



**Serhiy
I. Serbin**
Сербін Сергій
Іванович

УДК 621.438

CHARACTERISTICS OF COMBUSTION CHAMBER OF HYBRID GAS-STEAM POWER PLANT OPERATED ON HYDROGEN FUEL FOR FPSO VESSEL

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГІБРИДНОЇ ГАЗОПАРОВОЇ УСТАНОВКИ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ВОДНЕВОМУ ПАЛИВІ, ДЛЯ СУДНА FPSO

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).03](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).03)



**Oleksandr
A. Shmarkov**
Шмарков
Олександр
Андрійович

Serhiy I. Serbin

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

Oleksandr A. Shmarkov

Шмарков Олександр Андрійович,
аспірант
foreveronlytrickster@gmail.com
ORCID: 0009-0001-0916-5157

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

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

Abstract. The issue of environmental aspects of power plants in the modern world is inseparably considered inseparable from increasing efficiency. Therefore, researchers propose new approaches to improve pollutant emissions. The article considers the possibility of combining methods of increasing efficiency and environmental aspects to use the potential of energy carriers in conjunction with minimizing environmental damage. The article is aimed at investigating the processes of combustion of hydrogen fuel in the combustion chamber of a contact-type turbine as part of a hybrid gas-steam power plant and the influence of various variants of steam injection into the chamber on the emission indicators. The study was carried out by modelling using modern CFD complex such as Ansys Fluent. As a result, data on possible environmental indicators in the selected mode with different variants of steam injection are obtained, and the contours of temperature and concentrations of nitrogen oxides in different cross-sections of the flame tube are presented. The influence of the amount of injected ecological steam on nitrogen oxide emissions is reflected. The possibility of using of hybrid power plant for Floating Production, Storage, and Offloading (FPSO) vessels and gas carriers is considered.

Key words: gas turbine engine; green energy; hydrogen; hybrid cycle; combustion chamber; environmental.

Анотація. Питання екологічності енергетичних установок у сучасному світі розглядається невід'ємно від питання ефективності. Тому дослідники пропонують нові підходи до покращення емісії шкідливих речовин. У статті розглядається можливість поєднання методів підвищення ефективності та екологічності для використання потенціалу енергоносіїв у сукупності з мінімізацією шкоди навколишньому середовищу. Метою статті є дослідження процесів горіння водневого палива у камері згоряння з впорскуванням пари у складі гібридної газопарової

установки та впливу різних варіантів підведення пари в камеру згоряння на показники емісії шкідливих речовин. Дослідження проводилось шляхом моделювання з використанням сучасних CFD комплексів, таких як Ansys Fluent. У результаті отримано дані про екологічні показники на вибраному режимі роботи установки у разі різних варіантів впорскування пари, представлено розподіли температур та концентрацій оксидів азоту в різних перерізах жарової труби. Показано вплив кількості екологічної пари, що впорскується в камеру, на викиди оксидів азоту. Розглянуто можливість застосування установки для суден-газовозів та плавучих об'єктів нафтогазовидобутку типу FPSO.

Ключові слова: газотурбінний двигун; зелена енергетика; водень; гібридний цикл; камера згоряння; навколишнє середовище.

References

- [1] Serbin, S.I., Shmarkov, O.A. (2023). Parameters of the hybrid gas-steam power plant operating on hydrogen fuel. *Zbirnik naukovih prac' NUK*, № 1 (490), pp. 103–110.
- [2] Cherednichenko, O.K., Serbin, S.I. (2020). Termohimichni tehnologii dlia energetichnih moduliv plavuchih ob'ektiv naftogazovidobutku ta suden-gazovoziv: monograph. Mykolaiv: «Torubara», 132 p.
- [3] Burunsuz, K.S., Kuklinovsky, V.V., Serbin, S.I. (2019). Investigations of the emission characteristics of a gas turbine combustor with water steam injection. «*Holodilna tehnika ta tehnologia*», 55 (2), pp. 77–83.
- [4] Mishra, R.S., Agarwal, S. (2018). Performance parametric analysis of retrofitted Gas turbine cycle using STIG and Evaporative cooling techniques. *International Journal of Research in Engineering and Innovation*. Vol. 2. No. 5, pp. 469–483.
- [5] Tekin, N., Ashikaga, M., Horikawa, A., Funke, H. (2018). Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. *Gas for energy*. No. 2/2018, pp. 1–6.
- [6] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. (2020). Hydrogen power with Siemens gas turbines. U.S.A.: Houston, 22 p.
- [7] ANSYS Inc. (2012). ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, 1069 p.
- [8] Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (2015) *Introducing SolidWorks*, 128 p.
- [9] ANSYS, Inc. (2012) ANSYS ICEM CFD: Tutorial Manual, 326 p.
- [10] Serbin, S.I., Kozlovskiy, A.V., Burunsuz, K.S. (2016). Investigations of Nonstationary Processes in Low Emissive Gas Turbine Combustor with Plasma Assistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*. Vol. 44. No. 12, pp. 2960–2964.
- [11] Serbin S., Burunsuz K., Chen, D. (2022). Investigation of the Characteristics of a Gas Turbine Combustion Chamber with Steam Injection Operating on Hydrogen-Containing Mixtures and Hydrogen. *International Journal of Chemical Engineering*. Vol. 2022, article ID 9123639, pp. 1–12.
- [12] 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.
- [13] FPSO MIAMTE MV34 – IMO 9416692. (2023). Retrieved from: <https://www.shipspotting.com/photos/3483441?navList=moreOfThisShip&imo=9416692&lid=3413030>.
- [14] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. (2019). Siemens gas turbine portfolio. Erlangen, Germany.

Постановка завдання. Енергетичне машинобудування – сфера, яка бурхливо розвивається та тісно інтегрована у промисловість у багатьох її аспектах, у тому числі і для забезпечення функціонування морської інфраструктури. За рахунок широкого розповсюдження теплові двигуни значною мірою впливають на навколишнє середовище. І цей вплив напряду залежить від кількості шкідливих речовин у вихідних газах.

Тому, керуючись сучасними тенденціями розвитку в машинобудуванні та газотурбобудуванні, на перший план виходять вимоги щодо підвищення не тільки показників ефективності агрегатів, але й їх екологічні показники, такі як емісія шкідливих речовин (NO_x, CO_x, S тощо).

Великий інтерес на шляху зниження викидів діоксиду вуглецю в атмосферу тепловими двигунами становлять дослідження згоряння палив, які не містять вуглець

у своєму складі. Таким чином, використання водню повністю відповідає такій тенденції [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності використання потенціалу енергоносіїв у сукупності з мінімізацією шкоди навколишньому середовищу – парадигма проектування енергетичного обладнання у сучасному світі.

Натепер видобуток нафти та газу на шельфі морів та океанів є одним з основних джерел сировинної бази світової енергетики і має суттєвий вплив на економіку як окремих країн, так і цілих регіонів. Для забезпечення роботи на шельфових родовищах створено великий і різноманітний флот офшорних суден.

Розробка методів підвищення ефективності та екологічності енергетичних модулів судових газотурбінних та комбінованих енергетичних установок суден-газовозів та плавучих об'єктів нафтогазовидобутку вимагає розв'язання низки наукових та прикладних задач [2].

Одним з найбільш перспективних методів зниження викидів термічних оксидів азоту є впорскування водяної пари в первинну зону камери згоряння газотурбінного двигуна, що знижує температуру полум'я. З іншого боку, зниження температури неминуче викликає дестабілізацію процесів горіння, особливо для часткових режимів роботи газової турбіни [3].

Цей метод може значно підвищити потужність генерації електроенергії та ефективність системи. Знову ж таки впорскування пари може зменшити викиди токсичних компонентів. Таку технологію натепер застосовують у різних країнах і, як очікується, вона буде поширюватися і далі, оскільки газові турбіни мають низку техніко-економічних переваг [4].

Протягом останнього десятиліття світовий попит на відновлювану енергію швидко зростає, що привело до нових викликів для традиційних систем виробництва електроенергії [5].

Через великі відмінності у фізичних властивостях водню порівняно з іншими видами палива, такими як природний газ, використання водневих палив є досить склад-

ним завданням, особливо для спалювання з низьким рівнем викидів токсичних компонентів у сухому вигляді [5].

Водень відрізняється від вуглеводневого палива характеристиками згоряння, які створюють унікальні проблеми для паливних систем енергетичних газових турбін, призначених насамперед для спалювання природного газу. Температура полум'я для водню в адіабатичних і стехіометричних умовах майже на 300 градусів вища, ніж для метану. Швидкість ламінарного полум'я водню більш ніж у три рази перевищує швидкість поширення полум'я метану, а час затримки самозаймання водню більш ніж у три рази нижчий, ніж для метану [6].

Використовуючи водень як паливо (у складі суміші або у чистому вигляді) як альтернативу природному газу, газові турбіни можуть забезпечити низьковуглецеві або навіть безвуглецеві енергетичні рішення. Газові турбіни відіграють ключову роль у забезпеченні плавного переходу від викопних до декарбонізованих енергетичних систем, оскільки вони забезпечують гнучку та диспетчеризовану генерацію для підтримки мереж, в яких в основному переважає переривчаста відновлювана енергія. Ці можливості роблять газові турбіни ідеально придатними для досягнення завдань Всесвітньої енергетичної ради щодо безпечної, доступної та екологічно стійкої енергії [6].

Поєднуючи різні методи підвищення ефективності та екологічності в одній схемі, можна досягти результату, за якого недоліки одних методів будуть компенсуватися перевагами інших.

Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Сучасні знання про можливості роботи гібридних газопарових установок на водні досить обмежені. Відповідно, й екологічні показники, які можна отримати у разі роботи камери згоряння турбіни з впорскування водяної пари у складі таких установок, теж невідомі. Це зумовлено складністю процесів, які відбуваються у таких камерах, та відсутністю широкої експериментальної бази.

Тому дослідження робочих процесів газотурбінної камери згоряння з впорскуван-

ням водяної пари та отримання нових емісійних характеристик паливоспалюючих пристроїв з використанням сучасних CFD обчислювальних комплексів відповідає загальним запитам галузі енергетики, які спрямовано на покращення ефективності енергетичних установок та вирішення екологічних проблем.

Метою статті є теоретичне дослідження екологічних показників камери згоряння гібридної газопарової установки, яка працює на водневому паливі, для судна типу FPSO. Об'єктом дослідження вибрано робочі процеси в камері згоряння гібридної газопарової установки. Предмет дослідження – закономірності зміни екологічних показників камери газо-паротурбінної установки за різних витрат екологічної та енергетичної пари, яка впорскується в камеру згоряння після утилізаційного парогенератора.

Виклад основного матеріалу.

1. Моделювання процесів

Як прототип вибрано камеру згоряння газо-паротурбінної установки типу «Водолій» потужністю 16 МВт з впорскуванням пари в камеру згоряння. Пара, яка підводиться, поділяється на екологічну (впорскується в первинну зону горіння) та енергетичну (впорскується в зону змішування жарової труби) [3].

Розрахунки процесів у камері згоряння газопаротурбінного двигуна проводилися з використанням CFD комплексу Ansys Fluent [7]. 3D-модель камери згоряння розроблено за допомогою програмного комплексу SolidWorks [8]. Кінцево-різницьку сітку створено за допомогою системи ICEM CFD [9].

Геометрична модель камери згоряння (рис. 1) складається з таких основних елементів: завихрювач повітря, жарової труби, вихідного дифузора, а також трубок підведення водню та перегрітої пари. Окрім цього, у корпусі жарової труби передбачено вісім отворів для подачі первинного повітря в зону горіння та вісім отворів для подачі вторинного повітря до зони змішування. Завихрювач повітря забезпечує подачу частки первинного повітря та екологічної пари в зону горіння. Через колектор, розташований посередині жарової труби, в зону змішування подається енергетична пара, утворюючи з робочим тілом високоенергетичну газопарову суміш. Окрім цього, конструктивно передбачено спеціальні патрубки для перекидання полум'я між жаровими трубами.

На основі геометричної моделі створено кінцево-елементну модель 1/24 частини камери згоряння (рис. 2).

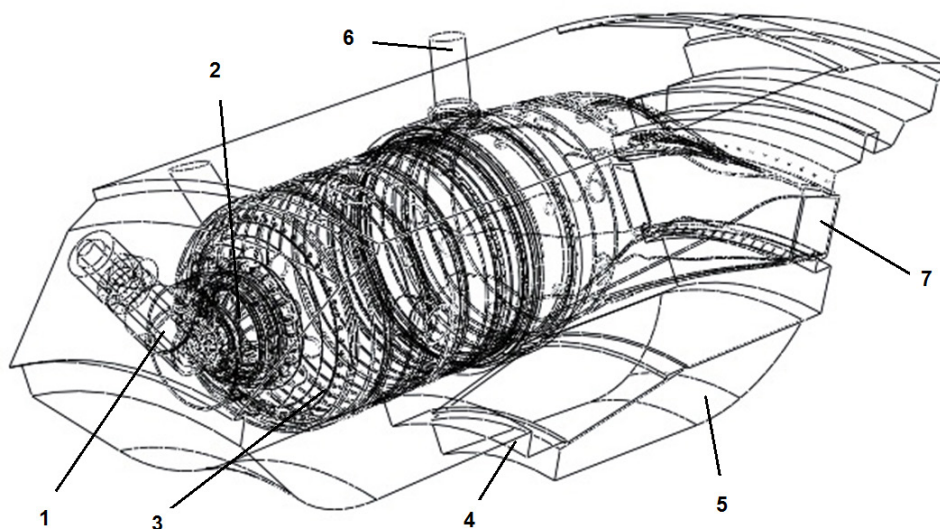


Рис. 1. Тривимірна геометрична модель камери згоряння: 1 – форсунка для підведення водню та екологічної пари; 2 – завихрювач повітря; 3 – жарова труба; 4 – вхід повітря після компресора; 5 – вхідний дифузор; 6 – патрубок підведення енергетичної пари; 7 – вихідний дифузор жарової труби

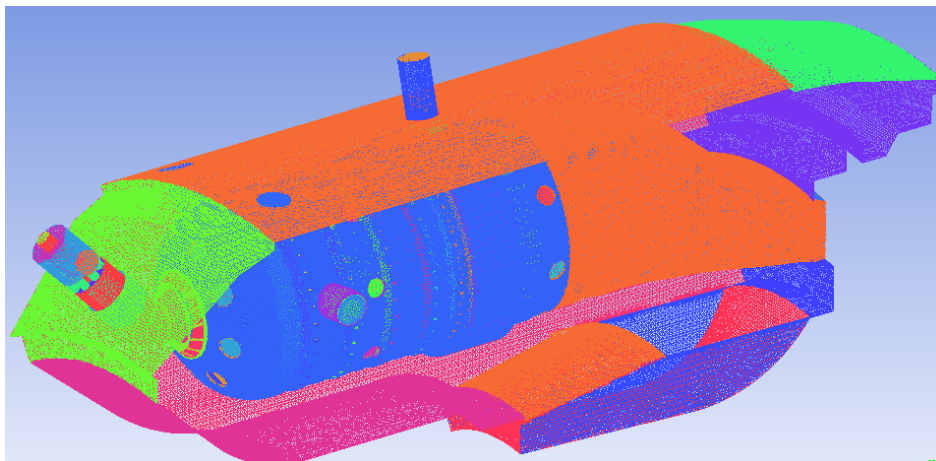


Рис. 2. Кінцево-елементна модель камери згоряння з впорскуванням пари

Процеси у камері згоряння розраховано з використанням моделі горіння Finite rate/Eddy Dissipation та $k - \varepsilon$ моделі турбулентності.

Моделювання фізико-хімічних процесів у камері газопаротурбінного двигуна проводилось на основі системи рівнянь, записаних у часткових похідних, які описують закони збереження маси, енергії, імпульсу та хімічного складника в багатокомпонентній реагуючій турбулентній системі [7; 11].

Рівняння збереження маси, або рівняння нерозривності для стислих і нестислих середовищ:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m, \quad (1)$$

де ρ – масова густина потоку;

$\vec{v}$ – вектор локальної швидкості потоку;

S_m – джерельний член, який визначає масу, яка привноситься в потік будь-яким способом [7; 11].

Рівняння збереження кількості руху в нерухомій системі координат:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \tau_{st} + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (2)$$

де p – статичний тиск;

$\rho \vec{g}$ – гравітаційна сила, що діє на одиницю маси;

$\vec{F}$ – зовнішні сили, що діють на потік;

τ_{st} – тензор тисків [11].

Рівняння збереження енергії у загальному вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \vec{J}_i + S_h, \quad (3)$$

де E – повна енергія;

$\vec{J}_q$ – густина теплового потоку суміші;

S_h – джерельний член, що описує тепловиділення в результаті хімічних реакцій.

Рівняння збереження маси для окремих хімічних компонентів суміші у загальному вигляді має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i, \quad (4)$$

де R_i – рівень утворення i -го компонента в результаті хімічної реакції;

S_i – рівень додаткового утворення i -го компонента з дисперсної фази або інших джерел;

$\vec{J}_i$ – масова дифузія i -го компонента;

Y_j – концентрація j -го компонента.

Рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k = 0, \quad (5)$$

Рівняння питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ε :

$$\rho \varepsilon u_i + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon = 0, \quad (6)$$

де G_k – генерація турбулентної кінетичної енергії залежно від градієнтів осереднених швидкостей;

G_b – генерація турбулентної кінетичної енергії в результаті дії сил плавучості для ідеальних газів;

Y_M – внесок пульсуючого розширення для стислих потоків;

α_k , α_ε – величини, зворотні значенням ефективного числа Прандтля для k і ε відповідно;

μ_{eff} – ефективна в'язкість;

S_k , S_ε – джерельні члени для k і ε ;

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – емпіричні константи;

$Pr_{t,k}$, $Pr_{t,\varepsilon}$ – турбулентні числа Прандтля для k і ε відповідно;

R_ε – додаткова умова у разі використання RNG $k - \varepsilon$ моделі турбулентності [7].

Таблиця 1. Механізм окислення палива [7]

Реакція	A	E , J/kg mole	β	Reaction order			
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	9,87e+08	3,1e+07	0	H_2	1.0	O_2	1.0

Математична модель викидів оксидів азоту являє собою систему рівнянь масопереносу, яка враховує конвекцію, дифузію, а також утворення та розкладання NO та споріднених сполук, і отримана на основі закону збереження маси. Вплив часу перебування реагенту в реактивному об'ємі на механізм утворення NO_x враховано в конвективних членах визначальних рівнянь, записаних у системі відліку Ейлера. Для «термічних» і «швидких» оксидів азоту рівняння переносу NO розв'язується у векторній формі на основі рівняння збереження маси для окремих хімічних компонентів суміші [3; 10; 12].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}, \quad (7)$$

де Y_{NO} – масова концентрація NO;

D – коефіцієнт дифузії;

$\vec{u}$ – вектор швидкості;

S_{NO} – джерельний член, який визначається залежно від механізму утворення NO_x [10; 12].

Як зазначалось вище, з умови відсутності у складі палива карбону емісія його оксидів відсутня. Механізм окислення палива представлено однією глобальною реакцією взаємодії водню з киснем (табл. 1).

2. Вибір режиму роботи камери згоряння

У дослідженні [1] теоретично проаналізовано параметри, котрі можна отримати у разі роботи гібридної газопарової установки, яка працює на водневому паливі, та обґрунтовано доцільність такої енергетичної системи.

Варіантом застосування подібних гібридних газопарових установок є їх використання на судах типу FPSO. Як базове вибрано судно FPSO MV 34 MIAMTE [13], яке обладнане трьома газовими турбінами фірми Siemens потужністю 37 МВт [14]

Орієнтуючись на сумарну потужність енергетичної установки судна, вибрано режим роботи гібридної газопарової установки на рівні 100 МВт. Відповідні параметри камери згоряння наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Параметри роботи камери згоряння на вибраному режимі [1]

Параметр	Позначення	Значення
Температура зовнішнього повітря, К	T_{out}	288
Тиск у камері згоряння, МПа	P_2	2,63
Коефіцієнт надлишку повітря в камері згоряння	α_{GTE}	3,19
Витрата повітря через компресор низького тиску, кг/с	G_{cGTE}	55,64
Кількість жарових труб		24
Витрата палива через камеру згоряння, кг/год	G_{hf}	3052
Витрата пари через камеру згоряння, кг/с	G_{ss}	16,6

3. Результати розрахунків

Проведено низку тривимірних розрахунків робочого процесу паливоспалюючого пристрою, які відрізнялися часткою пари, яка впорскувалась у первинну зону камери згоряння, і варіювалися від 6% до 15% з кроком у 3% від загальної витрати повітря через камеру.

За результатами симуляцій отримано масив даних та розподіл визначальних параметрів по довжині камери згоряння. На рис. 3 представлено розподіли температур у повздовжньому перерізі жарової труби за різних відношень витрати екологічної пари G_{env} до витрати повітря через камеру згоряння G_c . Сумарна кількість перегрітої пари, що поступала в камеру згоряння, залишалась незмінною. Видно, що зменшення витрати пари, яка подається у зону змішування, веде до підвищення максимальної температури у цій зоні та збільшенню нерівномірності температурного поля за жаровою трубою. Збільшення кількості пари, що подається в первинну зону, забезпечує зменшення температури газу і придушення утворення оксидів азоту. На вибраних режимах паливо згоряє повністю, а процес горіння є стійким. Зазначимо, що для всіх досліджених режимів зон проскоку полум'я в об'ємі пального пристрою не спостерігалось, що ще раз підтверджує переваги запропонованого методу спалювання водню.

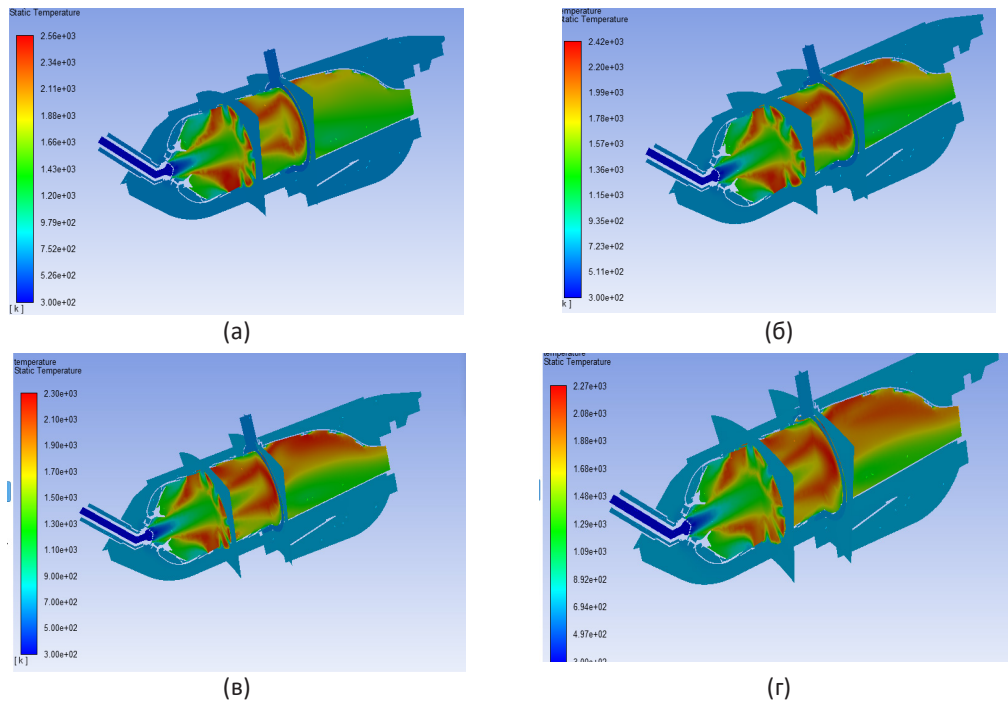


Рис. 3. Розподіл температур повздовж жарової труби за різних відношень витрати екологічної пари до витрати повітря через камеру G_{env_s}/G_c : а) 6%; б) 9%; в) 12%; г) 15%

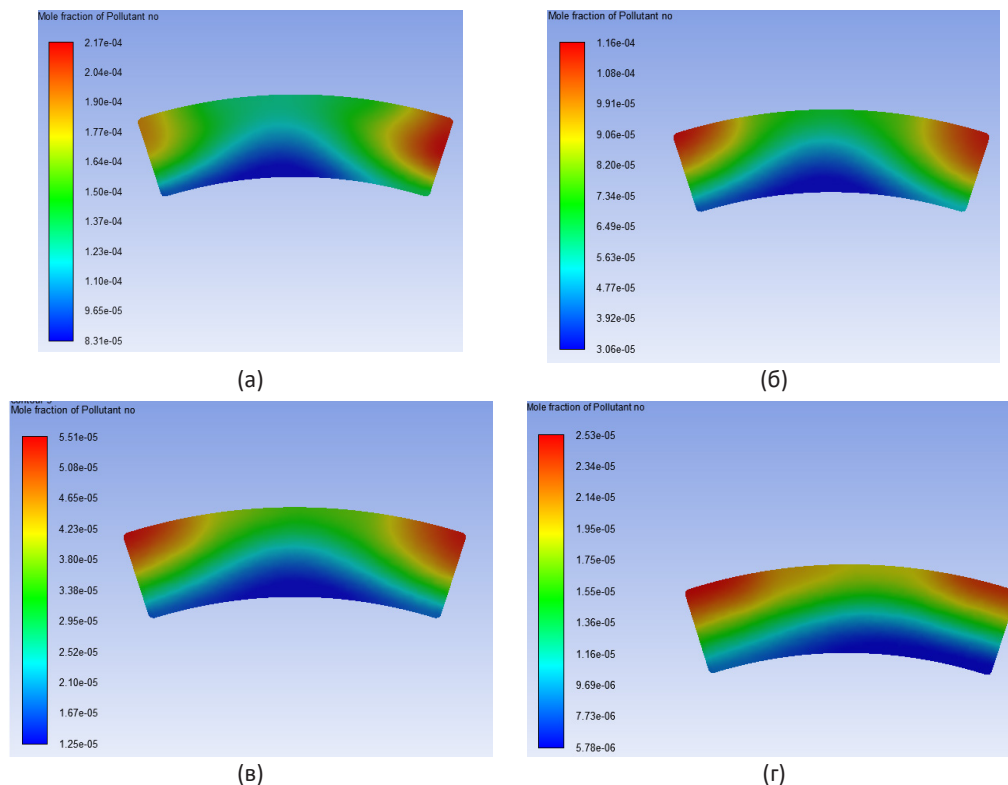


Рис. 4. Концентрації оксидів азоту NO у вихідному перерізі жарової труби за різних відношень витрати екологічної пари до витрати повітря через камеру G_{env_s}/G_c : а) 6%; б) 9%; в) 12%; г) 15%

На рис. 4 наведено залежності мольних часток оксиду азоту NO у вихідному перерізі жарової труби для цих же співвідношень витрат екологічної пари і по-

вітря через камеру згоряння контактного газотурбінного двигуна, а в табл. 5 – розрахункові параметри у вихідному перерізі камери згоряння.

Таблиця 3. Параметри у вихідному перерізі камери згоряння

Варіант	$G_{env_s} / G_c, \%$	T_{max}, K	T_{min}, K	$\bar{T}, K$	NO_x, ppm
1	6	1882	1341	1615	143
2	9	1871	1327	1617	69
3	12	1899	1338	1621	32
4	15	1867	1362	1615	15

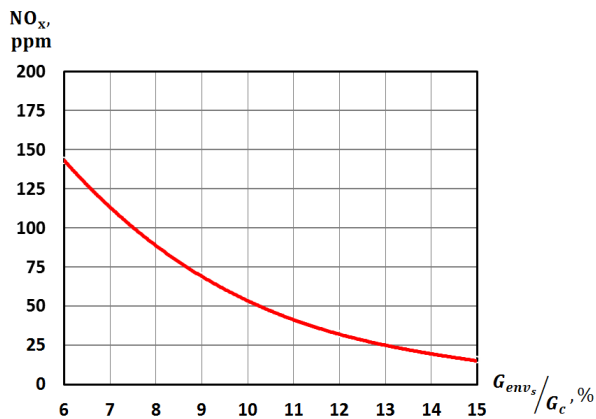


Рис. 5. Графік залежності викидів оксидів азоту від витрати екологічної пари стосовно витрати повітря через компресор

Відзначимо, що T_{max} – максимальна температура газів у вихідному перерізі; T_{min} – мінімальна температура газів; $\bar{T}$ – середня температура.

На рис. 5 показана залежність викидів оксидів азоту NO_x від витрати екологічної пари стосовно витрати повітря через компресор G_{env_s} / G_c . Для задоволення Європейських норм на викиди оксидів азоту для газотурбінних двигунів, менших ніж 25 ppm на номінальному режимі, відношення G_{env_s} / G_c повинно бути близько 0,13. Це по-

трібно враховувати у модернізації сучасних двигунів контактної схеми, що працюють на водні, та проектуванні перспективних.

Висновки. Розглянуто питання підвищення екологічності гібридних газопарових установок з впорскуванням пари в камеру згоряння. Доведено можливість застосування гібридних установок на судах типу FPSO. Дістала подальшого розвитку тривимірна математична модель турбулентних хімічно реагуючих потоків у газотурбінних камерах згоряння з впорскуванням пари, яка заснована на числовому розв'язку системи диференціальних рівнянь, що описують основні закони збереження енергії й переносу хімічних компонентів у турбулентній хімічно реагуючій системі. Розрахункові викиди оксидів азоту на виході гібридної газопарової установки дорівнюють 15 ppm у разі відношення витрати екологічної пари до витрати повітря через компресор контактного газотурбінного двигуна 0,15, що повністю задовольняє міжнародним нормам на викиди токсичних компонентів. Для всіх досліджених режимів роботи камери згоряння з двоступінчастим підведенням пари зон проскоку полум'я в об'ємі пального пристрою не спостерігалось.

Список літератури

- [1] Serbin S.I., Shmarkov O.A. Parameters of the hybrid gas-steam power plant operating on hydrogen fuel. Збірник наукових праць НУК, 2023. № 1 (490), с. 103–110.
- [2] Чередніченко О.К., Сербін С.І. Термохімічні технології для енергетичних модулів плавучих об'єктів нафтогазовидобутку та суден-газовозів : монографія. Миколаїв : Торубара, 2020. 132 с.
- [3] Burunsuz K.S., Kuklinovsky V.V., Serbin S.I. Investigations of the emission characteristics of a gas turbine combustor with water steam injection. Холодильна техніка та технологія, 2019. 55 (2), с. 77–83.
- [4] Mishra R.S., Agarwal S. Performance parametric analysis of retrofitted Gas turbine cycle using STIG and Evaporative cooling techniques. International Journal of Research in Engineering and Innovation, 2018. Vol. 2. No. 5, pp. 469–483.
- [5] Tekin N., Ashikaga M., Horikawa A., Funke H. Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. Gas for energy. No. 2. 2018, pp. 1–6.
- [6] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. Hydrogen power with Siemens gas turbines. U.S.A.: Houston, 2020. 22 p.

- [7] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, 2012. 1069 p.
- [8] Dassault Systemes SolidWorks Corporation. Introducing SolidWorks, 2015. 128 p.
- [9] ANSYS, Inc. ANSYS ICEM CFD: Tutorial Manual, 2012. 326 p.
- [10] Serbin S.I., Kozlovskiy A.V., Burunsuz K.S. Investigations of Nonstationary Processes in Low Emissive Gas Turbine Combustor with Plasma Assistance. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016. Vol. 44, No. 12, pp. 2960–2964.
- [11] Serbin S., Burunsuz K., Chen D. Investigation of the Characteristics of a Gas Turbine Combustion Chamber with Steam Injection Operating on Hydrogen-Containing Mixtures and Hydrogen. International Journal of Chemical Engineering, 2022. Vol. 2022, article ID 9123639, pp. 1–12.
- [12] 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. No. 112(4), pp. 122–132.
- [13] FPSO MIAMTE MV34 – IMO 9416692. (2023) URL: <https://www.shipspotting.com/photos/3483441?navList=moreOfThisShip&imo=9416692&lid=3413030>.
- [14] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG. Siemens gas turbine portfolio. Erlangen, Germany. 2019.

© Сербін С.І., Шмарков О.А.

Дата надходження статті до редакції: 19.06.2023

Дата затвердження статті до друку: 26.10.2023