

УДК 621.438
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).17](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).17)

OPTIMISATION OF ECOLOGICAL PARAMETERS OF A CONTACT GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER OPERATING ON HYDROGEN USING A REACTOR MODEL

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ КОНТАКТНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА, ЩО ПРАЦЮЄ НА ВОДНІ, З ВИКОРИСТАННЯМ РЕАКТОРНОЇ МОДЕЛІ

Serhiy I. Serbin

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Oleksandr A. Shmarkov

shmarkov.oleksandr@gmail.com

ORCID: 0009-0001-0916-5157

С. І. Сербін,

докт. техн. наук, професор

О. А. Шмарков,

аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The use of hydrogen fuel in combination with advanced combustion process techniques in gas turbine engine (GTE) combustion chambers represents a promising field of research due to the wide range of potential configurations. This direction aligns with current trends in the energy sector and complies with regulatory plans adopted across Europe to achieve carbon neutrality, as well as with global efforts to reduce emissions in both industrial and transportation sectors.

Alongside the search for an optimal combustion chamber operating mode that ensures minimal environmental impact while maintaining required energy performance, increasing attention is being paid to alternative fuels with improved environmental characteristics. Hydrogen fuel, in particular, offers several advantages over traditional hydrocarbon fuels when used in GTEs. However, it also demands precise tuning of the fuel combustion system to fully harness its energy potential while keeping emissions of harmful substances, especially nitrogen oxides, within acceptable limits. One possible approach to simulating the combustion chamber processes in GTEs is through reactor modeling. In this work, a reactor-based model of a GTE combustion chamber with steam injection was developed. The model consists of three perfectly stirred reactors, two plug-flow reactors, and three adiabatic mixers, effectively replicating all key combustion zones.

Using this model and the appropriate mathematical framework, the study investigated the influence of several parameters on the environmental performance of the combustion chamber: the quantity of air passing through the vane-type swirler; the redistribution of primary and secondary air under a constant total flow rate; and the redistribution of steam between the energy-producing and emission-reducing flows, also under a fixed total mass flow.

The results of the simulations provide data that confirm the potential for improving the environmental performance of the combustion chamber by optimizing its operating conditions.

Key words: gas turbine engine; alternative fuels; hydrogen; hybrid cycle; heat recovery; reactor modeling.

Анотація. Застосування водневого палива в поєднанні з методами ускладнення робочого процесу в камері згоряння газотурбінного двигуна (ГТД) завдяки широкому спектру можливих конфігурацій є перспективним напрямом досліджень. Цей напрям узгоджується з актуальними тенденціями розвитку енергетичного сектору та відповідає затвердженім нормативним планам Європи щодо досягнення екологічної нейтральності, а також загальним трендам на зниження рівня шкідливих викидів у промисловості й транспорті.

Паралельно з пошуком оптимального режиму роботи камери згоряння, за яким забезпечується мінімальний рівень викидів при збереженні заданих енергетичних характеристик, все ширше застосовуються альтернативні види палива з покращеними екологічними властивостями. Зокрема, використання водневого палива в ГТД демонструє низку переваг у порівнянні з традиційними вуглеводневими паливами. Водночас такий підхід потребує точного налаштування паливоспалюючого пристрою з метою повного розкриття енергетичного потенціалу водню за умов допустимих рівнів викидів токсичних компонентів, передусім оксидів азоту.

Одним із можливих підходів до моделювання процесів у камері згоряння ГТД є використання моделей хімічних реакторів. У даній роботі розроблено реакторну модель камери згоряння з впорскуванням водяної пари, яка працює на водні, та містить три реактори ідеального змішування, два проточних реактори та три адіабатних змішувача, що дозволяє відтворити основні зони паливоспалюючого пристрою.

На основі цієї моделі та відповідного математичного апарату проаналізовано вплив наступних параметрів на екологічні характеристики камери згоряння: кількості повітря, яке проходить через лопатковий завихрювач, перерозподілу первинного та вторинного повітря за сталої їх сумарної витрати, а також перерозподілу водяної пари між енергетичним та екологічним каналами пальника при фіксованій її загальній витраті.

У результаті розрахунків отримано дані, які свідчать про значне покращення екологічних показників камери за рахунок оптимізації її геометричних і режимних параметрів.

Ключові слова: газотурбінний двигун; альтернативні палива; водень; гібридний цикл; утилізація теплоти; реакторне моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Разом з застосуванням альтернативних видів палива, що є одним з можливих підходів до досягнення встановлених міжнародними нормами екологічних показників, оптимізація робочого процесу відіграє не менш значущу роль за впливом на емісію шкідливих речовин. Так, розподіл первинного та вторинного повітря в перерізах камери згоряння, що приводить до зміни максимальної температури у зоні горіння та якості перемішування газової суміші з повітрям, значно впливає на екологічні показники камери. Таким чином, оптимізаційні дослідження камери згоряння ГТД, що пов'язані з виявленням впливу геометричних і режимних параметрів на робочий процес паливоспалюючого пристрою, є одним з ключових аспектів у процесі проектування двигуна.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ.

Камера згоряння ГТД відіграє ключову роль в процесі перетворення внутрішньої енергії палива в теплову енергію робочого тіла, тому організації робочого процесу у ній приділяється особлива увага [1].

Рівні емісії токсичних з'єднань залежать від організації робочого процесу. Так, на рівень емісії може впливати розподіл первинного та вторинного повітря у жаровій трубі, коефіцієнт надлишку повітря у зоні згоряння, розподіл витрат водяної пари, що впорскується в камеру, конфігурація потоку у жаровій трубі тощо.

Одночасно з пошуком оптимального режиму роботи камери, за якого екологічні показники будуть мінімальними, а енергетичні відповідатимуть проектним значенням, для покращення екологічної складової використовують альтернативні види палив. Так, застосування водневого палива у ГТД має низку переваг у порівнянні з традиційними вуглеводневими видами палива, хоча і потребує тонкого налаштування роботи паливоспалюючого пристрою для ефективного розкриття енергетичного потенціалу палива з прийнятними рівнями викидів токсичних речовин, переважно оксидів азоту [2].

Існує низка підходів до проектування конструктивних елементів ГТД, моделювання їх роботи та проведення оптимізації для отримання необхідних

показників як у енергетичному плані, так і в плані викидів шкідливих компонентів. Так, для проведення оптимізаційних розрахунків камери згоряння можна використовувати так звані реакторні моделі. За цим методом камера згоряння розглядається як сукупність послідовно або паралельно розташованих реакторів ідеального змішування (РІЗ) та проточних реакторів (ПР) у поєднанні з адіабатними змішувачами (АЗ) [3]

Реактор ідеального змішування часто розглядається як ідеалізоване середовище. Компоненти, які взаємодіють у реакторі, мають дуже високу швидкість змішування. Властивості всередині реактора вважаються просторово однорідними через ефективне перемішування газових фаз, що забезпечує ідентичний і однорідний склад газу всередині реактора. Відбувається хімічне перетворення компонентів, і це перетворення повністю контролюється швидкістю хімічних реакцій, а не молекулярною дифузією. Стінки вважаються некаталітичними, на них немає відкладень, тому масова витрата на вході та на виході рівні [4].

Проточний реактор у моделі розглядається у вигляді трубки певної довжини з постійним поперечним перерізом. Моделюється стаціонарний потік багатоконпонентного газу вздовж осової лінії цього реактора [5].

Адіабатний змішувач передбачає певний об'єм з великою швидкістю перемішування, він має безперервний підвід і відвід матеріалу та теплоізолюваний для виключення теплообміну з навколишнім середовищем. Робота адіабатного змішувача базується на таких припущеннях [6]:

- склад і температура газу є однаковими в усьому об'ємі;
- змішувач працює в усталеному режимі.

ВИДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ.

Застосування водневого палива у поєднанні з методами ускладнення робочого процесу у камері згоряння ГТД за чисельністю можливих модифікацій представляє собою перспективне поле для досліджень, яке відповідає сучасним тенденціям енергетичного сектору промисловості і нормативно затвердженим планам по досягненню нейтральної

екологічної зони у Європі, а також тенденціям загального зниження викидів у промисловому та транспортному секторах. ГТД контактного циклу з впорскуванням водяної пари, що працює на водні, відповідає заданому напрямку удосконалення характеристик енергетичних систем. Однак до сих пір не вирішені завдання оптимізації геометричних і режимних параметрів камер згоряння ГТД контактного типу, що працюють на чистому водні.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є теоретичне дослідження залежності впливу розподілу повітря та водяної пари на екологічні показники камери згоряння газотурбінного двигуна контактного типу.

Об'єктом дослідження обрано робочі процеси в камері згоряння зі ступінчастим впорскуванням пари, що працює на водні. Предмет дослідження – закономірності зміни екологічних показників камери згоряння при різних варіантах розподілу повітря та перегрітої пари по довжині жарової труби.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Досліджувана камера згоряння. В якості об'єкту дослідження для проведення оптимізаційних розрахунків з застосуванням розробленої реакторної моделі обрано камеру згоряння газотурбінної установки потужністю 16 МВт типу «Водолій» з ступінчастим впорскуванням пари виробництва АТ НКВГ «Зоря»-«Машпроєкт» [7].

2. Початкові параметри. Початковими для проведення розрахунків прийнято параметри режиму роботи камери, отримані при проведенні досліджень гібридної газопарової установки, які викладені у роботі [8]. Початкові дані для розрахунку наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Режим роботи камери згоряння

Параметр	Позначення	Значення
1. Температура навколишнього повітря, К	T_{out}	288,0
2. Тиск у камері згоряння, МПа	P_2	2,63
3. Коефіцієнт надлишку повітря у камері	α_{GTE}	3,19
4. Витрата повітря через компресор низького тиску, кг/с	G_{cGTE}	55,64
5. Кількість жарових труб		24
6. Витрата водню через камеру згоряння, кг/год	G_{hf}	3052,0
7. Витрата пари через камеру згоряння, кг/с	G_{ss}	16,6

3. Математична модель. Як було зазначено вище, реакторна розрахункова модель передбачає представлення камери згоряння ГТД як сукупності послідовно розташованих реакторів ідеального змішування (РІЗ), проточних реакторів (ПР) та адіабатних змішувачів

(АЗ) [9, 10, 11]. У межах дослідження було розроблено відповідну реакторну модель камери згоряння ГТД з впорскуванням водяної пари (рис. 1).

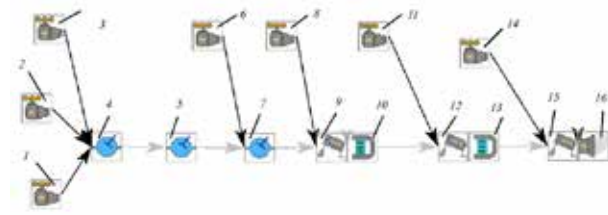


Рис. 1. Реакторна модель камери згоряння з впорскуванням водяної пари, що працює на водні: 1 – підведення водню; 2 – підведення повітря через завихрювач; 3 – підведення екологічної пари; 4 – РІЗ зони завихрювання; 5 – РІЗ зони зворотних течій; 6 – підведення повітря в зону основного горіння; 7 – РІЗ зони основного горіння; 8 – підведення енергетичної пари; 9 – АЗ; 10 – ПР зони підведення енергетичної пари; 11 – підведення повітря в зону розбавлення; 12 – АЗ; 13 – ПР зони розбавлення; 14 – підведення повітря для охолодження стінок камери згоряння; 15 – АЗ; 16 – вихід продуктів згоряння

Розрахунки ґрунтувалися на математичній моделі, основні рівняння якої наведені нижче.

Реактор ідеального змішування. Різноманітні процеси, які проходять у реакторі даного типу, описуються за допомогою наступних рівнянь: збереження маси, збереження енергії та переносу хімічних компонентів. Схема РІЗ представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема реактору ідеального змішування

Рівняння збереження маси. Враховуючи ідеалізованість даного реактора, рівняння збереження маси, яке представлено різницею сумарної масової витрати робочого тіла на вході до реактора та на виході з нього, за умови, що на стінках реактора немає ніяких відкладень, зводиться до наступного вигляду [4]

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = 0, \quad (1)$$

де ρ – масова густина суміші; V – об'єм реактора; t – час.

Звідси

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}, \quad (2)$$

де $\dot{m}$ – масова витрата.

Балансове рівняння утворення хімічних компонентів. Швидкість зміни концентрацій компонентів

всередині реактора ідеального змішування можна визначити за допомогою рівняння

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{\dot{m}_{in}}{\rho V} (Y_k - Y_k^*) + \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho}, \quad (3)$$

де Y_k – масова частка k -го компонента; Y_k^* – масова частка компонентів на вході з реактора; $\dot{\omega}_k$ – ступінь утворення (розкладання) k -го компонента в одиниці об'єму в результаті хімічної реакції; W_k – молекулярна вага k -го компонента [4].

Для реактора ідеального змішування рівняння (3) набуває вигляду [4]

$$\frac{\dot{m}_{in}}{\rho V} (Y_k - Y_k^*) + \dot{\omega}_k W_k V = 0. \quad (4)$$

Рівняння збереження енергії. Рівняння збереження енергії для реактора ідеального змішування представлено залежністю

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\dot{m}}{\rho V} \sum_{i=1}^n Y_i (h_i - h_i^*) - \frac{\sum_{i=1}^n h_i^* \dot{\omega}_i W_i}{\rho} + \frac{\dot{Q}}{\rho V} - \frac{dP}{\rho dt}, \quad (5)$$

де c_p – питома ізобарна теплоємність суміші; h_k та h_k^* – питома ентальпія k -го компонента в об'ємі та на вході з реактора; $\dot{Q}$ – теплові втрати в реакторі; P – тиск в реакторі; T – температура [4].

Враховуючи, що для стаціонарного режиму роботи реактора ідеального змішування

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (6)$$

рівняння (5) набуває вигляду

$$\frac{\dot{m}}{\rho V} \sum_{i=1}^n Y_i (h_i - h_i^*) - \frac{\sum_{i=1}^n h_i^* \dot{\omega}_i W_i}{\rho} + \frac{\dot{Q}}{\rho V} - \frac{dP}{\rho dt} = 0. \quad (7)$$

Проточний реактор. На відміну від РІЗ реактор ідеального витіснення або проточний реактор (рис. 3) є прикладом реактора з простим рухом рідини, яка повністю не перемішується, а рухається по трубі як поршень. У цьому випадку рідина проходить через перерізи без дисперсії та з постійним профілем швидкості, хоча фактична геометрія для наближення ідеального витіснення може бути набагато складнішою [12].

Реакції, які відбуваються у проточному реакторі, описуються за допомогою рівнянь збереження маси та енергії.

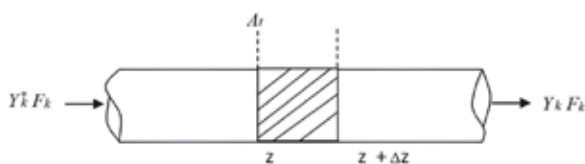


Рис. 3. Схема проточного реактора: F_k – об'ємна витрата k -го компонента; A_z – площа поперечного перерізу реактора; z – координата в осьовому напрямку [13]

Рівняння збереження маси:

$$u \frac{dY_k}{dz} = v_k r, \quad (8)$$

$$u \frac{dY_k}{dz} = \sum_{i=1}^R v_{ik} r_i, \quad (9)$$

де u – середня швидкість в проточному реакторі; v_k – стехіометричний коефіцієнт k -го компонента; r – швидкість хімічної реакції [12].

Рівняння збереження енергії. Отримання рівняння збереження енергії починається з ентальпійного балансу газового потоку для двох його положень за довжиною реактора L з діаметром D та наступним диференціюванням. З математичними викладками можна ознайомитись у роботі [12], наведемо лише остаточний його вигляд:

$$u \frac{dT}{dz} = -\frac{\Delta H_R}{\rho C_p} r - \frac{U p_w}{\rho C_p A_t} (T - T_c), \quad (10)$$

$$u \frac{dT}{dz} = -\frac{\Delta H_R}{\rho C_p} r - \frac{U p_w}{\rho C_p A_t} (T - T_c), \quad (11)$$

де ΔH_R – теплота реакції; U – коефіцієнт теплопередачі на одиницю площі; A_t – площа поперечного перерізу реактора; T_c – температура реактора [12].

Адіабатний змішувач. Адіабатний змішувач (рис. 4) моделюється з використанням базових принципів матеріального балансу та збереження енергії [11, 12].

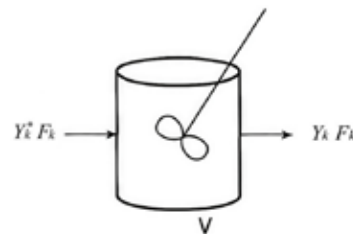


Рис. 4. Схема адіабатного змішувача [12]

Процеси в адіабатних змішувачах розраховуються виходячи з допущення про їх ідеальну теплоізоляцію. Масова частка хімічних компонентів при змішуванні різних газів 1 та 2

$$Y_k = \frac{(Y_k \dot{m})_1 + (Y_k \dot{m})_2}{\dot{m}},$$

де сумарна витрата $\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$.

Ентальпія суміші в потоці знаходиться так:

$$h = \frac{(c_p T)_1 \dot{m}_1 + (c_p T)_2 \dot{m}_2}{\dot{m}},$$

а температура

$$T = h / c_p,$$

де питома теплоємність суміші при постійному тиску у першому наближенні розраховується як функція

масового складу суміші і температури $\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2$ і далі уточняється для знаходження остаточного значення температури суміші.

Для моделювання процесів окиснення палива використовувалась модель горіння водню, котра складається з 19 елементарних зворотних реакцій з відповідними термохімічними коефіцієнтами [1].

4. Результати розрахунків. Розрахунки проводилися за допомогою розрахункового комплексу Ansys Chemkin [14]. Досліджувався вплив витрати повітря через завихрювач, розподілу первинного та вторинного повітря, а також розподілу екологічної та енергетичної пари на екологічні показники камери згоряння ГТД контактного типу. Для кожного варіанту розрахунків середня температура продуктів на виході з камери залишилась сталою і відповідала розрахунковій, при всіх варіантах паливо (водень) згоряло повністю.

Вплив витрати повітря через завихрювач на екологічні показники камери. Розрахунки проводились з варіюванням частки повітря, яке проходить через завихрювач камери згоряння. Зміна витрати повітря через завихрювач відбувалась за рахунок варіювання площі прохідного перерізу завихрювача від 8 до 16 см². На рис. 5 та 6 зображені графіки залежності впливу площі прохідного перерізу завихрювача F_{sw} на емісію оксидів азоту та об'ємну концентрацію оксидів азоту у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню.

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що при зменшенні площі прохідного перерізу завихрювача до значень нижче 10 см² рівень емісії оксидів азоту відповідає Європейським нормам на викиди токсичних компонентів газотурбінними двигунами (менше 25 ppmvd).

Вплив розподілу первинного та вторинного повітря на екологічні показники камери. Іншим варіантом покращення екологічних показників установки з впорскуванням водяної пари є зміна розподілу первинного та вторинного повітря у жаровій трубі камери згоряння. Варіювання відбувалося зі сталою сумарною витратою повітря через камеру. Так, витрата первинного повітря змінювалась у діапазоні значень від 0,45 до 0,85 кг/с, а вторинного – від 0,85 до 0,45 кг/с.

На рис. 7 та 8 зображені графіки залежності емісії оксидів азоту та об'ємної концентрації оксидів азоту у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню від відношення витрат первинного G_{prime} та вторинного G_{sec} повітря.

За отриманими даним можна дійти висновку, що при значеннях відношення $G_{prime} / G_{sec} < 1$ емісія оксидів азоту буде відповідати Європейським стандартам на викиди токсичних з'єднань.

Вплив розподілу екологічної та енергетичної пари на екологічні показники камери. Також досліджувався вплив зміни кількості екологічної та

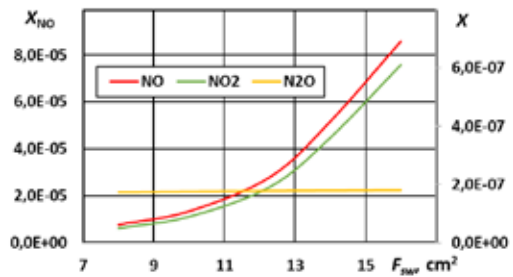


Рис. 5. Емісія оксидів азоту в залежності від площі прохідного перерізу завихрювача

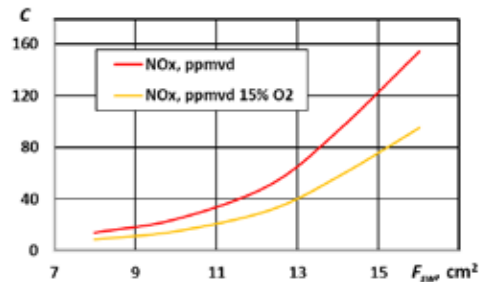


Рис. 6. Об'ємна концентрація оксидів азоту у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню в залежності від площі прохідного перерізу завихрювача

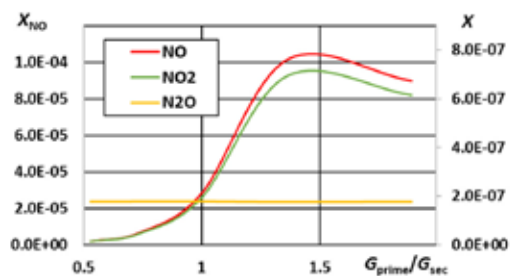


Рис. 7. Емісія оксидів азоту в залежності від відношення витрат первинного та вторинного повітря

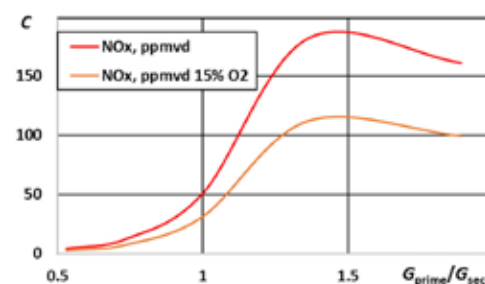


Рис. 8. Об'ємна концентрація оксидів азоту у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню в залежності від відношення витрат первинного та вторинного повітря

енергетичної пари у камері згоряння контактного ГТД на емісію оксидів азоту. Варіювання відношення витрат екологічної та енергетичної пари відбувалось зі сталою сумарною витратою пари, що впорскувалась до камери згоряння ГТД контактного типу. Витрата екологічної пари змінювалась в межах від 0,1 до 0,45 кг/с, а енергетичної – від 0,59 до 0,24 кг/с.

На рис. 9 та 10 зображено графіки залежності емісії оксидів азоту та об'ємної концентрації оксидів азоту у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню від відношення витрат екологічної G_{ecol} та енергетичної G_{ener} пари.

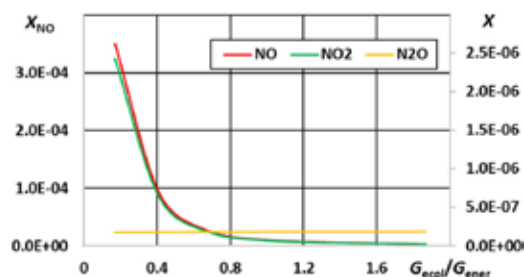


Рис. 9. Емісія оксидів азоту в залежності від відношення витрат екологічної та енергетичної пари

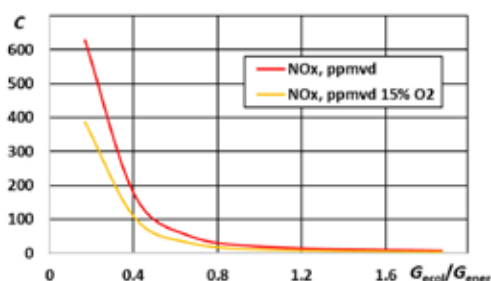


Рис. 10. Об'ємна концентрація оксидів азоту у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню в залежності від відношення витрат екологічної та енергетичної пари

Аналіз отриманих результатів показав, що перерозподіл витрат екологічної та енергетичної пари в бік екологічної через вплив на температуру в зоні горіння, значно зменшує викиди оксидів азоту. Так, при значеннях $G_{\text{ecol}}/G_{\text{ener}} \geq 1$ емісія оксидів азоту

становиться навіть меншою встановлених міжнародними стандартами на викиди тепловими двигунами.

ВИСНОВКИ

Розроблено реакторну модель камери згоряння ГТД контактного типу, що працює на водні. Для моделювання процесів окиснення палива використовувалась модель горіння водню, котра складається з 19 елементарних зворотних реакцій з відповідними термохімічними коефіцієнтами. Розглядалися можливості оптимізації робочого процесу у камері згоряння з впорскуванням пари, що працює на водні, з метою покращення її екологічних показників для відповідності Європейським нормам на викиди токсичних компонентів.

За результатами розрахунків:

1. Варіювання витрати повітря через завихрювач дає змогу впливати на емісію оксидів азоту і при зменшенні прохідного перерізу завихрювача на 19 % відносно заихрювача камери згоряння, призначеної для спалювання вуглеводневого палива, емісія знижується до значень, що відповідають Європейським стандартам.

2. Зміна відношення витрат первинного та вторинного повітря при сталій сумарній витраті повітря через камеру згоряння значно впливає на викиди оксидів азоту і при $G_{\text{prime}}/G_{\text{sec}} < 1$ рівень викидів задовольняє стандартам.

3. Варіювання відношенням витрат екологічної та енергетичної пари при сталій сумарній витраті пари суттєво впливає на рівень викидів оксидів азоту і при перерозподілі цих витрат відповідно до співвідношення $G_{\text{ecol}}/G_{\text{ener}} \geq 1$ емісія оксидів азоту стає нижчою за гранично допустимий рівень 25 ppmvd у перерахунку на суху суміш з 15 % вмістом кисню.

REFERENCES

- [1] Shmarkov, O. (2024). Using Detail Hydrogen Combustion Kinetic Models In CFD Modeling Of Combustor Working Processes For FPSO Vessels. *Shipbuilding & marine infrastructure*, № 1 (18), pp. 18–26. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).03](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).03)
- [2] Shmarkov, O., Serbin, S., Bondarenko, M. (2024). Utilizing CFD Technology in the Design of the Combustion Chamber for the Hydrogen-Powered Hybrid Energy System. *Lecture Notes in Networks and System*, 1008 LNNS, pp. 409–419. Retrieved from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85196616168&partnerID=MN8TOARS>
- [3] Zihao, W., Zhe, W. (2025). Towards foundation model for chemical reactor modeling: Meta-learning with physics-informed adaptation. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 218, pp. 839–853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.05.015>
- [4] Gao, J. (2019). A Report on Perfectly Stirred Reactor. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/341606311_A_Report_on_Perfectly_Stirred_Reactor
- [5] Kotov, V., Koelman, P. M. J. (2019). Plug flow reactor model of the plasma chemical conversion of CO_2 . *Plasma Sources Sci. Technol.*, 28 (095002). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.05.015>
- [6] Foutch, G.L., Gary, A.H. (2003). Reactors in Process Engineering. *Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition*, pp. 23–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00654-2>
- [7] 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. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v55i2.1356>

- [8] 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. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).03](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).03)
- [9] Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A. (1989). Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. *Sandia Report SAND89-8009B*, 127 p.
- [10] Lutz, A.E., Kee, R.J., Miller, J.A. (1987). SENKIN: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis. *Sandia Report SAND87-8248*, 32 p.
- [11] CHEMKIN. (2023). Ansys Chemkin-Pro Theory Manual. Retrieved from: https://www.scribd.com/document/629882616/Ansys-Chemkin-Pro-Theory-Manual?language_settings_changed=English
- [12] L.D. SCHMIDT. (1998). *The engineering of chemical reaction*. New York: Oxford University Press, 554 p.
- [13] Chimene, O.W. (2024). Plug Flow Reactor (PFR) Design for the Production of 100,000 tons per year of Cumene from the Catalytic Alkylation of Propylene and Benzene. *Journal of Engineering Research Innovation and Scientific Development*, 2(2), pp. 24–33. DOI: <https://doi.org/10.61448/jerisd22244>
- [14] ANSYS Chemkin Tutorials Manual. (2023). Retrieved from: <https://www.scribd.com/document/629882624/Ansys-Chemkin-Pro-Tutorials-2023-R1>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Shmarkov, O. (2024). Using Detail Hydrogen Combustion Kinetic Models In CFD Modeling Of Combustor Working Processes For FPSO Vessels. *Shipbuilding & marine infrastructure*, №1 (18), pp. 18–26. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).03](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).03)
- [2] Shmarkov, O., Serbin, S., Bondarenko, M. (2024). Utilizing CFD Technology in the Design of the Combustion Chamber for the Hydrogen-Powered Hybrid Energy System. *Lecture Notes in Networks and System*, 1008 LNNS, pp. 409–419. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85196616168&partnerID=MN8TOARS>
- [3] Zihao, W., Zhe, W. (2025). Towards foundation model for chemical reactor modeling: Meta-learning with physics-informed adaptation. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 218, pp. 839–853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.05.015>
- [4] Gao, J. (2019). A Report on Perfectly Stirred Reactor. URL: https://www.researchgate.net/publication/341606311_A_Report_on_Perfectly_Stirred_Reactor.
- [5] Kotov, V., Koelman, P. M. J. (2019). Plug flow reactor model of the plasma chemical conversion of CO₂. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 28 (095002). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.05.015>
- [6] Foutch, G.L., Gary, A.H. (2003). Reactors in Process Engineering. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, pp. 23–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00654-2>
- [7] 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. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v55i2.1356>
- [8] 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. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).03](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).03)
- [9] Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A. (1989). Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics. *Sandia Report SAND89-8009B*, 127 p.
- [10] Lutz, A.E., Kee, R.J., Miller, J.A. (1987). SENKIN: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics With Sensitivity Analysis. *Sandia Report SAND87-8248*, 32 p.
- [11] CHEMKIN. (2023). Ansys Chemkin-Pro Theory Manual. URL: https://www.scribd.com/document/629882616/Ansys-Chemkin-Pro-Theory-Manual?language_settings_changed=English
- [12] L.D. SCHMIDT. (1998). *The engineering of chemical reaction*. New York: Oxford University Press, 554 p.
- [13] The MathWorks, Inc. (2025). CSTR Model. URL: <https://ww2.mathworks.cn/help/mpc/gs/cstr-model.html>
- [13] Chimene, O.W. (2024). Plug Flow Reactor (PFR) Design for the Production of 100,000 tons per year of Cumene from the Catalytic Alkylation of Propylene and Benzene. *Journal of Engineering Research Innovation and Scientific Development*, 2(2), pp. 24–33. DOI: <https://doi.org/10.61448/jerisd22244>
- [14] ANSYS Chemkin Tutorials Manual. (2023). URL: <https://www.scribd.com/document/629882624/Ansys-Chemkin-Pro-Tutorials-2023-R1>.

© Сербін С. І., Шмарков О. А.

Дата надходження статті до редакції: 12.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 27.05.2025