворення паливо-окисної суміші, і далі ця паливо-окисна суміш переміщується з другою частиною первинного окиснювача на виході осьового завихрювача та спрямовується в жарову трубу для остаточного допалювання.

Обговорення результатів. Розрахунки вигорання відхідних газів твердооксидного паливного елемента в допалювачах різних типів 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 K ; витрата відхідних газів після анодної секції паливного елемента приймалася рівною $0,4077\text{ кг/с}$, їх температура 1193 K .

В результаті тривимірних розрахунків з використанням програмного комплексу Ansys Fluent [14] отримано дані про робочий процес двох різних допалювачів відхідних газів твердооксидного паливного елемента.

На рис. 2 представлено розподіл температур та масових часток горючих компонентів (CO та H_2) по довжині паливоспалюючих пристроїв. Видно, що в допалювачі дифузійного типу при витіканні відхідних газів паливного елемента з високою швидкістю з форсунки, яка визначається діаметрами і кількістю отворів в ній, горючі елементи концентруються на осі камери і ступінь їх вигорання залишається низькою. Таким чином традиційна газотурбінна камера згорання дифузійного типу не може бути використана в якості допалювача відхідних газів твердооксидних паливних елементів без відповідної модифікації її фронтового пристрою, завихрювача та форсунки. В допалювачі з попереднім утворенням паливо-окисної суміші горючі компоненти інтенсивно вигоряють практично після за-

вихрювача. Концентрації оксиду вуглецю і молекулярного водню на виході мають практично нульові значення, що свідчить про високу ефективність процесів вигорання анодних газів.

На рис. 3 наведено лінії треків окиснювача, вектори швидкості робочого тіла та розподіл масових часток водяної пари по

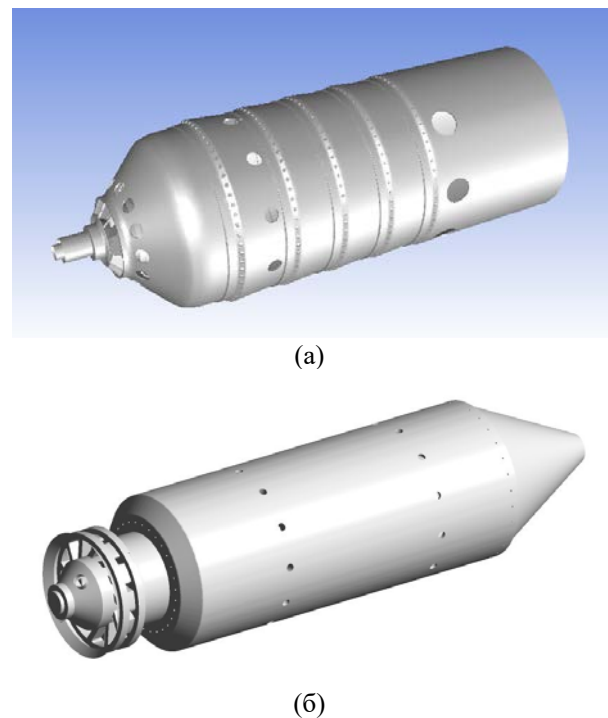


Рис. 1. Конструктивні схеми паливоспалюючих пристроїв: а – допалювач дифузійного (традиційного) типу; б – запропонований допалювач

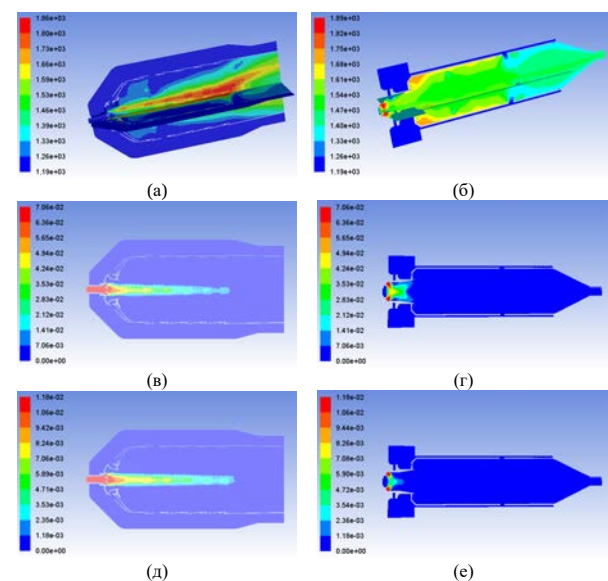


Рис. 2. Розподіл температур, К (а, б), масових часток CO (в, г) та H_2 (д, е) по довжині допалювачів: а) дифузійного типу; б) запропонованого

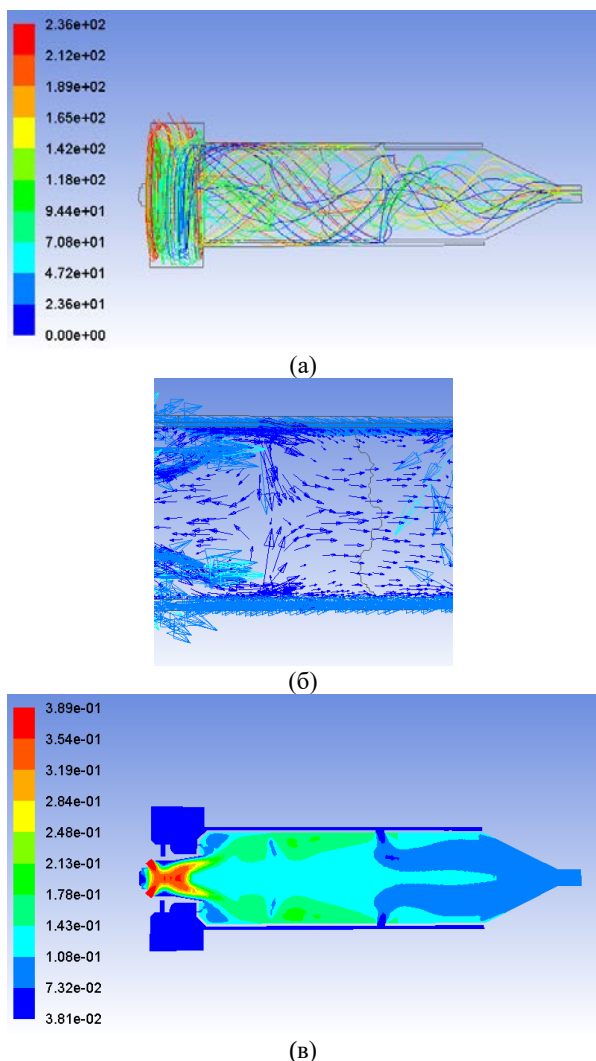


Рис. 3. Лінії треків окиснювача (а), вектори швидкості робочого тіла (б) та розподіл масових часток H_2O (в) по довжині допалювача

довжині запропонованого допалювача. За рахунок інтенсивного закручення окиснювача в головній частині жарової труби допалювача утворюється зона зворотних течій, де циркулюють в основному гарячі продукти повного згоряння, які здійснюють надійне та стабільне займання свіжих порцій горючих компонентів відхідних газів.

На рис. 4 приведено розподіл масових часток радикалів O , OH та H , а також оксиду азоту NO по довжині допалювача. Активні з'єднання (найбільша концентрація спостерігається у OH) утворюються в зоні перемішування горючих складових відхідних газів з окиснювачем, але їх концентрація швидко зменшується в результаті активного вигорання горючих компонентів.

Оксид азоту NO утворюється в основному в периферійних ділянках жарової труби. Але так як максимальні температури горіння в цих частинах не є високими, то концентрації оксиду азоту на виході допалювача 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
4.6814e-08	5.002e-07	0.0537	0.1477	0.1111	5.002e-07

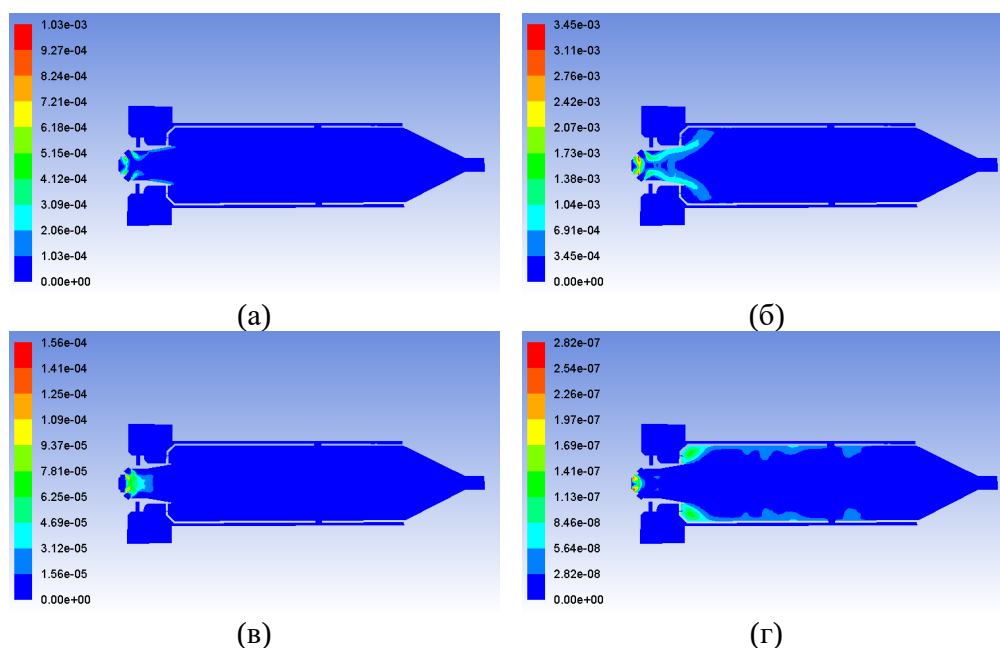


Рис. 4. Розподіл масових часток: O (а), OH (б), H (в), NO (г) по довжині допалювача

Наведені дані свідчать, що горючі компоненти відхідних газів паливного елемента повністю вигоряють, а концентрація оксидів азоту на виході наближається до нульових значень.

Висновки

1. Для розрахунків робочого процесу в допалювачах різних типів перспективної суднової системи твердооксидних паливних елементів і газової турбіни використано математичну модель, засновану на розв'язуванні рівнянь, що описують конвективний і дифузійний перенос концентрацій компонентів в турбулентній реагуючій системі.

2. Проведено тривимірні розрахунки аеродинаміки потоків і вигорання відхідних газів твердооксидних паливних елементів в допалювачах дифузійного типу та з попереднім утворенням паливо-окисної суміші.

3. Встановлено, що запропонована схема допалювача з попереднім утворенням паливо-окисної суміші забезпечує повне догорання горючих компонентів відхідних газів твердооксидних паливних елементів.

4. Потрібні подальші дослідження ефективності допалювачів з попереднім утворенням паливо-окисної суміші з точки зору організації ефективного охолодження стінок жарової труби.

Список літератури

- [1] Wang Z., Chen H., Xia R., Han F., Ji Y., Cai W. Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022. vol. 32, 101342.
- [2] Zhang B., Maloney D., Harun N.F., Zhou N., Pezzini P., Medam A., Hovsapien R., Bayham S., Tucker, D. 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*, 2022. vol. 258, no. 15, 115544.
- [3] Serbin S., Washchilenko N., Cherednichenko O., Burunsuz K. Energy System with Solid Oxide Fuel Cells and Steam-Injected Gas Turbine. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 2023. pp. 1–5.
- [4] Chen D., Serbin S., Washchilenko N., Burunsuz K. Parameter evaluation for a hybrid marine system combining solid oxide fuel cells and overexpanded steam-injected gas turbine. *International Journal of Thermofluids*, 2024. vol. 21, 100565.
- [5] Pianko-Oprych P., Jaworski Z. Numerical investigation of a novel burner to combust anode exhaust gases of SOFC stacks. *Polish Journal of Chemical Technology*, 2017. vol. 19, no. 9, pp. 20–26.
- [6] Yanyi Y., Weijuan Y., Jingyi C., Xiaoyu Z., and Junhu Z Numerical investigation on the exhaust gas combustion of an SOFC in a catalytic multichannel burner. *Frontiers in Energy Research*, 2024. vol. 12, 1322956.
- [7] Lingstädt T., Grimm F., Krummrein T., Bücheler S., Aigner M. 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*. 2018.
- [8] Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972. 169 p.
- [9] Serbin S., Cherednichenko O., Lychko B., Patlaichuk V., Ratushniak I. Characteristics of the Afterburner for the SOFC-GT Marine Hybrid Power System. *Transport Means: Proceedings of the International Conference*, Palanga, Lithuania, 2023. vol. 1, pp. 374–379.
- [10] Matveev I.B., Serbin S.I., Vilkul V.V., Goncharova, N.A. Synthesis Gas Afterburner Based on an Injector Type Plasma-Assisted Combustion System. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2015. vol. 43, no. 12, pp. 3974–3978.
- [11] Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 1994. vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
- [12] Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California. 1998.
- [13] Bilger R.W., Starnes S.H., Kee R.J. On Reduced Mechanisms for Methane-Air Combustion in Nonpremixed Flames. *Combustion and Flame*, 1990. vol. 80, pp. 135–149.
- [14] ANSYS Fluent Theory Guide ANSYS, Inc., 2013. 780 p.

© Сербін С. І., Патлайчук О. В.

Дата надходження статті до редакції: 05.02.2024

Дата затвердження статті до друку: 22.02.2024