

Oleksandr  
A. Shmarkov  
Шмарков  
Олександр  
Андрійович

УДК 621.438

## USING DETAIL HYDROGEN COMBUSTION KINETIC MODELS IN CFD MODELING OF COMBUSTOR WORKING PROCESSES FOR FPSO VESSELS

ВИКОРИСТАННЯ ДЕТАЛЬНИХ КІНЕТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГОРІННЯ ВОДНЮ ПРИ CFD-МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ У ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВКАХ ОФШОРНИХ СУДЕН

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).03](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).03)

Oleksandr A. Shmarkov Шмарков Олександр Андрійович,  
аспірант  
shmarkov.oleksandr@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-0916-5157

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

**Abstract.** The growing demand for merchant ships and energy sectors for high effective, environmental neutral equipment promote research intensification of power engineering. Utilizing the combination of different approaches to improving efficiency and enhancing environmental parameters of the existing engines, inventing new technical solutions is expanding the horizons of understanding and knowledge about the capabilities of heat engines, including the gas turbine, which are proposed to be used in marine infrastructure. International organizations are concerned about the environment, which implies plans for decreasing pollutant emissions of greenhouse gas, nitrogen oxides and other harmful substances. One of the ways to achieve zero emission of carbon dioxide is to utilize an alternative type of fuel, e.g., hydrogen. Combination of utilizing hydrogen with environmental-friendly gas turbine technology, i.e. combustion chamber with two-stage steam injection into different parts of the combustion chamber, is analyzed in this paper. Simultaneous, the modern technological potentialities such as computational fluid dynamics (CFD) complexes impact its development process. Utilizing CFD complexes allows creating the 3D model and finite element model of the combustion chamber with steam injection and simulating its working process. Based on the 3D simulation data obtained, the possibilities of utilizing different kinetic schemes in chambers of gas turbine engines intended for operation on FPSO type vessels have been compared.

**Key words:** gas turbine engine; green energy; hydrogen; hybrid cycle; heat recovery, environmental.

**Анотація.** Зростаюча потреба в ефективному та екологічно нейтральному обладнанні транспортних та енергетичних установок приводить до інтенсифікації дослідницького процесу у сфері енергомашинобудування. Так, комбінування різних підходів до підвищення ефективності та екологічності існуючих двигунів, винайдення нових технічних рішень розширюють горизонт уявлення та знань про можливості теплових двигунів, у тому числі і газотурбінних двигунів, які пропонується використовувати в морській інфраструктурі. Стурбованість екологічним станом навколишнього середовища знаходить відображення у тенденціях розвитку машинобудування та запроваджених міжнародною спіль-

нотую планах щодо зниження викидів парникових газів, оксидів азоту та інших шкідливих речовин. Так одним з шляхів досягнення відсутності емісії оксидів карбону є використання альтернативних палив, які не містять його у своєму складі, наприклад водню. Поєднання використання водню з застосуванням технології покращення екологічних показників камери згоряння газотурбінного двигуна з двоступеневим впорскуванням пари розглянуто у даній роботі. На процес проєктування впливають можливості сучасних комп'ютерних засобів, таких як Computational Fluid Dynamics (CFD) комплекси. З використанням таких комплексів створено 3D-модель камери згоряння, побудовано кінцево-елементну сітку та проведено симуляції робочого процесу у камері. В результаті отримано дані тривимірних розрахунків, на основі яких проведено порівняння можливостей застосування різних кінетичних схем горіння водневого палива в камерах газотурбінних двигунів, призначених для роботи на суднах типу FPSO.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун; зелена енергетика; водень; гібридний цикл; утилізація теплоти, навколишнє середовище.

## References

- [1] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. (2020). Hydrogen power with Siemens gas turbines. U.S.A.: Houston. pp. 22.
- [2] GE. (2022). Hydrogen as a fuel for gas turbines. A pathway to lower CO<sub>2</sub>, pp. 8.
- [3] Bhavsar, A., Hingar, D., Ostwal, S., Thakkar, I., Jadeja, S., & Shah, M. (2023). The current scope and stand of carbon capture storage and utilization. A comprehensive review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, №8, 100368. pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113246>.
- [4] Faqih, M., Omar, M.B., Rosdiazli, I., & Omar, B.A.A. (2022). Dry-Low Emission Gas Turbine Technology: Recent Trends and Challenges. *Appl. Sci.* 12, 10922. <https://doi.org/10.3390/app122110922>.
- [5] Sehat, A., Ommi, F., & Saboohi, Z. (2021). Effects of steam addition and/or injection on the combustion characteristics. A review. *Thermal science*, vol. 25, №3A, pp. 1625–1652. <https://doi.org/10.2298/TSCITS-CI191030452S>.
- [6] Burunsuz, K. S., Kuklinovsky, V. V., & Serbin, S. I. (2019). Investigations of the emission characteristics of a gas turbine combustor with water steam injection. *Refrigeration equipment and technology*, 55 (2), pp 77–83.
- [7] National energy technology laboratory. (2022). A literature review of hydrogen and natural gas turbines: current state of the art with regard to performance and nox control. pp. 28.
- [8] Tamrat, S., Ramayya, V., Babu Nallamothe, R., & Seifu, Y. (2023). CFD Analysis of Sector Combustion Simulation in Four Stroke Direct Injection Diesel Engine. *Engineering and Technology Journal*, vol 08, Issue 03, pp. 2062–2068. <http://dx.doi.org/10.47191/etj/v8i3.10>.
- [9] Barati, S., De Santoli, L., & Lo Basso, G. (2021). Modeling and Analysis of a Micro Gas Turbine Fuelled with Hydrogen and Natural Gas Blends. *76th Italian National Congress ATI*, Volume 312, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131208012>.
- [10] Serbin, S., Washchilenko, N., Dzida, M., & Kowalski, J. (2021). Parametric analysis of the efficiency of the combined gas-steam turbine unit of a hybrid cycle for the fpso vessel. *Polish maritime research*, № 112(4), pp. 122–132.
- [11] Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (2015). Introducing SolidWorks. pp. 128.
- [12] ANSYS, Inc. (2012). ANSYS ICEM CFD Tutorial Manual. pp. 326.
- [13] ANSYS Inc. (2012). ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. pp. 1069.
- [14] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. (2019). Siemens gas turbine portfolio. Erlangen, Germany.
- [15] Serbin S. I., & Shmarkov O.A. (2023). Parameters of the hybrid gas-steam power plant operating on hydrogen fuel. *Collection of scientific papers*, №1 (490), pp. 103–110. [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).13](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).13).
- [16] Serbin, S. I., & Shmarkov, O.A. (2023). Characteristics of combustion chamber of hybrid gas-steam power plant operated on hydrogen fuel for FPSO vessel. *Shipbuilding & marine infrastructure*, №1 (17), pp. 22–30. [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).03](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).03).

- [17] Conaire, 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, issue 11, pp. 603–622. <https://doi.org/10.1002/kin.20036>.
- [18] Drake, M.C., & Blint, R.J. (1989). Thermal NO<sub>x</sub> in stretched laminar opposed-flow diffusion flames with CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> fuel. *Combustion and Flame*, vol. 76, issue 2, p. 151–167. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90064-3).
- [19] CHEMKIN, Software. (2011). CHEMKIN Tutorials Manual. pp. 274.
- [20] Zel'dovič, Y. B. (1946). The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions. *Acta Physicochimica*, 21, pp. 577–628. <https://doi.org/10.1515/9781400862979.404>.
- [21] The European Parliament and The Council Of The European Union. (2010). DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Union*, L 334/17. pp. 103.

**Постановка завдання.** На шляху до створення сучасного двигуна застосовується ряд підходів до його проектування, одним з яких є проектування з використанням CFD-комплексів, які допомагають з певною точністю відтворити аеродинамічні та хімічні процеси, які мають місце у таких конструктивних елементах як камери згоряння газової турбіни.

При оціночному проектуванні, коли цілком дослідження є якісний аналіз, часто використовують спрощені кінетичні схеми горіння палива. Такий підхід потребує значно меншої розрахункової потужності та скорочує час необхідний на розрахунок, що, у свою чергу, дає можливість проаналізувати більшу кількість режимів роботи двигуна. Наявність великого масиву даних на перших етапах проектування дозволяє гнучкіше визначитися з напрямом подальшого дослідження вже з використанням детальних кінетичних схем.

Сучасна наукова база пропонує цілу низку різних схем горіння, які, як показує практика, підходять для вирішення різноманітних термодинамічних задач. Вибір моделі, яка буде найбільш відповідати реальним процесам у конструктивних елементах двигуна, потребує додаткового дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес переходу від викопних видів палива до екологічно нейтральних і альтернативних видів супроводжується великою кількістю досліджень, що націлені на знаходження ефективного застосування невикопних палив у енергетиці, логістиці, морській інфраструктурі та промисловості.

Своє відображення у цьому процесі знаходить інтерес дослідників та промисловців до використання водню в якості палива як у складі паливної суміші, так і в чистому вигляді. Варіативність газових турбін у використанні різноманітних палив та їх комбінаціях додає їм ваги у плавному переході від застосування викопних енергоносіїв до створення повністю декарбонізованих систем [1].

Для задоволення міжнародних норм на викиди парникових газів та інших токсичних речовин для існуючих двигунів використовують кілька різнопланових підходів:

1. Використання палив, які не містять карбону або суміші з ними, що може значно знизити емісію CO<sub>2</sub>. За результатами досліджень фірми General Electric [2] вплив кількості водню у паливі на емісію CO<sub>2</sub> можна проілюструвати графіком залежності, показаному на рис. 1.

2. Використання технологій уловлювання діоксиду карбону CO<sub>2</sub> та його подальше зберігання з можливим застосуванням у промисловості [2, 3].

3. Застосування різних варіантів технічного ускладнення конструктивних елементів двигуна, таких як камера згоряння, що ставить на меті створення таких умов перебігу процесу горіння, при яких утворення забруднюючих речовин знаходиться на задовільному рівні. Прикладами таких технологій є застосування низькоемісійних камер згоряння [4], впорскування води або водяної пари [5, 6], застосування каталізаторів [7], тощо.

Як було зазначено вище, з метою прогнозування ефективності роботи та можливих рівнів викидів шкідливих речовин на

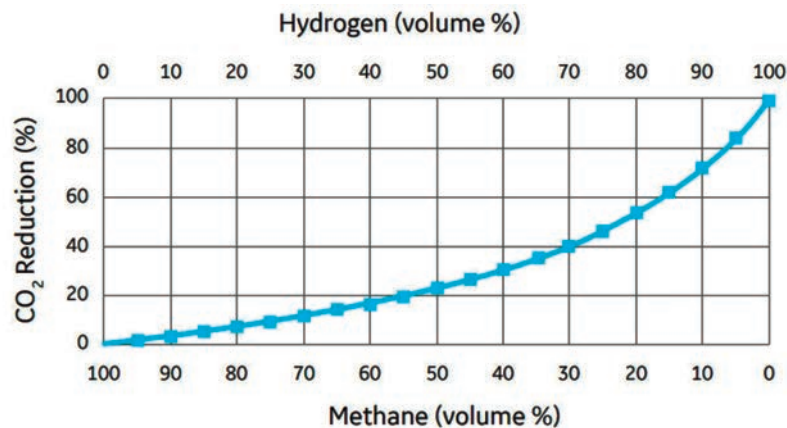


Рис. 1. Графік залежності емісії CO<sub>2</sub> від кількості водню за об'ємом у паливній суміші метан/водень [2]

сьогоднішній день на стадії проектування часто використовують моделювання за допомогою CFD-комплексів. Такий підхід має низку переваг у порівнянні з класичним натурним експериментом, а саме:

- моделювання є економічно дешевшим;
  - у більшості випадків займає значно менше часу;
  - не потребує працюючого виробництва;
  - отримані результати розрахунків можуть мати досить високий рівень точності у співвідношенні з реальними процесами.
- З іншого боку, є і недоліки:
- потребує відповідної кваліфікації персоналу;
  - обмежено існуючим математичним, фізичним та технічним апаратом;
  - потребує потужної обчислювальної техніки;
  - об'ємні задачі, пов'язані з моделюванням фізико-хімічних процесів, можуть займати певний час (але все рівно значно менше, ніж експеримент);
  - на час розрахунків у експоненціальній залежності впливає складність закладеної моделі;
  - моделювання нестандартних та нових об'єктів потребує подальшої верифікації.

Для моделювання елементів двигунів та самих двигунів використовують різноманітні програмні комплекси, призначені для створення 3D-моделей (SolidWorks, AutoCad, Simens NX, Catia), створення кінцево-елементних моделей (Ansys Meshing, ICEM) та моделювання процесів,

які відбуваються у двигунах (Ansys Fluent, CONVERGE та ін.).

Застосування CFD-комплексів для вирішення складних термодинамічних завдань знаходить відображення у широкому спектрі дослідницьких робіт. Можна проілюструвати їх використання при аналізі роботи ДВЗ [8], реактивних двигунів [9], турбін різної потужності [10] та установок складного термодинамічного циклу [6, 11].

**Відокремлення невіршених раніше частин загальної проблеми.** При розгляді наявних досліджень на тему застосування водню у гібридних газопарових установках можна побачити велике поле для нових досліджень та потенційного розширення уявлень з цієї тематики.

Дослідження процесу роботи камер згоряння з впорскуванням пари є перспективними напрямком з урахуванням потенційного подальшого застосування таких установок на великих морських судах, наприклад, судах типу FPSO.

Різноманітність існуючих кінетичних схем горіння водню потребує створення бази знань для подальшого порівняння отриманих результатів моделювання з натурними експериментами, що, у свою чергу, сприятиме розширенню уявлень про можливості гібридних газопаротурбінних установок.

**Мета дослідження.** В енергомашинобудуванні приділяють окрему увагу питанню екологічного впливу двигунів на навколишнє середовище. Теоретичне дослідження з отриманням можливих рівнів екологічних

показників роботи камери згоряння з впорскуванням пари, яка працює на водневому паливі у складі гібридної газопарової установки, є основною метою даної статті.

**Об'єктом дослідження** є процеси в камері згоряння контактного газопарового двигуна. **Предмет дослідження** – закономірності процесів, отриманих при використанні детальних кінетичних схем горіння водневого палива і моделюванні камер згоряння газотурбінного двигуна.

### Основний матеріал

**Моделювання процесів.** Впорскування водяної пари у камеру згоряння – один з способів, який використовують для покращення екологічних показників газових турбін, а саме зниження рівня оксидів азоту  $\text{NO}_x$ . Прототипом для розрахунків обрано камеру згоряння установки типу «Водолій» потужністю 16 МВт з двоступеневою подачею пари в жарову трубу.

За даним прототипом [12, 13] було побудовано 3D-модель (рис. 2) та розроблено кінцево-елементну модель (рис. 3). Після чого отримана модель була інтегрована у розрахунковий комплекс Ansys Fluent [14], за допомогою якого проведено відповідні розрахунки процесів горіння у камері згоряння.

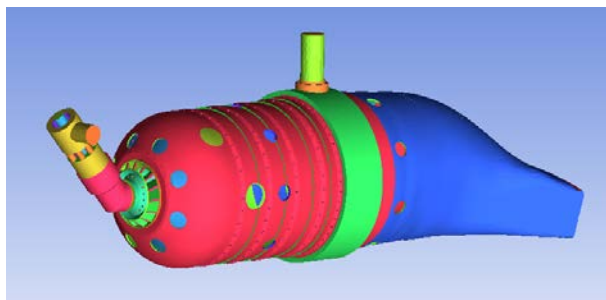


Рис. 2. 3D-модель жарової труби камери згоряння

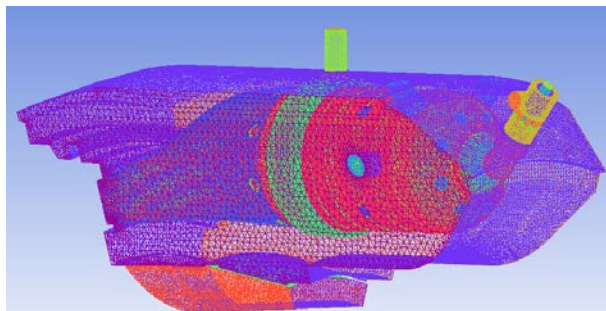


Рис. 3. Кінцево-елементна модель 1/24 частини камери згоряння

Математична модель фізико-хімічних процесів детально описана у [15], тому наведемо тільки деякі її положення:

- застосована модель хімічних реакцій Eddy Dissipation Concept (EDC) model;
- застосована модель турбулентності  $k-\epsilon$  model;
- фізико-хімічні процеси розраховувались на основі рівнянь, які описують закони збереження маси, імпульсу, енергії та хімічних складових в багатокомпонентній реагуючій турбулентній системі у часткових похідних.

Обчислення викидів оксидів азоту відбувалося з використанням багаторівневої математичної моделі на основі закону збереження маси з урахуванням впливу дифузії та конвекції, формування та розпаду  $\text{NO}_x$  [6, 11].

**Вибір режиму роботи камери.** Режим роботи камери обрано орієнтуючись на потенційну сферу застосування установки з визначеною потужністю. Однією з безпосередніх переваг гібридних установок є широкий діапазон вихідної потужності, що цілком відповідає потребам суден типу FPSO. Наразі можливим місцем застосування вибрано судно FPSO MV 34 MIAMTE з трьома турбінами виробництва фірми Siemens потужністю 37 МВт [18].

Режим роботи камери згоряння (табл. 1) обраний на основі теоретичного дослідження можливостей роботи гібридної газопарової установки, яка працює на водневому паливі [16], та розподілення масових витрат водяної пари всередині жарової труби [17].

Таблиця 1. Режим роботи камери згоряння

| Параметр                                                           | Позначення          | Величина |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|----------|
| Температура зовнішнього повітря, К                                 | $T_{out}$           | 288      |
| Тиск у камері згоряння, МПа                                        | $P_2$               | 2,63     |
| Коефіцієнт надлишку повітря у камері згоряння (КЗ)                 | $\alpha_{GTE}$      | 3,19     |
| Витрата повітря через КЗ, кг/с                                     | $G_{c_{GTE}}$       | 55,64    |
| Кількість жарових труб                                             | $n$                 | 24       |
| Витрата палива через КЗ, кг/год                                    | $G_{hf}$            | 3052     |
| Витрата пари через КЗ, кг/с                                        | $G_{ss}$            | 16,6     |
| Витрата екологічної пари відносно витрати повітря через компресор  | $G_{envs}/G_c$      | 0,13     |
| Витрата екологічної пари відносно загальної витрати пари на камеру | $G_{envs}/G_{HRSG}$ | 0,4      |

**Кінетичні схеми горіння водневого палива.** Дослідження роботи камери згоряння з впорскуванням водяної пари передбачає застосування різних кінетичних схем горіння палива, які за характером протікання та наявними ланками перетворень максимально близько відповідають реальному процесу горіння.

З цією метою було відібрано декілька кінетичних схем:

- схема 1 [18]: механізм реакцій горіння  $H_2/O_2$  складається з дев'ятнадцяти зворотних елементарних реакцій, доповнених термодинамічними даними. Константи зворотних швидкостей обчислювалися за допомогою термодинамічних співвідношень;

- схема 2 [19]: механізм поєднує схему горіння водню і реакції утворення оксидів азоту та нараховує 56 реакцій з відповідними константами;

- схема 3 [20]: вбудований механізм Chemkin представлений 37 реакціями з відповідними константами;

- схема 4 [17]: одноступінчаста схема горіння водню.

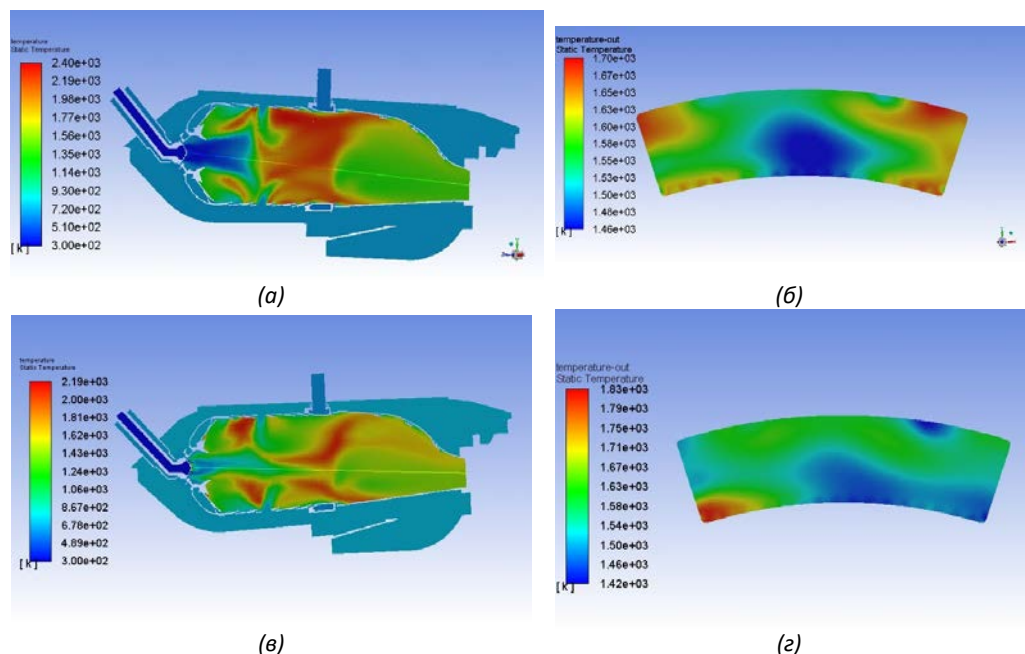
Порівняння отриманих результатів проведено відносно простої одноступінчастої схеми горіння водню (схема 4) [17].

До схем, у яких відсутній вбудований механізм утворення оксидів азоту, додатково інтегровано термічний механізм їх утворення та розкладання [21].

**Результати розрахунків.** У дослідженні [17] проведено розрахунок процесів в камері згоряння з використанням одноступінчастої схеми окиснення палива на обраному режимі її роботи. Даний розрахунок послугував базовою точкою, з якої були проведені всі інші симуляції з використанням зазначених вище детальних кінетичних механізмів.

За результатами розрахунків отримано розподіли визначальних параметрів у камері згоряння для всіх досліджуваних схем. Аналізуючи отримані дані відмітимо, що більшість варіантів розподілу температур та концентрацій  $NO_x$  мають подібний характер. Загальна інформація про розподіл температур наведена на рис. 4.

Як можна побачити, на відміну від одноступінчастої моделі при розрахунках з вико-



**Рис. 4.** Розподіл температур у камері згоряння:

а – повздовж жарової труби при застосовуванні детальних кінетичних моделей; б – у вихідному перерізі жарової труби при застосовуванні детальних кінетичних моделей; в – повздовж жарової труби при використанні одноступінчастої моделі окиснення палива [17]; г – у вихідному перерізі жарової труби при використанні одноступінчастої моделі окиснення палива [17]

ристанням детального механізму окиснення палива фронт полум'я (зони з найбільшими температурами продуктів) більш концентрується в перерізах підводу енергетичної пари, в первинній зоні жарової труби формується більш чітка зона рециркуляції, розподіл температур у зоні змішування більш однорідний. З використанням всіх розглянутих кінетичних механізмів водень згоряє повністю і процес горіння є стійким.

Для наглядного відображення впливу кінетичної моделі окиснення на робочий процес та розподіл температур по довжині

камери наведемо графіки зміни температури повздовж лінії, позначеної на рис. 4, що з'єднує центр осьового каналу паливної форсунки та середину вихідного перерізу жарової труби і лежить у медіальному повздовжньому перерізі (рис. 5).

Аналізуючи графіки, можна відмітити, що лінії розподілу температури повздовж жарової труби для різних кінетичних схем горіння мають високу ступінь подібності, але значно відрізняються від залежності, отриманої при використанні одноступінчастої моделі горіння.

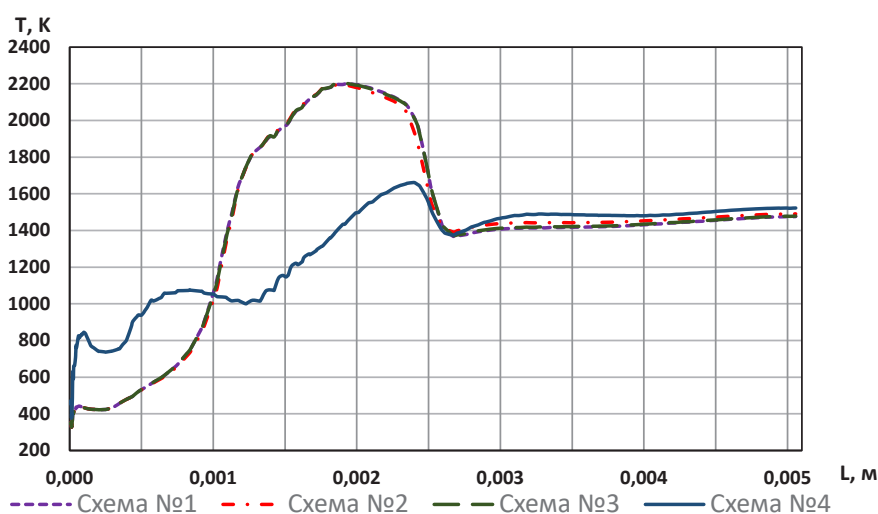


Рис. 5. Зміна температури повздовж жарової труби для різних кінетичних схем

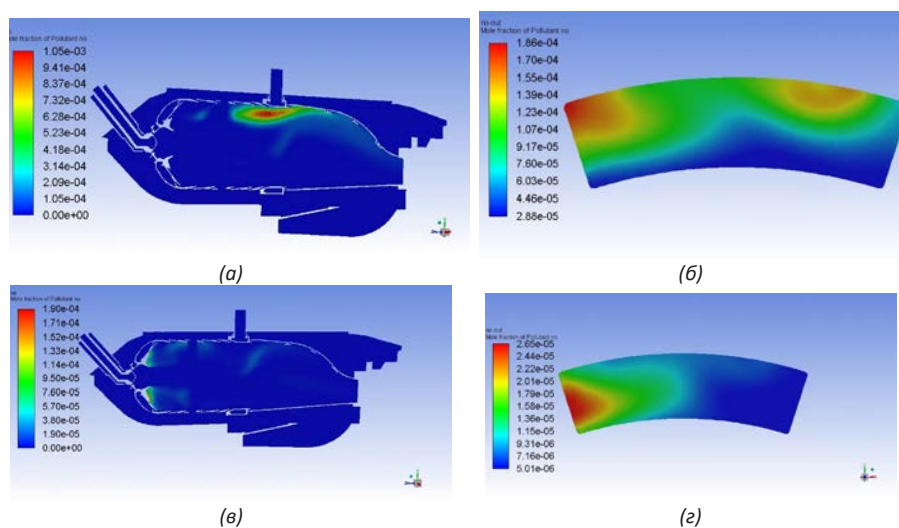


Рис. 6. Розподіли концентрацій оксидів азоту в камері згорання: а – повздовж жарової труби при застосуванні детальних кінетичних моделей; б – у вихідному перерізі жарової труби при застосуванні детальних кінетичних моделей; в – повздовж жарової труби при використанні одноступінчастої моделі окиснення палива [17]; г – у вихідному перерізі жарової труби при використанні одноступінчастої моделі окиснення палива [17]

Аналогічно зміні температур, розподіли концентрацій оксидів азоту мають схожий характер, їх можна побачити на рис. 6.

Наведемо середньомасові концентрації оксидів азоту в вихідному перерізі жарової труби для кожної кінетичної схеми (табл. 2).

**Таблиця 2.** Концентрація оксидів азоту в вихідному перерізі

| № | Кінетична схема | Вміст $\text{NO}_x$ , ppm |
|---|-----------------|---------------------------|
| 1 | Схема 1         | 5,3                       |
| 2 | Схема 2         | 6,7                       |
| 3 | Схема 3         | 5,1                       |
| 4 | Схема 4         | 1,4                       |

Також у якості характеристики роботи камери згоряння наведемо розподіл температур у вихідному перерізі жарової труби та значення коефіцієнту загальної нерівномірності поля температури  $\delta$  (табл. 3).

**Висновки.** Розглянуто можливість застосування детальних кінетичних моделей горіння водневого полива з урахуваннями утворення оксидів азоту для моделювання робочого процесу у газотурбінній камері згоряння, що працює на водні, з двоступеневою подачею пари.

У результаті моделювання отримано масиви даних та розподіли параметрів, аналіз яких показав, що:

1) всі досліджені детальні кінетичні схеми дають приблизно однакові результати як за характером зміни параметрів, так і за їх числовими значеннями, тому для подаль-

**Таблиця 3.** Розподіл температур у вихідному перерізі жарової труби

| № | Кінетична схема | $T_{max}$ , K | $T_{min}$ , K | $\bar{T}$ , K | $\delta$ , % |
|---|-----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | Схема 1         | 1698          | 1455          | 1572          | 15,5         |
| 2 | Схема 2         | 1704          | 1462          | 1573          | 15,4         |
| 3 | Схема 3         | 1703          | 1456          | 1572          | 15,7         |
| 4 | Схема 4         | 1834          | 1415          | 1571          | 26,7         |

шого застосування доцільно використовувати модель, яка потребує меншої обчислювальної потужності;

2) застосування детальних кінетичних схем, на відміну від одноступінчастої моделі, враховує багато проміжних реакцій, що у більшій мірі відповідає реальним процесам у камері згоряння, тому є пріоритетним для моделювання;

3) за числовими показниками кожна з розглянутих кінетичних схем прогнозує рівень емісії оксидів азоту, який задовольняє міжнародним стандартам на викиди токсичних речовин у граничних значеннях менше 25 ppm [22];

4) при застосуванні всіх досліджених схем ефекту проскоку полум'я за межі пального пристрою зафіксовано не було.

Наступним кроком у дослідженнях можливостей використання водню у якості палива газотурбінних двигунів є адаптація модифікованої геометрії камери згоряння з двоступеневою подачею пари до реальних параметрів паливоподачі та проведення відповідних тривимірних розрахунків.

## Список літератури

- [1] Siemens Gas and Power GmbH, Co. KG. Hydrogen power with Siemens gas turbines. U.S.A.: Houston. 2020. pp. 22.
- [2] GE. Hydrogen as a fuel for gas turbines. A pathway to lower  $\text{CO}_2$ . 2022. pp. 8.
- [3] Bhavsar A., Hingar D., Ostwal S., Thakkar I., Jadeja S, Shah M. The current scope and stand of carbon capture storage and utilization. A comprehensive review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023. №8, 100368. pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113246>.
- [4] Faqih M., Omar M.B., Rosdiazli I., Omar B.A.A. Dry-Low Emission Gas Turbine Technology: Recent Trends and Challenges. 2022. Appl. Sci. 12, 10922. <https://doi.org/10.3390/app122110922>.
- [5] Sehat A., Ommi F., Saboohi Z. Effects of steam addition and/or injection on the combustion characteristics. A review. *Thermal science*. 2021. vol. 25, №3A, pp. 1625–1652. <https://doi.org/10.2298/TSCITSCI191030452S>.
- [6] Burunsuz K. S., Kuklinovsky V. V., Serbin S. I. Investigations of the emission characteristics of a gas turbine combustor with water steam injection. *Refrigeration equipment and technology*. 2019. 55 (2), pp 77–83.

- [7] National energy technology laboratory. A literature review of hydrogen and natural gas turbines: current state of the art with regard to performance and nox control. 2022. pp. 28.
- [8] Tamrat S., Ramayya V., Babu Nallamothe R., Seifu Y. CFD Analysis of Sector Combustion Simulation in Four Stroke Direct Injection Diesel Engine. *Engineering and Technology Journal*. 2023. vol 08, Issue 03, pp. 2062–2068. <http://dx.doi.org/10.47191/etj/v8i3.10>.
- [9] Barati S., De Santoli L., Lo Basso G. Modeling and Analysis of a Micro Gas Turbine Fuelled with Hydrogen and Natural Gas Blends. *76th Italian National Congress ATI*. 2021. Vol. 312, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131208012>.
- [10] Serbin S., Washchilenko N., Dzida M., Kowalski J. Parametric analysis of the efficiency of the combined gas-steam turbine unit of a hybrid cycle for the FPSO vessel. *Polish maritime research*. 2021. № 112(4), pp. 122–132.
- [11] Dassault Systemes SolidWorks Corporation. Introducing SolidWorks. 2015. pp. 128.
- [12] ANSYS, Inc. ANSYS ICEM CFD Tutorial Manual. 2012. pp. 326.
- [13] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. 2012. pp. 1069.
- [14] Siemens Gas and Power GmbH, Co. KG. Siemens gas turbine portfolio. Erlangen, Germany. 2019.
- [15] Serbin S. I., Shmarkov O.A. Parameters of the hybrid gas-steam power plant operating on hydrogen fuel. *Collection of scientific papers*. 2023. №1 (490), pp. 103–110. [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).13](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).13).
- [16] Serbin S. I., Shmarkov O.A. Characteristics of combustion chamber of hybrid gas-steam power plant operated on hydrogen fuel for FPSO vessel. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2023. №1 (17), pp. 22–30. [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).03](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).03).
- [17] Conaire M. O., Curran H. J., Simmie J. M., Pitz W. J., Westbrook C. K. A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation. *International Journal of Chemical Kinetics*. 2004. vol. 36, issue 11, pp. 603–622. <https://doi.org/10.1002/kin.20036>.
- [18] Drake M.C., Blint R.J. Thermal NO<sub>x</sub> in stretched laminar opposed-flow diffusion flames with CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> fuel. *Combustion and Flame*. 1989. vol. 76, issue 2, p. 151–167. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90064-3).
- [19] CHEMKIN, Software. CHEMKIN Tutorials Manual. 2011. pp. 274.
- [20] Zel'dovich Y. B. The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions. *Acta Physicochimica*. 1946. 21, pp. 577–628. <https://doi.org/10.1515/9781400862979.404>.
- [21] The European Parliament and The Council Of The European Union. DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Union*, L. 2010. 334/17. pp. 103.

---

© Шмарков О. А.

Дата надходження статті до редакції: 15.02.2024

Дата затвердження статті до друку: 28.02.2024