



НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ КОНФЕРЕНЦІЇ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCES

Національний університет кораблебудування
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

**СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА:
СТАН ТА ПРОБЛЕМИ
МАТЕРІАЛИ**
**XII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

05–07 листопада 2025 року

**SHIP POWER ENGINEERING:
STATE AND PROBLEMS
PROCEEDINGS**

OF THE XII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE

November 05 - 07, 2025



Миколаїв (Mykolaiv) 2025

Міністерство освіти і науки України (*Ministry of Education and Science of Ukraine*)
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(*Admiral Makarov National University of Shipbuilding*)
ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування»
(*State Research and Design Shipbuilding Centre*)
ДП НВК газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»
(*Gas Turbine Research & Production Complex "Zorya" - "Mashproekt"*)
Одеський національний морський університет (*Odessa National Maritime University*)
Херсонська державна морська академія (*Kherson State Maritime Academy*)
Batumi Navigation Teaching University (Georgia)
(*Батумський навігаційний навчальний університет (Грузія)*)
Kielce University of Technology (Poland) (*Келецький технологічний університет (Польща)*)
Jiangsu University of Science and Technology (China) (*Університет науки і технологій Цзянсу (Китай)*)
Bureau Veritas (Marine & Offshore) (Canada) (*Бюро Верітас: (Морські та шельфові споруди) (Канада)*)
Aalborg University (Denmark) (*Ольборзький університет (Данія)*)

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА: СТАН ТА ПРОБЛЕМИ

XII Міжнародна науково-технічна конференція

МАТЕРІАЛИ

05-07 листопада 2025 року

*Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, вул. Героїв України, 9*

*Машинобудівний навчально-науковий інститут,
вул. Ковальська, 5*

Миколаїв
Видавець Ємельянова Т.В.
2025

УДК 629.5:62
С 89

ОРГАНІЗАТОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ

Міністерство освіти і науки України (*Ministry of Education and Science of Ukraine*)

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(*Admiral Makarov National University of Shipbuilding*)

ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» (*State Research and Design Shipbuilding Centre*)

ДП НВК газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»
(*Gas Turbine Research & Production Complex "Zorya"- "Mashproekt"*)

Одеський національний морський університет (*Odessa National Maritime University*)

Херсонська державна морська академія (*Kherson State Maritime Academy*)

Batumi Navigation Teaching University (Georgia) (*Батумський навігаційний навчальний університет (Грузія)*)

Kielce University of Technology (Poland) (*Келецький технологічний університет (Польща)*)

Jiangsu University of Science and Technology (China) (*Університет науки і технологій Цзянсу (Китай)*)

Bureau Veritas (Marine & Offshore) (Canada) (*Бюро Верітас: (Морські та шельфові споруди) (Канада)*)

Aalborg University (Denmark) (*Ольборзький університет (Данія)*)

***Матеріали публікуються за оригіналами, які представлені авторами.
Претензії щодо змісту та якості матеріалів не приймаються.
Відповідальність за зміст несе автор.***

Відповідальний за випуск
Личко Богдан Михайлович

С 89 Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: Вид. Ємельянова Т. В., 2025. – 405 с.

У збірнику наведенні матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». Збірник становить інтерес для наукових працівників, викладачів, інженерів та студентів.

ISBN 978-966-2650-50-1

Ship Power Engineering: State and Problems: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference. – Mykolaiv: Publisher Yemelyanova T. V., 2025. – 405 p.

The volume contains the proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference «Ship Power Engineering: State and Problems». The collection is of interest to scientists, lecturers, engineers, and students.

УДК 629.5:62

© Національний університет кораблебудування, 2025
© Admiral Makarov National University of Shipbuilding 2025

УДК 621.438

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОПАЛЮВАННЯ
ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ДЛЯ СУДНОВОЇ СИСТЕМИ SOFC-GT****С. І. Сербін**, *д-р техн. наук, професор*¹, **О. В. Патлайчук**, *аспірант*²*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**м. Миколаїв, Україна*¹ serhiy.serbin@nuos.edu.ua, ² alexpatlaichuk@gmail.com

Анотація. Виконано порівняльний аналіз ефективності допалювання випускних газів від твердооксидних паливних елементів суднової гібридної системи SOFC-GT в допалювачах дифузійного типу та в допалювачах з попереднім утворенням паливо-окисної суміші.

Ключові слова: твердооксидний паливний елемент; газова турбіна; суднова енергетика; гібридна система; допалювач випускних газів.

Актуальними для комплексного забезпечення електроенергією суден та об'єктів морської інфраструктури є розробка та створення гібридних енергетичних систем, що поєднують у собі твердооксидні паливні елементи (SOFC) та газові турбіни (GT). Такі енергетичні системи дозволяють поліпшити не тільки показники енергетичної ефективності та надійності устаткування, але й значно покращити екологічну обстановку в районах їх експлуатації.

Допалювання випускних 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 [1, 2].

Для визначення найбільш ефективної технології допалювання випускних газів обрано тривимірний метод CFD-аналізу робочих процесів.

Розроблено математичну модель допалювача випускних газів на основі розв'язування системи рівнянь, яка описує конвективний і дифузійний перенос концентрацій для кожного з компонентів реагуючої суміші в турбулентній системі. Детальний опис математичної моделі наведено в роботах [3; 4].

При проведенні розрахунків використано схему горіння хімічних реагентів, яка містить 58 хімічних реакцій з 18 хімічними компонентами: CH₄, H₂, CO, O₂, H₂O, CO₂, H, O, OH, HO₂, CH₃, HCO, CH₂, CH, CH₂O, H₂O₂, N, N₂ [5].

В якості об'єктів дослідження обрано дві конструктивні схеми допалювача випускних газів (рис. 1):

а) традиційна схема дифузійного типу, заснована на використанні принципів турбулентного горіння вуглеводнів в газотурбінних камерах згоряння;

б) схема з попереднім утворенням паливо-окисної суміші в каналах фронтального пристрою допалювача, яка була запропонована і розглянута авторами в роботах [6, 7].

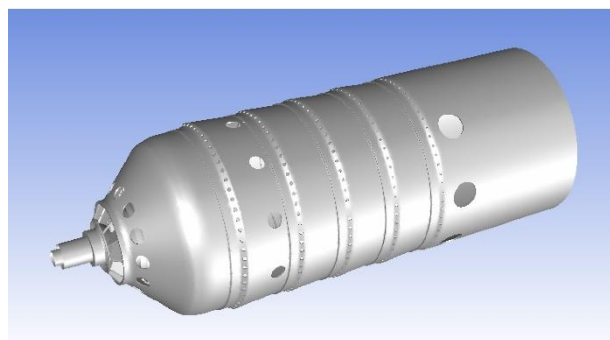
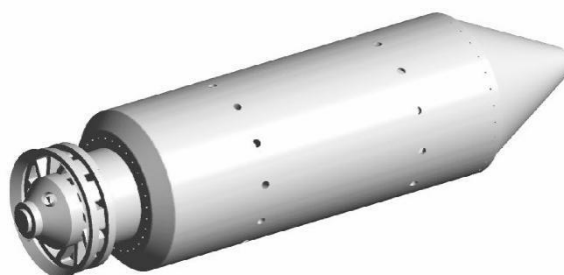
*a**б*

Рисунок 1 – Конструктивні схеми допалювача випускних газів:

a – традиційного (дифузійного) типу; *б* – запропонована авторами

В першому випадку випускні анодні гази паливного елемента спрямовуються до форсунки камери допалювання і витікають через ряд отворів в зону горіння, куди подається також первинний окислювач (катодні газы) через лопатковий завихрювач і радіальні отвори в жаровій трубі.

В другому випадку анодні газы через спеціальні трубопроводи спрямовуються в район фронтального пристрою допалювача, куди направляється частина первинного окислювача (катодні газы) для попереднього утворення паливо-окисної суміші. Далі ця паливо-окисна суміш переміщується з другою частиною первинного окислювача на виході з осьового завихрювача та спрямовується в жарову трубу для остаточного допалювання.

Розрахунки вигорання випускних газів 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 окислювача (масові частки): $O_2 = 16,53 \%$, $H_2O = 3,84 \%$, $CO_2 = 0,52 \%$, $N_2 = 79,11 \%$. Витрата окислювача після катодної секції паливного елемента дорівнювала $2,8254 \text{ кг/с}$, його температура – 1193 К ; витрата випускних газів після анодної секції SOFC приймалася рівною $0,4077 \text{ кг/с}$, їх температура – 1193 К .

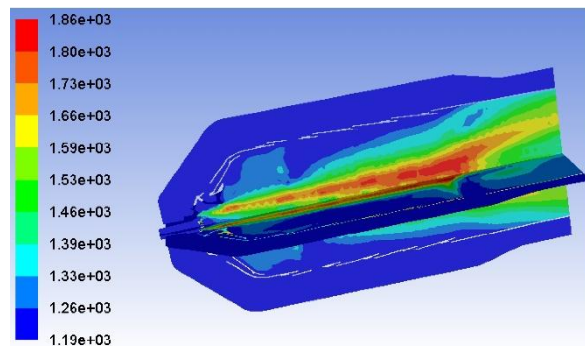
В результаті тривимірних розрахунків з використанням програмного комплексу Ansys Fluent отримано дані про робочий процес двох різних допалювачів випускних газів твердооксидних паливних елементів.

На рис. 2 наведено розподіл температур та масових часток горючих компонентів (CO та H_2) по довжині паливоспалюючих пристроїв. Видно, що в допалювачі дифузійного типу при витіканні випускних газів з форсунки з високою швидкістю, яка визначається діаметрами і кількістю отворів в ній, горючі елементи концентруються на осі камери і міра їх вигорання залишається низькою. Таким чином традиційна газотурбінна камера згоряння дифузійного типу не може бути використана в якості допалювача випускних газів твердооксидних паливних елементів без відповідної модифікації її фронтального пристрою, завихрювача та форсунки.

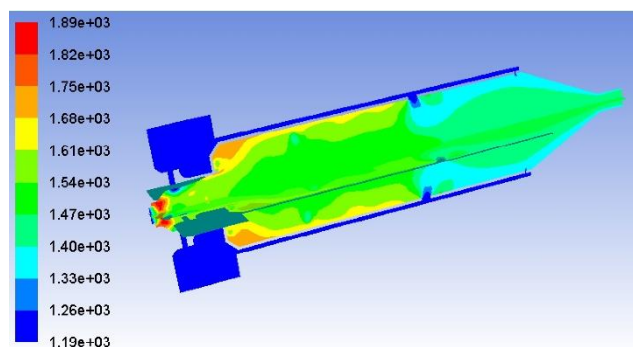
В допалювачі з попереднім утворенням паливо-окисної суміші горючі компоненти інтенсивно вигоряють практично після завихрювача. Концентрації оксиду вуглецю і молекулярного водню на виході мають практично нульові значення, що свідчить про високу ефективність процесів вигорання анодних газів.

Висновки:

1. Для розрахунків робочого процесу в допалювачах різних типів гібридної системи SOFC–GT використано математичну модель, засновану на розв'язуванні рівнянь, що описують конвективний і дифузійний перенос концентрацій компонентів в турбулентній реагуючій системі.



a



б

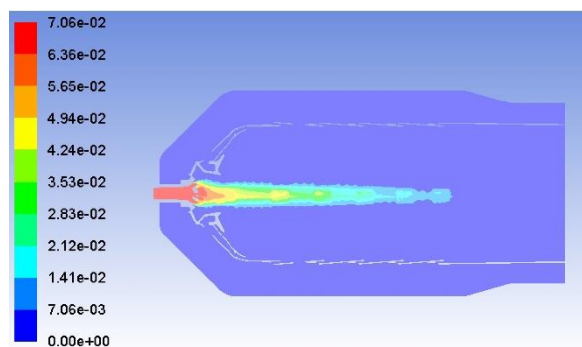
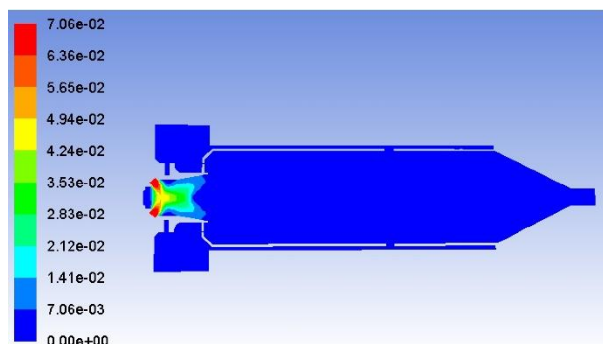
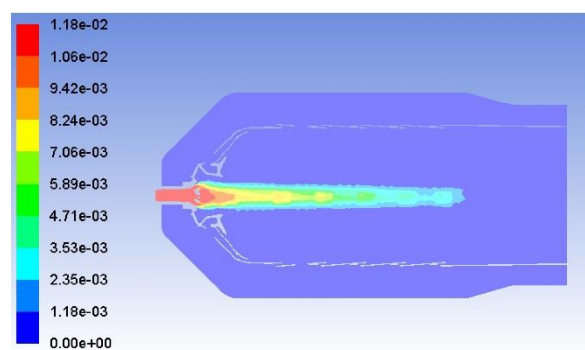
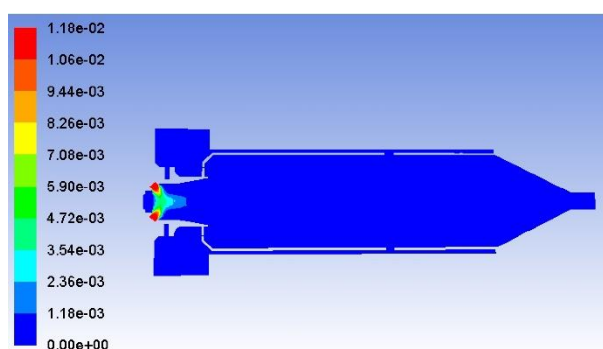
*б**2**д**е*

Рисунок 2 – Розподіл температур, К (*а, б*), масових часток CO (*в, г*) та H₂ (*д, е*) по довжині допалювачів, відповідно, дифузійного та запропонованого типів

2. Проведено тривимірні розрахунки аеродинаміки потоків і вигорання випускних газів від SOFC в допалювачах дифузійного типу та з попереднім утворенням паливо-окисної суміші.

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

Література

[1] 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.

[2] 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.

[3] Serbin, S., Cherednichenko, O., Lychko, B., Patlaichuk, V., & Ratushniak, 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Сербін, С. І., & Патлайчук, О. В. (2024). Дослідження ефективності допалювача відхідних газів твердооксидного паливного елемента. *Збірник наукових праць НУК*. № 1, с. 62-68.

[7] Сербін, С. І., Ващиленко, М. В., & Патлайчук, О. В. (2024). Розробка конструкції допалювача відхідних газів для суднової системи SOFC-GT. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: Матеріали XV Міжн. наук.-техн. конференції. Миколаїв: НУК, с. 165-167.

Comparative analysis of the efficiency of afterburning for the SOFC-GT marine system

Serbin S., Patlaichuk O.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the efficiency of exhaust gas afterburning from solid oxide fuel cells of the SOFC-GT marine hybrid system in diffusion-type afterburners and with preliminary formation of a fuel-oxide mixture.

Key words: solid oxide fuel cell; gas turbine; marine power engineering; hybrid system; afterburner.