

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Діасамідзе Бадрі Тенгізович

УДК 621.45.022; 621.43.057

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних  
двигунів використанням плазмохімічних елементів**

142 – Енергетичне машинобудування

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач: Діасамідзе Бадрі Тенгізович

Науковий керівник: Сербін Сергій Іванович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Діасамідзе Б. Т.* Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021.

Застосування двопаливних газотурбінних двигунів (ГТД) є одним із перспективних напрямків підвищення ефективності й надійності енергетичних систем. Одним із актуальних питань є контроль емісії оксидів азоту при роботі як на газоподібному, так і рідкому паливах. Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в області низькоемісійних камер згоряння методологічні і технічні аспекти вирішення науково-прикладного завдання створення високоефективних двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД з плазмовим супроводом до теперішнього часу розроблені недостатньо.

Натурні дослідження процесів розпилювання та горіння палив достатньо проблематичні у зв'язку з високою вартістю матеріальних та людських ресурсів, високими температурами в камері згоряння, але за допомогою сучасних методів математичного моделювання та обчислювальної гідродинаміки такі завдання можуть розв'язуватися з високою швидкістю та точністю. Дослідження шляхів вдосконалення емісійних характеристик паливоспалюючих пристроїв, що забезпечують розв'язання завдання створення високоефективних газотурбінних двигунів наземного та морського призначення, які відповідають вимогам до енергетичних модулів нового покоління та працюють на рідкому та газоподібному органічних паливах одночасно, – є актуальним і матиме як соціальний, так і економічний ефекти.

Таким чином, актуальність дисертаційного дослідження визначається:

а) необхідністю розробки математичних моделей впливу повітряної плазми на процеси активації паливно-повітряних сумішей різного фазового стану та розробки механізму плазмохімічного впливу на робочий процес двопаливної камери згоряння;

б) необхідністю досліджень аеродинаміки потоків та утворення токсичних компонентів в камері згоряння, що працює на природному газі та рідкому паливі, з урахуванням впливу низькотемпературної повітряної плазми.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД шляхом використання низькотемпературної повітряної плазми для активації паливно-повітряних сумішей.

Новизна результатів, одержаних в дисертації, полягає в наступному.

1. Вперше обґрунтовано інтенсифікуючий вплив низькотемпературної повітряної плазми на робочий процес двопаливної камери згоряння ГТД з попереднім сумішоутворенням на основі розробленої математичної моделі фізико-хімічних процесів двофазного турбулентного горіння у низькоемісійних паливоспалюючих пристроях, яка відрізняється від відомих запропонованим кінетичним механізмом окиснення вуглеводнів з урахуванням впливу плазмохімічних продуктів на процеси активації паливно-повітряних сумішей.

2. Вперше доведено можливість підвищення ефективності процесів одночасного горіння газоподібного і рідкого палива в камері згоряння ГТД з попереднім утворенням паливно-повітряної суміші шляхом плазмохімічного впливу струмин повітряної низькотемпературної плазми на процеси прогріву крапель рідкого палива, сумішоутворення й окиснення пального.

3. Вперше експериментально отримано вольт-амперні характеристики плазмового повітряного генератора низькотемпературної плазми, призначеного для роботи в складі двопаливних камер згоряння, та визначено, що зона його стійкої роботи лежить в діапазоні струмів від 0,1 до 0,9 А при витратах плазмоутворюючого повітря до 1,6 г/с, а мінімальне значення сили струму зростає до 0,3 А при додатковій подачі розпилюючого повітря.

4. Вдосконалено метод прогнозування процесів вигорання різних за

фізичним станом вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, заснований на числовому моделюванні їх характеристик на основі концепції дисипації вихорів (Eddy-Dissipation-Concept), який відрізняється від відомих тим, що враховує особливості окиснення палив різного стану за допомогою детальних хімічних механізмів в умовах взаємодії зони реагування з турбулентними пульсаціями потоку.

5. Отримав подальший розвиток підхід до моделювання впливу продуктів плазмохімічного елемента на процеси поширення полум'я у паливоспалюючих пристроях, заснований на залежності енергії активації реакцій окиснення різних за фізичним станом палив від кількості добавок плазмохімічних продуктів, яка враховується у рівняннях переносу хімічних компонентів.

Наукове значення роботи полягає в розширенні уявлень про фізико-хімічні механізми плазмової активації процесів горіння різних за фазовим станом палив в низькоемісійних камерах згоряння ГТД в частині впливу зменшення енергії активації результуючої реакції окиснення вуглеводнів на структуру хімічно реагуючих двофазних потоків, як наукового підґрунтя для реалізації концепції модернізації та створення двопаливних українських ГТД нового покоління.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці практичних рекомендацій з використання двопаливних камер згоряння в енергетиці, на підставі яких розроблено конструктивну схему двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт, що працює на газоподібному і рідкому паливах і забезпечує світові показники токсичності вихлопних газів. Запропонована тривимірна математична модель робочого процесу в двопаливній низькоемісійній камері згоряння з урахуванням впливу повітряної низькотемпературної плазми здатна прогнозувати енергетичні та емісійні характеристики найсучасніших газотурбінних двигунів. На її основі може бути проведена оптимізація параметрів камер згоряння новітніх енергетичних систем.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено при проектуванні вітчизняних газотурбінних установок для їх подальшого використання в якості мобільних енергетичних засобів комплексного забезпечення енергією об'єктів

морської інфраструктури (ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром»), при аналізі схемних рішень перспективних суднових енергетичних установок та виконанні проектних розробок концептуальних суден (“Zaliv Ship Design”), в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, показано її зв'язок з науковими програмами й темами, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та головні його задачі, представлено методи дослідження та обґрунтування достовірності отриманих результатів, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, відображено повноту викладення результатів у публікаціях та ступінь апробації на конференціях.

У першому розділі проаналізовано сучасні методи організації робочого процесу в двопаливних камерах згоряння ГТД світових та вітчизняних виробників, особливості функціонування плазмохімічних систем та хімічної кінетики активації різних за фазовим станом палив. Виконаний аналіз літератури дозволив визначити актуальність використання плазмової активації горіння вуглеводневих палив як одного з перспективних напрямків підвищення ефективності й надійності двопаливних енергетичних систем.

Другий розділ дисертації присвячено опису методології та обґрунтуванню основних методів досліджень робочих процесів в двопаливних камерах згоряння. Запропоновано для аналізу енергетичних і емісійних характеристик паливоспалюючих пристроїв використовувати основні рівняння математичної моделі турбулентного горіння рідких і газоподібних палив, моделі хімічної кінетики, що містять можливість урахування впливу низькотемпературної плазми на процеси поширення полум'я. Приведено основні рівняння математичної моделі, що описує робочий процес в турбулентній системі при спалюванні газоподібного палива. Надано опис принципової схеми експериментального стенду для проведення досліджень плазмових генераторів.

Третій розділ присвячено опису розроблених математичних моделей для

розрахунку двопаливної низькоемісійної камери згорання з плазмовим супроводом. Обґрунтовано вибір тривимірної моделі континуального типу, яка здатна прогнозувати основні процеси в камерах згорання ГТД при використанні різних за фазовим станом палив. Розроблено математичну модель плазмової активації горіння рідких та газоподібних палив в двопаливній камері згорання. Проведено верифікацію запропонованої математичної моделі.

Четвертий розділ присвячено теоретичним дослідженням характеристик двопаливної газотурбінної камери згорання, що працює на газоподібному та рідкому паливах. Проведено тривимірні розрахунки аеродинамічної структури потоку в двопаливній низькоемісійній камері згорання ГТД при роботі на газоподібному та рідкому паливах.

Виявлено основні особливості формуванні зон зворотних течій в жаровій трубі камери згорання на режимах холодної продувки і при підведенні пального. Проведено розрахунки різних варіантів подачі рідкого палива в двопаливну низькоемісійну камеру згорання. Отримано розподіли температур та концентрацій токсичних компонентів на виході камери згорання при одночасній роботі низькоемісійної камери на рідкому і газоподібному паливах при різних співвідношеннях їх витрат через канали радіально-осьових завихрювачів жарової труби.

У п'ятому розділі проаналізовано стан розробки генераторів низькотемпературної плазми, призначених для активації горіння газоподібних і рідких вуглеводневих палив в камерах згорання транспортних і стаціонарних газотурбінних двигунів. Розроблено конструктивну схему генератора низькотемпературної повітряної плазми з покращеними енергетичними характеристиками, призначеного для роботи в складі двопаливної камери згорання. Проведено експериментальні дослідження енергетичних характеристик генератора повітряної плазми без подачі та з подачею розпилюючого повітря і води, що імітує рідке паливо. Визначено діапазон сталої роботи плазмотрону постійного току. Зона сталої роботи дуги плазмотрона знаходиться у межах сили току від 0,1 до 0,9 А, а при додатковій подачі розпилюючого повітря і води

мінімальне значення сили струму зростає до 0,3 А.

Проведено тривимірні розрахунки характеристик двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт з плазмовим супроводом. Отримано розподіли основних параметрів по перерізах двопаливної камери згоряння з урахуванням різної кількості плазмохімічних продуктів, що подаються у первинну зону камери. Отримані результати математичного моделювання показали, що додавання плазмохімічних продуктів забезпечує зменшення концентрацій монооксиду вуглецю СО в вихідному перерізі жарової труби з 25-28 ppm до 3,9-4,6 ppm.

Розроблено практичні рекомендації щодо вдосконалення конструктивної схеми двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт виробництва ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” використанням плазмохімічних елементів, що дозволило забезпечити розрахункову емісію токсичних компонентів (оксидів азоту і монооксиду вуглецю) на рівні, який відповідає сучасним Європейським вимогам на викиди газотурбінних двигунів при роботі як на газоподібному, так і рідкому паливах.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, установка, турбокомпресор, двигун внутрішнього згоряння, камера згоряння, запалювання, конверсія, тепло-масоперенос, паливо газоподібне, паливо рідке, синтез-газ, емісія токсичних компонентів, плазмохімічне горіння, термохімія, робочий процес, математичне моделювання, термодинамічний аналіз.

#### **Публікації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:**

1. Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження двопаливної низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна / Б. Т. Діасамідзе, С. В. Вілкул, С. І. Сербін // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 1. – С. 27-33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.01.04> (входить до переліку наукових фахових видань України).

2. Сербін, С. І. Дослідження впливу швидкості розпилювання рідкого палива на характеристики двопаливної газотурбінної камери згоряння / С. І. Сербін, Б. Т. Діасамідзе // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2019. – № 1 (475). – С. 58–64. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).8](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).8) (*входить до переліку наукових фахових видань України*).

3. Serbin S. Investigations of the working process in a dual-fuel low-emission combustion chamber for an FPSO gas turbine engine / S. Serbin, B. Diasamidze, M. Dzida // Polish Maritime Research, 2020. – Vol. 27, no. 3(107). – P. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0050> (*індексується у наукометричних базах Scopus та Web of Science, квартиль Q2*).

4. Діасамідзе Б.Т. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів у двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД під час роботи на газоподібному паливі / Б. Т. Діасамідзе // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2021. – № 1(484). – С. 31–38. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2021.1\(484\).4](https://doi.org/10.15589/znp2021.1(484).4) (*входить до переліку наукових фахових видань України*).

5. Serbin S. Investigations of the emission characteristics of a dual-fuel gas turbine combustion chamber operating simultaneously on liquid and gaseous fuels / S. Serbin, B. Diasamidze, V. Gorbov, J. Kowalski // Polish Maritime Research, 2021. – Vol. 28, no. 2(110). – P. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0025> (*індексується у наукометричних базах Scopus та Web of Science, квартиль Q2*).

#### **Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

6. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Можливості створення низькоемісійних двопаливних камер згоряння ГТД // Сучасний стан та проблеми двигунобудування : Матеріали міжнар. науково-техн. конф. / Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2018. – С. 109–110.

7. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення оксидів азоту в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2019. – Т.1. – С. 330–332.



8. Діасамідзе Б. Т. Вибір математичної моделі для прогнозування вигорання рідкого палива в двопаливній низькоемісійній камері згорання // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2019. – Т.1. – С. 354–356.

9. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. *Можливості створення двопаливних газотурбінних камер згорання з плазмовим супроводом* // Суднова енергетика стан і проблеми: Матеріали міжнар. науково-техн. конф. / Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2019. – С. 242–247.

10. Сербін С. І., Вілкул С.В., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згорання ГТД при роботі на газоподібному паливі // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2020. – Т.1. – С. 302–305.

11. Сербін С. І., Вілкул С. В., Діасамідзе Б. Т. Дослідження аеродинамічної структури потоку та впливу на розподіл температур у двопаливній низькоемісійній камері згорання ГТД при роботі на газоподібному паливі за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки // Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування : Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції / Миколаїв : Іліон, 2020. – С. 12–14.

12. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т., Крикличенко О. В. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в камері згорання ГТД «Водолій» при роботі на супутньому нафтовому газі // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції / Миколаїв : НУК, 2020. – С. 225 –229.

13. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т., Георгіу В. В. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в камері згорання ГТД «Водолій» при роботі на рідкому паливі // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції / Миколаїв : НУК, 2020. – С. 220-224.

14. Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згорання ГТД при роботі на

газоподібному та рідкому паливах // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції / Миколаїв : НУК, 2020. – С. 205-210.

15. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення оксидів сірки в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД при роботі на рідкому паливі // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 11 Міжнародна науково-практична конференція / Херсон: Херсонська державна морська академія: 08-10 вересня 2020 р. – С. 256-257.

16. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Можливості застосування двопаливних газотурбінних двигунів для суден типу FPSO // Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету / Одеса: Видавництво Іванченка І. С., 2021. – С.225-230.

17. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження впливу плазмохімічних добавок на утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД при роботі на газоподібному та рідкому паливах // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XII міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / м. Миколаїв : НУК, 2021. – Т.1. – С. 263–265.

## ABSTRACT

*Diasamidze B.T. Increasing the efficiency of dual-fuel combustion chambers of gas turbine engines using plasma-chemical elements. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.*

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 142 "Power Machinery". – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2021.

The application of dual-fuel gas turbine engines (GTE) is one of the promising areas for increasing the efficiency and reliability of energy systems. One of the urgent issues is the control of nitrogen oxides emissions when working on both gaseous and

liquid fuels. Despite a large amount of research in the field of low-emission combustion chambers, methodological and technical aspects of the solution of scientific-applied tasks of the creation of high-efficiency dual-fuel low-emission combustion chambers GTE with plasma support has not been developed enough so far.

Researches of fuel spraying and combustion processes are quite problematic due to the high cost of material and human resources, high temperatures in the combustion chamber, but with modern methods of mathematical modeling and computational flow dynamics, such problems can be solved with high speed and accuracy. The research of improving emission characteristics of fuel combustion devices, which that meet the requirements of the new generation of energy modules creation of high-efficient power and marine gas turbine engines and operating simultaneously on liquid and gaseous organic fuels, - is an actual task which will have both social and economic effects.

Thus, the relevance of the thesis research is determined by:

a) the need to develop mathematical models of the influence of air plasma on the activation of fuel-air mixtures of different phase states and development of the mechanism of plasma-chemical influence on the working process of the dual-fuel combustion chamber;

b) the necessity of the studies of the aerodynamics of flows and formation of toxic components in the combustion chamber operating on natural gas and liquid fuel, taking into consideration the influence of low-temperature air plasma.

The main aim of the research is to study an increase in the efficiency of dual-fuel low-emission combustion chambers of the gas turbine engine through the use of low-temperature air plasma for fuel-air mixtures activation.

The novelty of research results, obtained in the thesis, is as follows.

1. For the first time the intensifying influence of low-temperature air plasma on the working process of a dual-fuel combustion chamber of a gas turbine engine with preliminary mixing based on the developed mathematical model of physicochemical processes of two-phase turbulent combustion in low-emission fuel processes of activation of fuel-air mixtures is obtained.

2. Firstly the possibility of increasing the efficiency of the processes of simultaneous combustion of gaseous and liquid fuels combustion chamber GTE with the previous formation of the fuel-air mixture due to the plasma-chemical effect of low-temperature air jet plasma on the processes of heating of liquid fuel's droplet heating, mixture formation and oxidation of fuel is proven.

3. For the first time the volt-ampere characteristics of the plasma air generator of low-temperature plasma intended for work as a part of dual-fuel combustion chambers, and determined that the zone of stable work of the plasma generator is in the range of currents from 0.1 to 0.9 A at a flow rate of plasma-forming air up to 1.6 g /s, and with an additional supply of atomizing air the minimum value of current increases to 0.3 A.

4. The method of forecasting combustion processes of the different physical states of hydrocarbon fuels in the GTE low-emission combustion chambers has been improved, based on numerical modeling of their characteristics using the concept of vortex dissipation (Eddy-Dissipation-Concept), which differs from the known by the taking into consideration the oxidation of different fuels using detailed chemical mechanisms in the interaction of the reaction zone with turbulent flow pulsations.

5. The approach to modeling the influence of products of the plasma-chemical element on the processes of flame propagation in fuel-burning devices was developed further. It is based on the dependence of the activation energy of oxidation reactions of different physical states of fuels on the number of additives of plasma-chemical products, which is considered in the transport equations of chemical components.

The scientific significance of the work is to expand the understanding of physicochemical mechanisms of plasma activation of combustion processes of different phase states of fuels in low-emission combustion chambers of gas turbine engines in terms of the impact of reducing the activation energy of the resulting hydrocarbon oxidation reaction on the structure of chemically reactive two-phase streams, as a scientific basis for implementing the concept of modernization and creation of new generation dual-fuel Ukrainian gas turbine engines.

The practical significance of the results is to develop practical recommendations for the use of dual-fuel combustion chambers in power machinery, based on which

design scheme of the dual-fuel low-emission combustion chamber of a gas turbine engine with a capacity of 25 MW that works on gaseous and liquid fuels on the level of world toxicity of exhausted gases requirements has been developed. The proposed three-dimensional mathematical model of the working process in a dual-fuel low-emission combustion chamber, taking into consideration the influence of low-temperature air plasma, can predict the energy and emission characteristics of modern gas turbine engines. Based on it, the optimization of the parameters of combustion chambers of the latest energy systems can be carried out.

The results of the research were implemented in the design of domestic gas turbine plants for their further use as mobile energy means of integrated energy source of marine infrastructure (SE "Research and Design Center for Shipbuilding" of the state concern "Ukroboronprom"), in the analysis of scheme solutions of promising marine power plants and the implementation of design developments of concept ships ("Zaliv Ship Design"), in the educational process in the preparation of applicants for higher education at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

The introduction of the thesis substantiates the relevance of the topic, shows its connection with scientific programs and topics, formulates the object and subject of research, purpose, and main tasks, presents research methods and justification of the results, determines the scientific novelty and practical significance of the results, reflects the completeness of the results in publications and the degree of approbation at conferences.

The first section analyzes modern methods of organizing the work process in dual-fuel GTE combustion chambers of world and domestic manufactures, features of functioning plasma-chemical systems, and chemic kinetics activation of various for phase fuel conditions. The performed analysis of the literature allowed determining the relevance of the use of plasma activation of hydrocarbon fuels as one of the promising areas for improving the efficiency and reliability of dual-fuel energy systems.

The second section of the thesis is devoted to the description of methodology and substantiation of basic methods research workflows in dual-fuel combustion chamber. For the analysis of energy and emission characteristics of fuel-burning devices use the

basic equations of the mathematical model turbulent combustion liquid and gaseous fuel, chemical kinetic models, and the possibility of taking into consideration the influence of low-temperature plasma on the processes of flame propagation are suggested. The basic equations of the mathematical model describing the working process in a turbulent system during the combustion of gaseous fuel are given. The description of the schematic diagram of the experimental stand for research of plasma generators is given.

The third section is devoted to the description of the developed mathematical models for the calculation of the dual-fuel low-emission combustion chamber with plasma activation. The choice of a three-dimensional model of continuous type is substantiated, which can predict the main processes in the combustion chambers of the gas turbine engine using different phase fuels. A mathematical model of plasma activation of combustion of liquid and gaseous fuels in a dual-fuel combustion chamber has been developed. Verification of mathematical model is offered.

The fourth section is devoted to theoretical research of the characteristics of a dual-fuel gas turbine combustion chamber operating on gaseous and liquid fuels. Three-dimensional calculations of the aerodynamic structure of the flow in the dual-fuel low-emission combustion chamber of the gas turbine engine when workings on gaseous and liquid fuels are carried out.

The main features of the formation of recirculation flow zones in the flame tube of the combustion chamber in the modes of cold flow and with fuel burning are revealed. Calculations were performed for different modes of supply of liquid fuel to a dual-fuel low-emission combustion chamber. Distribution of temperatures and concentrations of toxic components at the outlet of the combustion chamber has been received while operating a low-emission chamber on liquid and gaseous fuels at different ratios of their flow rates through the channels of radial-axial swirlers in the flame tube.

In the fifth section state of development of low-temperature plasma generators designed to activate the combustion of gaseous and liquid hydrocarbon fuels in combustion chambers transport and stationary gas turbine engines were analyzed. The

design scheme of the generator of low-temperature air plasma with the improved power characteristics intended for work as a part of the dual-fuel combustion chamber is developed. Experimental studies of the energy characteristics of the air plasma generator without supply and with the supply of atomizing air and water that simulates liquid fuel are carried out. The range of steady operation of the plasma torch is determined. The zone of constant burning of the plasma torch arc is in the current range from 0.1 to 0.9 A, and with the additional supply of atomizing air and water, the minimum value of the current increases to 0.3 A.

Three-dimensional calculations of the characteristics of a dual-fuel low-emission combustion chamber of a gas turbine engine with a capacity of 25 MW were performed with plasma activation. Distributions of basic parameters on sections of the dual-fuel combustion chamber are obtained, taking into consideration different amounts of plasma-chemical products supplied to the primary zone of the chamber. The obtained results of mathematical modeling showed that the addition of plasma chemical products reduces the concentrations of carbon monoxide CO in the outlet cross-section of the flame tube from 25-28 ppm to 3.9-4.6 ppm.

Practical recommendations for improving the design of a dual-fuel low-emission combustion chamber of a gas turbine with a capacity of 25 MW produced by Zorya - Mashproekt using plasma-chemical elements are given, which meets modern European requirements for emissions of gas turbine engines when working on both gaseous and liquid fuels.

**Keywords:** gas turbine engine, power plant, turbocharger, internal combustion engine, combustion chamber, ignition, conversion, heat-mass transfer, gaseous fuel, liquid fuel, synthesis gas, emission of toxic components, plasma-chemical combustion, thermochemistry, operating process, mathematical simulation, thermodynamic analysis.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ABSTRACT .....	10
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ В ДВОПАЛИВНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ ГТД .....	28
1.1 Аналіз сучасних методів організації робочого процесу в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД.....	28
1.2 Огляд основних конструктивних типів двопаливних камер згоряння ГТД світових та вітчизняних виробників.....	32
1.3 Аналіз можливостей використання низькотемпературної плазми в двопаливних камерах згоряння.....	47
1.4 Математичне моделювання робочих процесів як спосіб підвищення ефективності проектування двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД .....	55
1.5 Обґрунтування необхідності проведення досліджень за обраною темою.....	56
Висновки по першому розділу.....	58
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ В ДВОПАЛИВНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ ГТД.....	60
2.1 Задачі досліджень процесів в двопаливних камерах згоряння ГТД.....	60
2.2 Методи теоретичних досліджень та формування математичної моделі.....	64
2.3 Методологія експериментальних досліджень.....	75
Висновки по другому розділу .....	79
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД З ПЛАЗМОВИМ СУПРОВОДОМ .....	81
3.1 Розробка моделі двофазного горіння рідкого палива в камері згоряння .....	81
3.2 Модель плазмової активації горіння палив .....	88
3.3 Верифікація математичної моделі.....	96



РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ГАЗОПОДІБНОМУ ТА РІДКОМУ ПАЛИВАХ .....	101
4.1 Методика числового експерименту .....	101
4.2 Дослідження енергетичних та екологічних характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД, що працює на газоподібному паливі.....	104
4.2.1 Результати тривимірних розрахунків на режимі холодної продувки.....	104
4.2.2 Дослідження впливу розподілу газоподібного палива через канали завихрювачів на характеристики камери.....	108
4.3 Дослідження енергетичних та екологічних характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД, що працює на рідкому паливі .....	114
4.4 Вибір раціональних режимів підведення рідкого палива в канали повітряних радіально-осьових завихрювачів .....	119
4.5 Теоретичні дослідження процесів в низькоемісійній камері згоряння, що працює одночасно на природному газі та дистильованому рідкому паливі ....	127
Висновки по четвертому розділу.....	137
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОПАЛИВНИХ НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ З ПЛАЗМОХІМІЧНИМ ЕЛЕМЕНТОМ .....	139
5.1 Експериментальні дослідження енергетичних характеристик плазмохімічних елементів .....	139
5.2 Теоретичні дослідження впливу низькотемпературної повітряної плазми на процеси в двопаливній камері згоряння ГТД.....	148
Висновки по п'ятому розділу .....	159
ВИСНОВКИ.....	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	165
ДОДАТКИ А Документи про впровадження роботи.....	180

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

### Позначення

$A_p$  – площа поверхні частинки;  $\text{м}^2$ ;

$E$  – енергія активації, Дж/моль;

$C_p$  – питома теплоємність газу при постійному тиску, Дж/(кг·К);

$F$  – площина перерізу,  $\text{м}^2$ ;

$\vec{F}$  – сила, Н;

$f$  – поправочний емпіричний коефіцієнт;

$G, g$  – масова витрата, кг/с; відносна витрата;

$H_U$  – нижча теплотворна здатність, МДж/кг;

$h$  – питома ентальпія, кДж/кг;

$k$  – кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ , константа швидкості реакції;

$L_0$  – стехіометрична кількість повітря;

$M$  – маса, кг;

$N_e$  – потужність, кВт;

$n$  – частота обертання,  $\text{с}^{-1}$ ; кількість параметрів; кількість атомів вуглецю в молекулі вуглеводневого палива;

$Re$  – число Рейнольдса;

$Pr$  – число Прандтля;

$Q$  – теплова потужність, кДж/кг;

$p$  – тиск, Па;

$R$  – газова стала, кДж/(кг·К); швидкість утворення /розпаду хімічного компонента, моль/( $\text{см}^3 \cdot \text{с}$ );

$T$  – температура, К;

$T_\infty$  – локальна температура газової фази, К;

$\Delta T$  – температурний перепад, К;

$\alpha$  – коефіцієнти надлишку повітря та витрати компресору;

$\beta$  – коефіцієнти витрати турбіни та камери згоряння ГТД;

$\Delta$  – нерівномірність температурного поля;

$\varepsilon$  – порівняльна похибка;  
 $\eta$  – коефіцієнт корисної дії;  
 $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\varphi = \frac{G_{нов}/G_{пал}}{L_0}$  – еквівалентне співвідношення;

### **Індекси**

$i$  –  $i$ -й компонент;  
 $in$  – параметри на вході;  
 $j$  –  $j$ -компонент;  
 $m$  – масовий;  
 $max$  – максимальне значення;  
 $min$  – мінімальне значення;  
 $out$  – параметри на виході;  
 $q$  – тепловий;  
 $r$  – реакція;  
 $t$  – турбулентний;  
 $пал$  – паливо;  
 $нов$  – повітря;

### **Скорочення**

ГТД – газотурбінний двигун;  
ГТУ – газотурбінна установка;  
КЗ – камера згоряння;  
ЗЗТ – зона зворотних течій;  
КВТ – компресор високого тиску;  
EDC – eddy dissipation concept (хімічна модель дисипації вихорів);  
DNS – пряме числове моделювання;  
DLE – Dry Low Emissions (камера низькоемісійна з сухим способом зменшення емісії).

## ВСТУП

Застосування двопаливних газотурбінних двигунів (ГТД) – один із перспективних напрямків підвищення ефективності й надійності енергетичних систем. Особливо це є актуальним в теперішній час для створення на базі ГТД автономних мобільних енергетичних засобів для комплексного та швидкого забезпечення електроенергією, теплотою та холодом об'єктів берегової зони півдня України, базування ВМС України та морської охорони Держприкордонслужби.

Жорсткість міжнародних норм на рівні емісії токсичних компонентів визначає **запит практики**, спрямований на необхідність комплексного рішення питань удосконалення ГТД, що передбачає створення принципово нових конструктивних схем двопаливних камер згоряння (КЗ) з плазмовим супроводом, які забезпечать підвищення ефективності використання вуглеводневих ресурсів і мінімізацію викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище. Плазмові технології дозволяють поліпшити не тільки показники енергоефективності теплових двигунів, але й екологічні характеристики енергетичних установок різного цільового призначення.

Розглядом різних аспектів розробки двопаливних камер згоряння ГТД займаються різні наукові, проєктні та виробничі організації: GE Gas Power, Solar, (США), Rolls-Royce (Великобританія), Ansaldo Energia (Італія), SIEMENS Energy, MAN Energy Solutions (Германія), Kawasaki Gas Turbine, Niigata Power Systems Company (Японія), НВО “Сатурн” (Росія), НВКГ “Зоря”-”Машпроєкт” (Україна) та ін.

Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в області низькоемісійних камер згоряння, а також процесів горіння різних за фазовим станом палив (серед них роботи В.О. Христича, Ю.Я. Бурика, П.М. Каніло, В.Є. Костюка, В.Р. Кузнєцова, О.В. Сударєва, О.М. Постнікова, А. Лефєвра, Г.Ф. Романовського, S. B.Pope, L.V. Davis, P.E. Rokke, O. Lindman, E.E. Khalil, R.V. Clements та інших), методологічні і технічні аспекти вирішення задачі створення

двопаливних низькоемісійних камер згоряння до теперішнього часу розроблені недостатньо, а можливості використання плазмових елементів для покращення процесів в таких паливостаюючих пристроях не розглядались.

Таким чином, **науково-прикладне завдання** створення вискоефективних двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД з плазмовим супроводом є **актуальним** і має значний практичний інтерес. Вирішення цього завдання забезпечить можливість створення мобільних, вискоефективних та конкурентоздатних вітчизняних газотурбінних двигунів наземного та морського призначення, які будуть відповідати вимогам до енергетичних модулів нового покоління та зможуть працювати на рідкому та газоподібному органічних паливах одночасно.

**Актуальність дисертаційного дослідження** визначається:

1. Необхідністю підвищення ефективності газотурбінних енергетичних систем, що працюють на паливах різного фазового стану, з одночасним зменшенням емісії забруднюючих речовин.

2. Недостатньою кількістю експериментальних і теоретичних досліджень щодо раціональних методів організації робочих процесів в двопаливних камерах згоряння.

3. Відсутністю даних з використання низькотемпературної плазми для інтенсифікації процесів у двопаливних камерах згоряння ГТД.

4. Необхідністю вдосконалення моделі плазмової активації горіння різних за фазовим станом вуглеводневих палив.

В основу роботи покладено **робочу гіпотезу** про те, що розширення діапазону ефективного горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння ГТД може бути досягнуто за рахунок використання плазмохімічного впливу на процеси підготовки паливно-повітряних сумішей та вдосконалення схемних і конструктивних рішень фронтів пристроїв жарових труб, які містить слабкострумовий плазмохімічний елемент.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні результати дисертаційної роботи отримано в рамках Пріоритетних напрямків

розвитку науки й техніки в Україні: напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: № ДР 119U002105 «Теоретичні основи створення двопаливних газотурбінних камер згоряння з плазмовим супроводом», 2019-2021 рр. та № ДР 0120U105003 «Розробка передової технології SOFC-GT для суднових енергосистем», 2020 р., в яких автор приймав участь в якості виконавця.

**Метою дисертаційної роботи** є підвищення ефективності двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД шляхом використання низькотемпературної повітряної плазми для активації паливно-повітряних сумішей.

**Задачі наукового дослідження:**

1. Аналіз сучасних методів організації процесів в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння і можливого використання плазмохімічних пристроїв.

2. Обґрунтування та модифікація математичної моделі турбулентних хімічно реагуючих потоків в двопаливній низькоемісійній камері згоряння, що працює на рідкому та газоподібному паливах.

3. Розробка кінетичних механізмів утворення токсичних компонентів в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння.

4. Верифікація запропонованих математичних моделей за результатами випробувань низькоемісійних паливоспалювальних пристроїв.

5. Визначення характеристик двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД, що працюють на газоподібному і рідкому паливах.

6. Визначення експериментальним шляхом енергетичних характеристик слабкострумових генераторів повітряної плазми.

7. Виявлення особливостей впливу плазмохімічного елемента та способів підведення рідкого палива на емісійні характеристики двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

8. Визначення основних напрямків подальших досліджень та розробка практичних рекомендацій щодо удосконалення вітчизняних двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

**Об'єктом дослідження** є процеси турбулентного сумішоутворення та горіння різних за фізичним складом палив в двопаливній газотурбінній камері згоряння з плазмохімічним елементом.

**Предметом дослідження** є фізико-хімічні закономірності процесів турбулентного сумішоутворення та горіння різних за фізичним складом палив в двопаливній камері згоряння ГТД з плазмовим супроводом.

**Методи дослідження.** Головними методами дисертаційного дослідження є системний аналіз, математичне та фізичне моделювання процесів у двопаливних камерах згоряння ГТД, експериментальні дослідження енергетичних параметрів генераторів повітряної плазми, а також узагальнення результатів та синтез нових схемних та конструктивних рішень. Для теоретичного аналізу процесів у двопаливних низькоемісійних камерах згоряння з урахуванням попереднього перемішування палива з повітрям та плазмохімічного впливу на процеси горіння використано підхід, заснований на числовому розв'язанні систем диференціальних рівнянь, що описують основні закони збереження енергії та переносу хімічних компонентів у турбулентній хімічно реагуючій системі, за допомогою програмного продукту ANSYS Fluent.

**Новизна результатів**, одержаних в дисертації, полягає в наступному.

1. Вперше обґрунтовано інтенсифікуючий вплив низькотемпературної повітряної плазми на робочий процес двопаливної камери згоряння ГТД з попереднім сумішоутворенням на основі розробленої математичної моделі фізико-хімічних процесів двофазного турбулентного горіння у низькоемісійних паливоспалюючих пристроях, яка відрізняється від відомих запропонованим кінетичним механізмом окиснення вуглеводнів з урахуванням впливу плазмохімічних продуктів на процеси активації паливно-повітряних сумішей.

2. Вперше доведено можливість підвищення ефективності процесів одночасного горіння газоподібного і рідкого палива в камері згоряння ГТД з попереднім утворенням паливно-повітряної суміші шляхом плазмохімічного

впливу струмин повітряної низькотемпературної плазми на процеси прогріву крапель рідкого палива, сумішоутворення й окиснення пального.

3. Вперше експериментально отримано вольт-амперні характеристики плазмового повітряного генератора низькотемпературної плазми, призначеного для роботи в складі двопаливних камер згоряння, та визначено, що зона його стійкої роботи лежить в діапазоні струмів від 0,1 до 0,9 А при витратах плазмоутворюючого повітря до 1,6 г/с, а мінімальне значення сили струму зростає до 0,3 А при додатковій подачі розпилюючого повітря.

4. Вдосконалено метод прогнозування процесів вигорання різних за фізичним станом вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, заснований на числовому моделюванні їх характеристик на основі концепції дисипації вихорів (Eddy-Dissipation-Concept), який відрізняється від відомих тим, що враховує особливості окиснення палив різного стану за допомогою детальних хімічних механізмів в умовах взаємодії зони реагування з турбулентними пульсаціями потоку.

5. Отримав подальший розвиток підхід до моделювання впливу продуктів плазмохімічного елемента на процеси поширення полум'я у паливоспалюючих пристроях, заснований на залежності енергії активації реакцій окиснення різних за фізичним станом палив від кількості добавок плазмохімічних продуктів, яка враховується у рівняннях переносу хімічних компонентів.

**Достовірність результатів досліджень** забезпечується застосуванням сучасних розрахункових методів і засобів, адекватністю математичних моделей реальним процесам горіння різних за фазовим станом палив, задовільним узгодженням результатів розрахунків з даними інших авторів, логікою отриманих результатів, які не суперечать практиці проектування сучасних газотурбінних установок.

**Наукове значення роботи** полягає в розширенні уявлень про фізико-хімічні механізми плазмової активації процесів горіння різних за фазовим станом палив в низькоемісійних камерах згоряння ГТД в частині впливу зменшення енергії активації результуючої реакції окиснення вуглеводнів на структуру



хімічно реагуючих двофазних потоків, як наукового підґрунтя для реалізації концепції модернізації та створення двопаливних українських ГТД нового покоління.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці практичних рекомендацій з використання двопаливних камер згоряння в енергетиці, на підставі яких розроблено конструктивну схему двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт, що працює на газоподібному і рідкому паливах і забезпечує світові показники токсичності вихлопних газів. Запропонована тривимірна математична модель робочого процесу в двопаливній низькоемісійній камері згоряння з урахуванням впливу повітряної низькотемпературної плазми здатна прогнозувати енергетичні та емісійні характеристики найсучасніших газотурбінних двигунів. На її основі може бути проведена оптимізація параметрів камер згоряння новітніх енергетичних систем.

**Результати дисертаційного дослідження впроваджено** при проектуванні конкурентоздатних вітчизняних газотурбінних установок з метою їх подальшого використання в якості мобільних енергетичних засобів комплексного та швидкого забезпечення електроенергією і теплотою об'єктів морської інфраструктури (ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», м. Миколаїв), при аналізі схемних рішень перспективних судових енергетичних установок та виконанні проектних розробок концептуальних суден з високоефективними та низькоемісійними енергетичними установками (“Zaliv Ship Design”, м. Миколаїв), в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”, освітні програми “Турбіни” і “Газотурбінні установки і компресорні станції” в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, висновки та рекомендації, які наведені у дисертації та виносяться на захист, отримано автором самостійно та опубліковано у 17 наукових працях (з них 3 без співавторів). У

роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем: розроблено математичну модель двопаливної камери згоряння ГТД та запропоновано різні способи підведення рідкого палива в канали завихрювачів [1]; досліджено вплив режимів впорскування рідкого палива в камеру згоряння ГТД потужністю 25 МВт на її характеристики [2]; запропоновано використання плазмохімічних елементів для підвищення ефективності робочого процесу [3]; досліджено характеристики камери згоряння при одночасній роботі на газоподібному і рідкому паливах [5]; запропоновано розпилювання рідкого палива за рахунок енергії повітря, яке надходить в канали завихрювачів [6, 7]; обґрунтовано використання плазмового супроводу для двопаливних паливоспаюючих пристроїв [9]; досліджено аеродинамічну структуру та механізми утворення оксидів азоту і монооксиду вуглецю [10-12]; досліджено робочий процес камери згоряння ГТД при роботі на дистилятному паливі [13, 15]; запропоновано напрямки використання двопаливних ГТД [16]; досліджено вплив плазмохімічних продуктів на процеси горіння в камері згоряння ГТД [17]. Внесок автора у праці, написані у співавторстві, зазначено біля кожної публікації.

**Відомості про апробацію результатів дисертації.** Основні положення і результати досліджень обговорювалися і отримали позитивні відгуки на таких заходах: X–XII Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2019–2021), V-VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2018, 2020), IX Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» (Миколаїв, 2019), VI Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування” (Миколаїв, 2020), XI Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування” (Херсон, 2020), III Міжнародній науково-практичній морській конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету MPP&O-2021 (Одеса 2021).

**Публікації.** Основні положення та результати досліджень відображено в 17

друкованих наукових працях, з них 5 основних публікацій, у тому числі 3 у наукових фахових виданнях України (з них 1 без співавторів) та 2 публікації в іноземних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science Core Collection (Q2); 12 матеріалів доповідей на міжнародних конференціях (з них 2 без співавторів).

**Структура роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 118 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 184 сторінки, у тому числі 85 рисунків і 11 таблиць.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ В ДВОПАЛИВНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ ГТД

### 1.1 Аналіз сучасних методів організації робочого процесу в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД

В галузі газотурбінобудування в теперішній час актуальним є комплексне розв'язання питань підвищення ефективності та екологічності, що передбачає створення принципово нових схем газотурбінних установок. Застосування двопаливних газотурбінних двигунів є одним із перспективних напрямків підвищення ефективності енергетичних систем. Сучасні тенденції у розвитку ГТД супроводжуються значним зростанням теплових і динамічних навантажень на елементи їх конструкцій, виникненням нових проблем при експлуатації. Однією з таких проблем є необхідність одночасного використання різних сортів палив (в тому числі рідких та газоподібних) без заміни пальникових пристроїв камер згоряння при переході з одного сорту палива на інший. Замовники енергетичних систем вимагають забезпечення низьких викидів токсичних компонентів при різних режимах експлуатації, що достатньо складно, бо механізми горіння різнорідних за фазами палив суттєво відрізняються.

Під час проектування та розробки двопаливних камер згоряння ГТД велика увага приділяється досягненню однорідності паливно-повітряної суміші та спалюванню цієї суміші без шкідливого впливу на елементи камери згоряння та ГТД в цілому. При проектуванні також важливим є питання екологічності камери згоряння. Рівень викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) та монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) в камері згоряння значним чином залежить від температури горіння паливно-повітряної суміші та її однорідності. Дифузійні камери згоряння характеризуються високими температурами в первинній зоні горіння ( $>2200 \text{ K}$ ), що призводить до утворення великих кількостей  $\text{NO}_x$  в первинній зоні камери, тому рівень емісії оксидів азоту в камерах згоряння дифузійного типу (які

зазвичай використовуються для спалювання рідких палив) значно більший, ніж в низькоемісійних камерах згоряння з попереднім сумішоутворенням (які зазвичай використовуються для спалювання газоподібних палив).

Аналіз сучасних методів організації робочого процесу в двопаливних камерах згоряння ГТД, які працюють на основі принципів попереднього сумішоутворення компонентів, дозволяє використовувати перспективні способи інтенсифікації горіння різних за фазовим станом палив для підвищення ефективності і стабільності їх роботи, а також для зменшення викидів шкідливих речовин.

Одним з найбільш перспективних методів підвищення стійкості робочого процесу низькоемісійної камери згоряння є інтенсифікація спалювання вуглеводнів за допомогою низькотемпературної плазми [1-4]. В випадку використання плазмохімічних елементів можна очікувати: підвищення стабільності процесу горіння в двопаливних камерах згоряння, зниження пульсацій тиску в об'ємі камери згоряння та зменшення ймовірності гасіння полум'я [5].

Можна виділити 5 перспективних технологій організації робочого процесу в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД:

- попереднє випаровування рідкого палива;
- стадійне (зонне) горіння;
- багатопальникове горіння;
- каталітичне горіння;
- горіння з плазмовим супроводом.

Всі ці методи інтенсифікації процесів сумішоутворення і горіння пов'язані також зі зменшенням викидів токсичних компонентів, зокрема оксидів азоту. Відмітимо, що зменшення утворення NO<sub>x</sub> засновано найчастіше на зниженні температури протікання реакції горіння та покращенні якості процесів сумішоутворення. Попереднє випаровування рідкого палива – один із перспективних способів зниження утворення NO<sub>x</sub>. В низькоемісійних камерах згоряння, що працюють за технологією Dry Low Emissions (DLE) чи Dry Low NO<sub>x</sub>

(DLN) не використовують впорскування пари чи води в зону горіння, тому вони мають назву «сухі». Зниження температури в первинній зоні камери без впорскування пари досягається за допомогою горіння сумішей, що попередньо змішані [6-7]. Зниження  $\text{NO}_x$  досягається також за рахунок збільшення коефіцієнту надлишку повітря, бо швидкість їх утворення визначається температурою, яка залежить від локального коефіцієнту надлишку повітря в первинній зоні.

Термічні оксиди азоту є найбільш поширеним джерелом  $\text{NO}_x$  та утворюються при реагуванні азоту з киснем, що знаходиться в повітрі відповідно до механізму Зельдовича [7]. Реакція протікає при температурі вище ніж 1700 K та має експоненціальну залежність (рис. 1.1). На швидкість формування  $\text{NO}_x$  при високих температурах може впливати наявність різних сполук азоту в паливі.

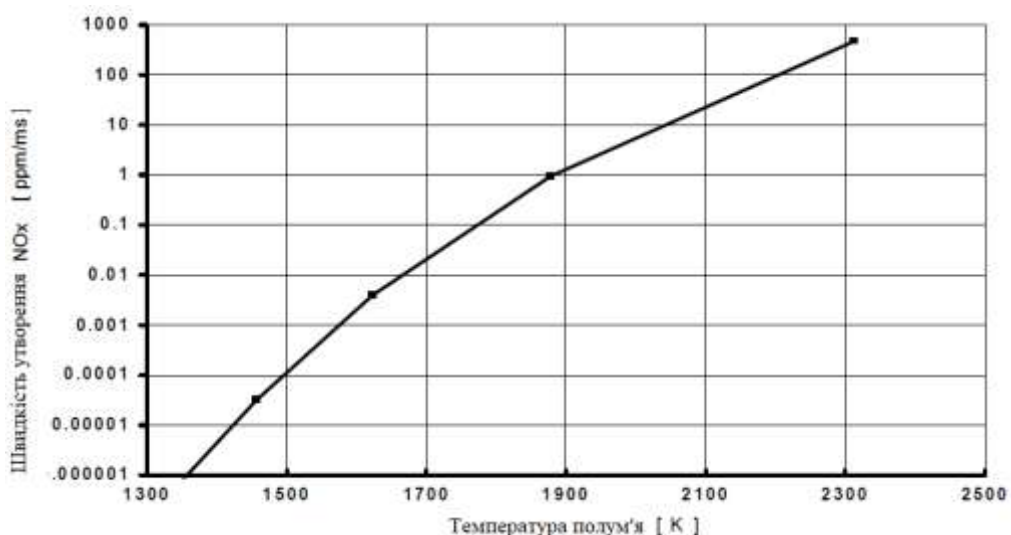


Рисунок 1.1 – Залежність швидкості утворення  $\text{NO}_x$  від температури [7]

Задоволення вимог до викидів токсичних компонентів є лише одним з аспектів розробки двопаливної низькоемісійної камери згорання ГТД. Камера також повинна відповідати наступним критеріям: термін служби елементів, гнучка робота системи паливоподачі, надійний запуск, надійний перехід з одного палива на інше, ефективна робота на режимах часткових навантажень.

Для реалізації запропонованого технічного рішення необхідно вирішити цілий ряд питань, перед яких необхідно відмітити:

- забезпечення дрібнодисперсного розпилювання рідкого палива в повітряному потоці;
- забезпечення однорідного попереднього перемішування рідкого палива з повітрям;
- оптимізація швидкостей впорскування рідкого палива в повітряний потік;
- оптимізація розподілу крапель розпиленого палива по висоті повітряного каналу;
- створення ефективної системи охолодження жарових труб камери згоряння для тривалої роботи на рідкому паливі;
- розміщення великої кількості каналів для підведення різних середовищ в одному паливорозпилюючому пристрої;
- запобігання нагароутворення і коксоутворення на поверхнях елементів жарових труб, паливорозпилюючих пристроїв і паливних каналів;
- створення систем автоматичного управління і регулювання, а також відпрацювання алгоритмів роботи камери згоряння та ГТД;
- забезпечення переходу з одного виду палива на інший без зупинки двигуна;
- підтримання паливної системи в працездатному стані при тривалій роботі на одному з видів палива.

Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в області низькоемісійних камер згоряння [6-10], методологічні і технічні аспекти вирішення проблеми створення двопаливних камер згоряння до теперішнього часу розроблені недостатньо. Треба зауважити, що велика кількість досліджень двопаливних камер згоряння була зроблена виключно експериментальними методами, і лише мала кількість дослідників використовувала теоретичні методи обчислювальної гідродинаміки (CFD), які можуть бути дуже доцільними і мати змогу значно підвищити ефективність робочого процесу двопаливних камер.

## 1.2 Огляд основних конструктивних типів двопаливних камер згоряння ГТД світових та вітчизняних виробників

Одним із перших виробників, що застосував DLE-технологію для двопаливних камер згоряння була компанія General Electric. Система згоряння General Electric DLN-1 працює в чотирьох різних режимах (рис. 1.2) з попередньо змішаним з повітрям природним газом або рідким паливом [8].

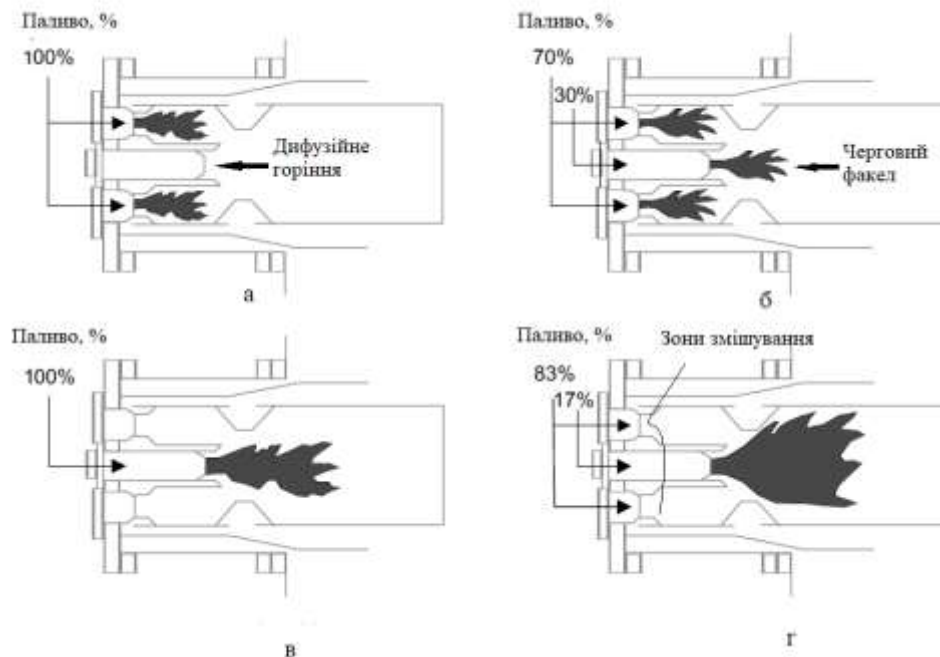


Рисунок 1.2 – Організація процесу горіння в двопаливних камерах згоряння General Electric [8]:

а – первинний режим дифузійного горіння від запалювання до 20 % навантаження; б – режим “Lean-Lean”, збіднена суміш в обох зонах, режим навантаження 20-40 %; в – горіння у вторинній зоні, режим переходу до попереднього змішування; г – режим горіння з попереднім змішуванням

Первинний режим (рис. 1.2, а) – паливо подається тільки до первинних форсунок, полум'я стабілізується в первинній зоні. Цей режим роботи використовується для запалювання та експлуатації двигуна на низьких та середніх навантаженнях. Режим “Lean-Lean” (рис. 1.2, б) – паливо подається в первинні (70 %) та вторинні (30 %) форсунки. Полум'я знаходиться як у первинній, так і вторинній зоні. Цей режим роботи використовується для проміжних навантажень.



Вторинний режим (рис. 1.2, в) – паливо подається тільки до вторинних форсунок, полум'я знаходиться тільки у вторинній зоні. Цей режим є перехідним між “Lean-Lean” і режимом горіння з попереднім змішуванням. Режим горіння з попереднім змішуванням (рис. 1.2, г) – паливо подається як у первинні (83 %), так і вторинні (17 %) форсунки, полум'я знаходиться лише у вторинній зоні. Емісія шкідливих речовин найменша на режимі горіння з попереднім змішуванням.

За необхідності, як первинні, так і вторинні паливні форсунки можуть бути двопаливними (як, наприклад, на ряді двигунів внутрішнього згорання), що дозволяє автоматичний перехід від газоподібного (в тому числі синтез-газу) до рідкого палива у всьому діапазоні навантажень. При горінні природного газу або дистилляту система може працювати на режимі повного навантаження в “Lean-Lean” режимі. Це дозволяє проводити впорскування пари або води для зниження викидів  $\text{NO}_x$  на рідкому паливі та для збільшення потужності - на газоподібному. Емісійні характеристики для двигунів MS7001EA та MS6001B становлять 9 ppm  $\text{NO}_x$  та 25 ppm CO.

Вперше ця система була введена до експлуатації в 1990 р. для двигуна MS9001E на електростанції в Дубліні, рівень  $\text{NO}_x$  складав 32 ppm (при 15 %  $\text{O}_2$ ), що лягло в основу подальших розробок в двигунах MS6001B та MS7001E. Досвід експлуатації 44 двигунів MS6001B з паливною системою DLN-1 показав, що загалом напрацьовано приблизно 1,4 мільйонів годин з показниками  $\text{NO}_x$  на рівні 50 ppm. Ця система отримала подальший розвиток, виходячи із того, що використання повітря в камері згорання на інші цілі окрім перемішування палива, наприклад, для охолодження, повинно бути строго лімітованим. Для цього розроблено камеру згорання DNL-2 (рис. 1.3) зі зменшеною кількістю отворів та вузлів в центральній частині, для яких потрібне охолоджуюче повітря [8].

DLN-2 – це одноступінчаста камера згорання, що може працювати як на газоподібному, так і на рідкому паливі. На газоподібному паливі при навантаженні менш ніж 50 % камера згорання працює за дифузійним принципом. При навантаженні більш ніж 50 % – в режимі горіння з попереднім змішуванням. Робота на рідкому паливі в цій камері згорання здійснюється в дифузійному

режимі в усьому діапазоні навантажень, а для зниження викидів  $\text{NO}_x$  використовується впорскування розчинника.

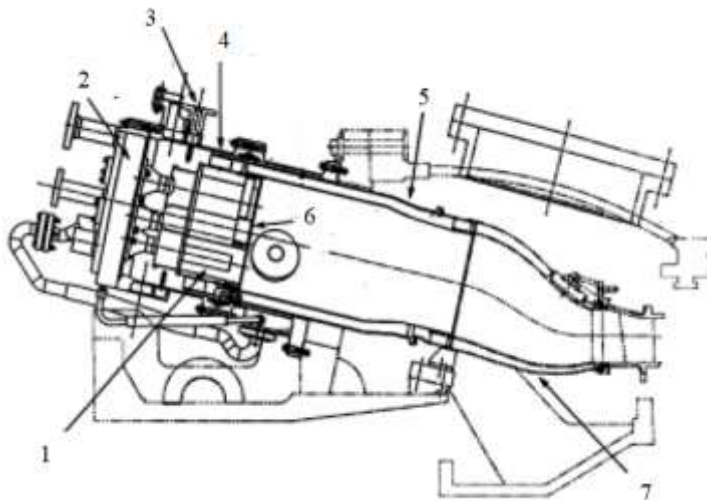


Рисунок 1.3 – Камера згоряння DLN-2:

- 1 – форкамера; 2 – паливна форсунка; 3 – впорскування рідкого палива;
- 4 – зовнішня стінка; 5 – проточна втулка; 6 – набір трубок в форкамері;
- 7 – тракт охолоджуючого повітря

В дифузійні канали чотирьох паливних форсунок подається паливо із загального (первинного) колектора, який вбудований в торцеву кришку. Через внутрішній (вторинний) колектор паливо подається в канали попередньо змішаної паливно-повітряної суміші. Канали подачі суміші мають живлення із третьої зони паливної системи; дифузійний канал цієї форсунки завжди продувається розрідженим повітрям з компресора (рис 1.4) [8].

В торцеву кришку камери згоряння встановлені паливні форсунки і з'єднання для форсунок подачі рідкого палива 1, 2, 3. На початковому режимі горіння паливо подається тільки до перших паливних форсунок, відбувається дифузійне горіння. В режимі збідненого горіння паливо подається до перших дифузійних паливних форсунок та в одне сопло форсунки подачі палива 3 з попереднім змішуванням. Відсоток первинного потоку палива регулюється в усьому діапазоні роботи в залежності від температури згоряння. При необхідності режим збідненого горіння може здійснюватися у всьому діапазоні навантажень

ГТД. Вибір цього режиму блокує процес попереднього змішування і дозволяє двигуну працювати для базового навантаження в збідненому режимі.

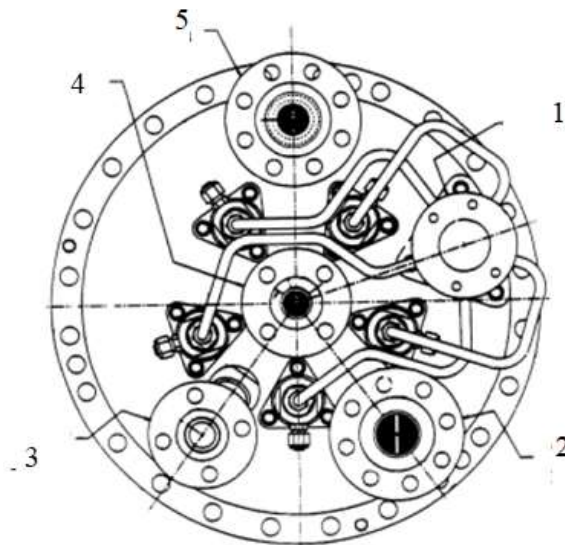


Рисунок 1.4 – Розташування паливних форсунок в камері згоряння:

1 – підведення рідкого палива; 2 – форсунка подачі палива 1; 3 – розпилене повітря; 4 – форсунка подачі палива 3; 5 – форсунка подачі палива 2

На протязі перехідного між збідненим режимом і режимом попереднього змішування первинні і вторинні регулюючі клапани газу модулюють їх кінцевий стан для наступного режиму. При організації режиму попереднього змішування паливо спрямовується в форсунки подачі палива 1, 2 та 3. Камера згоряння може працювати на цьому режимі при номінальному навантаженні. На режимі попереднього змішування паливо спрямовується в другий, третій та четвертий паливні канали. Мінімальне навантаження для режиму попереднього змішування дорівнює приблизно 50–65 % номінального навантаження. Перехід від режиму попереднього змішування до пілотованого режиму попереднього змішування може відбуватися кожного разу, коли температура згоряння вище 1477 К.

Одним з прикладів організації робочого процесу в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД є EV-пальник концерну АВВ (рис. 1.5), його конструкція відрізняється наявністю двох половин конусів, зміщених один відносно одного в напрямку, що перпендикулярний його центральній осі [9, 10].

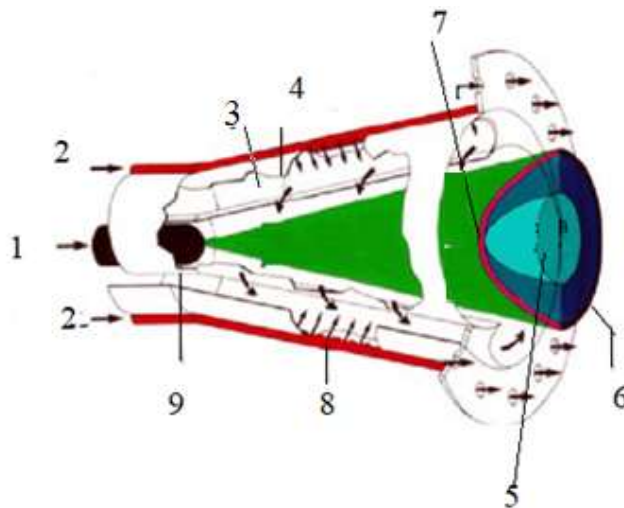


Рисунок 1.5 – Пальник фірми АВВ:

1 – рідке паливо; 2 – газоподібне паливо; 3 – канал підведення палива;  
4 – зовнішня стінка; 5 – зона рециркуляції; 6 – фронт полум'я; 7 – фронт  
займання; 8 – отвори підведення газу; 9 – форсунка рідкого палива

Показники емісії наступні: для рідкого палива < 40 ppm NO<sub>x</sub>, для газоподібного < 25 ppm NO<sub>x</sub>, < 30 ppm CO [9].

Наступним прикладом пристроїв, що працюють за технологією спалювання попередньо підготовлених бідних сумішей та попереднього випаровування рідкого палива (the lean premixed prevaporized LPP) є двопаливний пальник фірми Rolls Royce (рис. 1.6) [11].

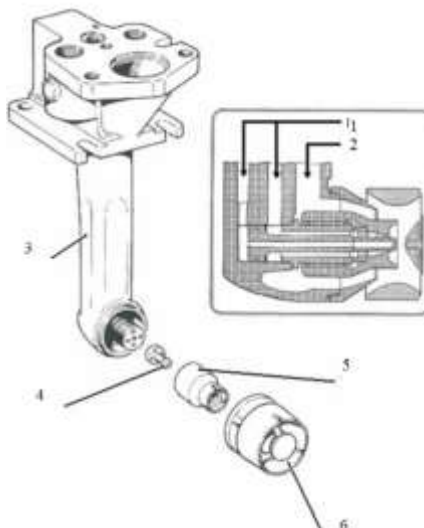


Рисунок 1.6 – Двопаливний пальник фірми Rolls Royce:

1 – рідке паливо; 2 – газоподібне паливо; 3 – пристрій підведення палива;  
4 – форсунка; 5 – сопло; 6 – дефлектор

Наступним прикладом реалізованих новітніх технологій двопаливних камер згоряння є ГТД виробництва компанії Siemens SGT-400. На рис. 1.7 показано двопаливний паликовий пристрій гібридного типу фірми Siemens, який має три канали [12]:

- перший: подачі природного газу (синтез-газу) для дифузійного горіння в район осьового завихрювача (в центрі палика) в діапазоні потужності (0-0.85)  $N_e$ ;

- другий: подачі газу перед лопатками діагонального завихрювача для горіння в режимі попереднього змішування (0,85-1,0)  $N_e$ ;

- третій: подачі газу з ціллю створення чергового полум'я при роботі в режимі попереднього змішування.

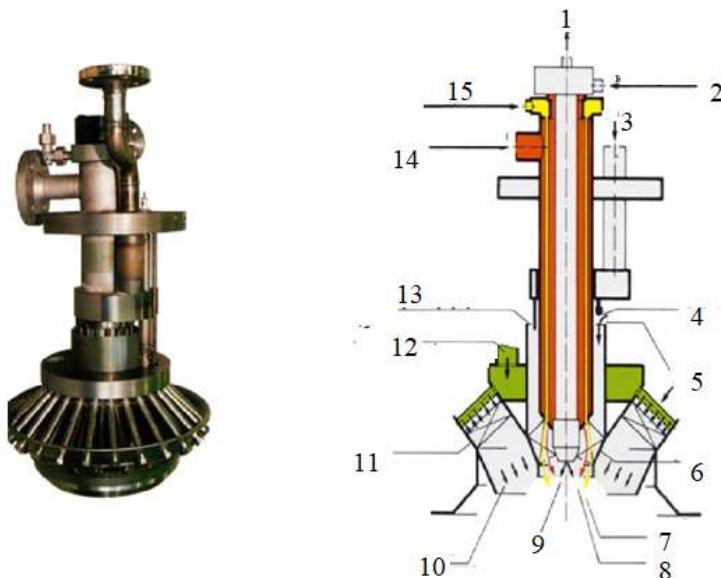


Рисунок 1.7 – Низькоемісійний паликовий пристрій компанії Siemens:

1 – дренаж рідкого палива; 2 – канал рідкого палива; 3 – пар чи вода; 4 – водяні форсунки; 5 – повітря на горіння; 6 – осьовий завихрювач; 7 – газоподібне паливо для пілотного палика; 8 – газоподібне паливо для дифузійного палика; 9 – рідке паливо; 10 – паливно-повітряна суміш для попереднього змішування; 11 – діагональний завихрювач; 12 – канал газоподібного палива для сопел палика попереднього змішування; 13 – парові форсунки; 14 – канал газоподібного палива для сопел основної форсунки; 15 – канал газоподібного палива для сопел пілотної форсунки

Крім того, при використанні рідкого палива передбачено також спеціальний канал уздовж осі центрального осьового завихрювача. За рахунок впорскування

води або водяної пари всередину дифузійного полум'я емісія  $\text{NO}_x$  знижується до необхідного рівня.

Діапазон роботи камери в режимі попереднього змішування може бути розширено шляхом зменшення частки повітря, призначеного для горіння, пропорційно зниженню витрати палива. Для цієї мети на вторинні отвори жарової труби встановлюють перекриваюче кільце, яке змінює співвідношення витрат повітря, що йде на горіння і змішування. Таким чином пальник може перейти від режиму дифузійного горіння до режиму горіння з попереднім перемішуванням [13].

Подальше розширення діапазону роботи камери з попередніми перемішуванням досягається шляхом регулювання положення вхідних напрямних лопаток. Шляхом закриття вхідного напрямного апарату (ВНА) витрата через компресор може бути знижена до 85 % від максимального значення. В результаті режим двигуна знизиться до 70 % базового навантаження, при цьому витрата палива становить близько 83 %. При таких параметрах температура на виході з турбіни не зміниться, що особливо важливо для отримання якісних характеристик на часткових режимах роботи установки комбінованого циклу. За рахунок використання гібридних пальників на природному газі в діапазоні 40-100 % базового навантаження камера згоряння ГТД працює з дуже низькими викидами  $\text{NO}_x$  (18-50  $\text{мг/м}^3$ ) при емісії  $\text{CO}$  практично рівній нулю [13].

ГТД SGT-400 обладнаний системою спалювання палива DLE, що забезпечує низькі викиди оксидів азоту  $\text{NO}_x$  при роботі на двох видах палива. Двовальна конструкція ГТД SGT-400 відрізняється високою гнучкістю регулювання потужності та навантаження як для генерації електроенергії, так і для приводу механічних пристроїв. Номінальний ККД в простому циклі досягає 35,4 %, а механічна потужність 13,40–14,92 МВт. Низькоемісійні пальникові пристрої, що використовуються в компанії Siemens, представлені на рис. 1.8 [14].

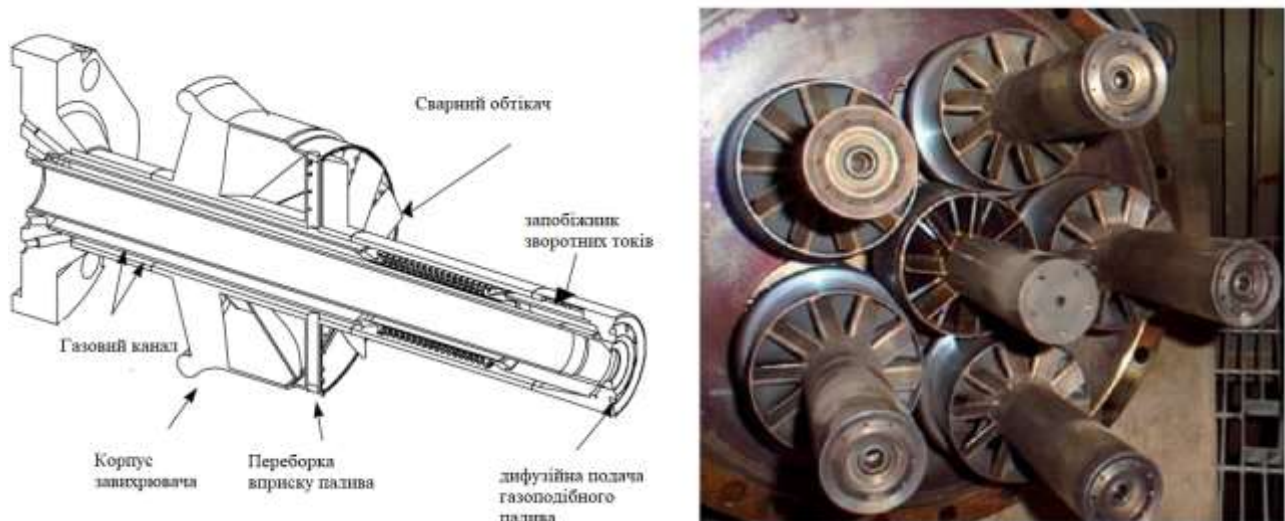


Рисунок 1.8 – Низькоемісійний пальниковий пристрій компанії Siemens

Відмітимо наступні можливості та особливості паливної системи та її елементів таких двигунів:

- регулювання режимів горіння і рівня токсичних викидів;
- оснащення системою сухого пригнічення викидів;
- оснащення системою гасіння вібрацій;
- внутрішня поверхня камери згорання захищена термобар'єрним покриттям;
- можливість перемикання з одного виду палива на інший під навантаженням [14].

Камера згорання двигуна «Tornado» (рис 1.9) використовує основний пальник попереднього змішування для зменшення температури полум'я первинної зони, отже, і для пригнічування викидів  $\text{NO}_x$ . Для запалювання і забезпечення стабільності полум'я, особливо під час перехідних режимів, використовується центральна форсунка. У випадку використання газоподібного та рідкого палива камера згорання оснащується двоканальними форсунками рідкого палива та комплексною системою очищення. Два потоки рідкого палива регулюються клапанами, причому перший забезпечує запалювання та горіння основного палива, а другий – режим бідного горіння. Показники емісії: для рідкого палива –



75 ppm NO<sub>x</sub> при режимі навантаження 65-100 %, для газоподібного: < 25 ppm NO<sub>x</sub> при режимі навантаження 50-100 % [9, 15].

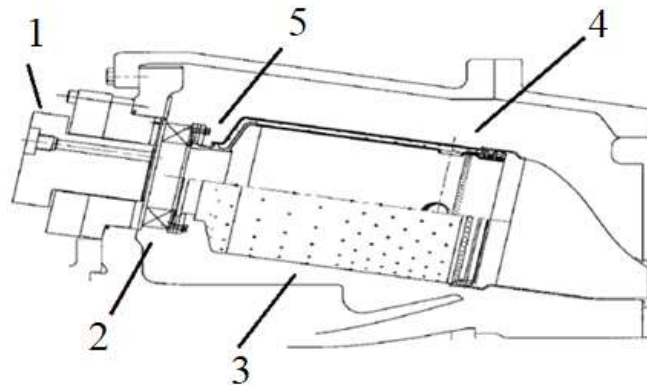


Рисунок 1.9 – Камера згоряння двигуна «Тайфун»:

1 – пілотний пальник; 2 – головний завихрювач; 3 – жарова труба;  
4 – пояс охолодження; 5 – форкамера

Для камери згоряння SGT-750 (рис. 1.10) компанією Siemens проведено ряд випробувань та CFD-розрахунків відносно гіпотези залежності викидів NO<sub>x</sub> від організації розпилювання рідкого палива в камері згоряння. Створено три концепти конструкцій паливопідвідних патрубків в каналах завихрювачів камери згоряння [16].

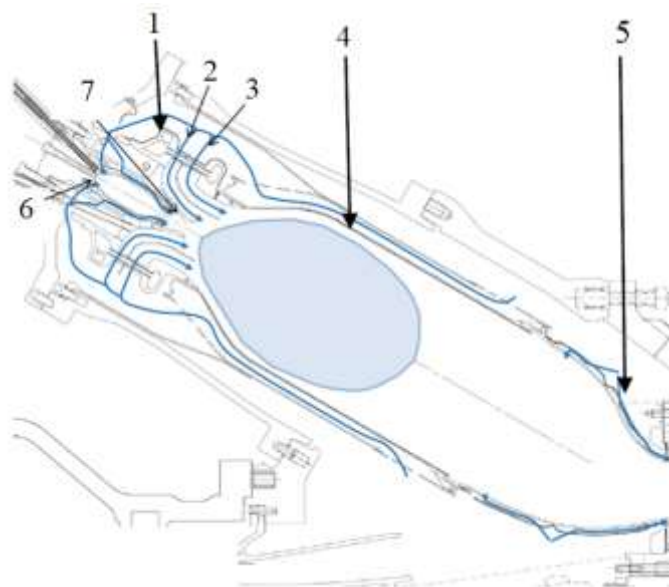


Рисунок 1.10 – Камера згоряння SGT-750:

1 – пальник; 2 – перший канал головного завихрювача; 3 – другий канал головного завихрювача; 4 – жарова труба; 5 – перехідний канал;  
6 – центральна камера запалювання та багатого горіння палива;  
7 – пілотна форсунка



Концепт 1 – в другий канал головного завихрювача встановлено 6 висувних паливних трубок з двома форсунками у кожній трубці (рис. 1.11).

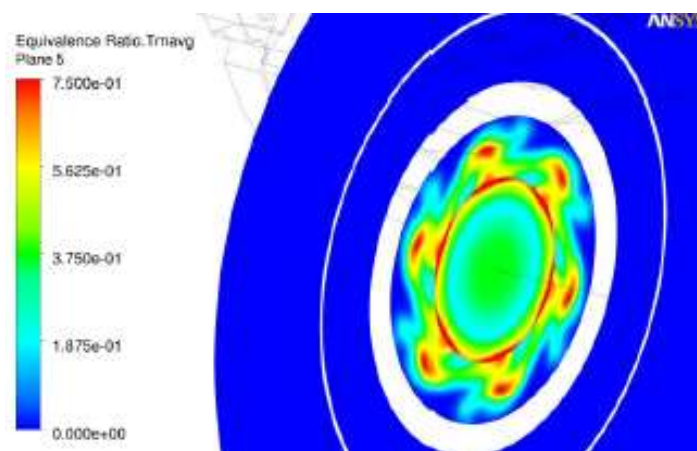


Рисунок 1.11 – Контури “equivalence ratio” (величина, зворотна до коефіцієнту надлишку повітря) для концепту 1

Концепт 2 – в другий канал головного завихрювача встановлено 12 висувних паливних трубок з однією форсункою у кожній трубці на початку каналу (рис. 1.12).

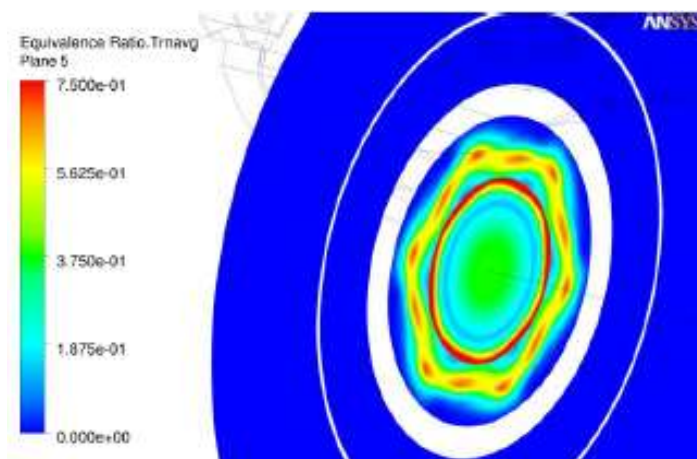


Рисунок 1.12 – Контури “equivalence ratio” для концепту 2

Концепт 3 – у другий канал головного завихрювача встановлено 12 паливних трубок з однією форсункою у кожній трубці на виході з каналу, (рис. 1.13) [16].

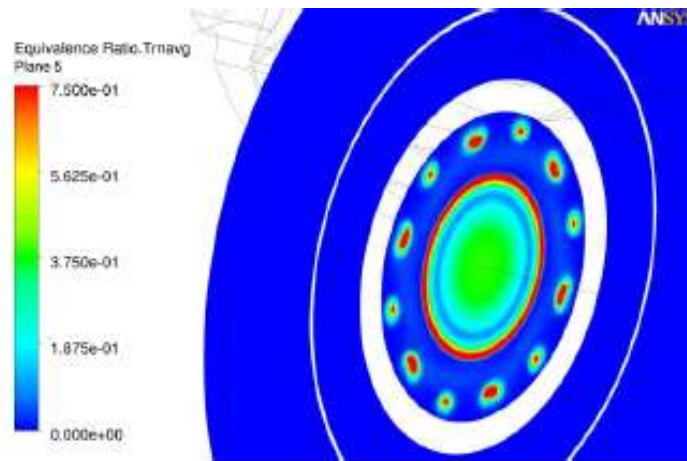


Рисунок 1.13 – Контури “equivalence ratio” для концепту 3

Концепт 2 має найефективніші показники витрати води та мінімальні викиди оксидів азоту  $\text{NO}_x$  [16]. Як вказують автори, ці конструкції можна покращити за рахунок оптимізації (зменшення) подачі води в зону горіння.

Трубно-кільцева протитокова камера згорання двигуна UGT110 потужністю 110 МВт виробництва НВКГ «Зоря»-«Машпроект» [13] розміщена над останніми ступенями компресора. Двадцять жарових труб розташовані горизонтально і складаються з кільцевої труби в її головній частині і основної труби (рис. 1.14), які утворюють відповідно дві зони горіння при роботі двигуна. Кожна кільцева труба містить фронтний пристрій з вісьмома осерядіальними завихрювачами з передкамерою. Її внутрішня стінка виконана у вигляді циліндра з системою конвективно-загороджувального охолодження. Зовнішні стінки кільцевої і основної труби виготовлені двошаровими і складаються з ряду сегментних частин, складених з набору спеціальних вставок, які закріплюються на зовнішньому корпусі. Це забезпечує компенсацію температурних розширень вставок і корпусу.

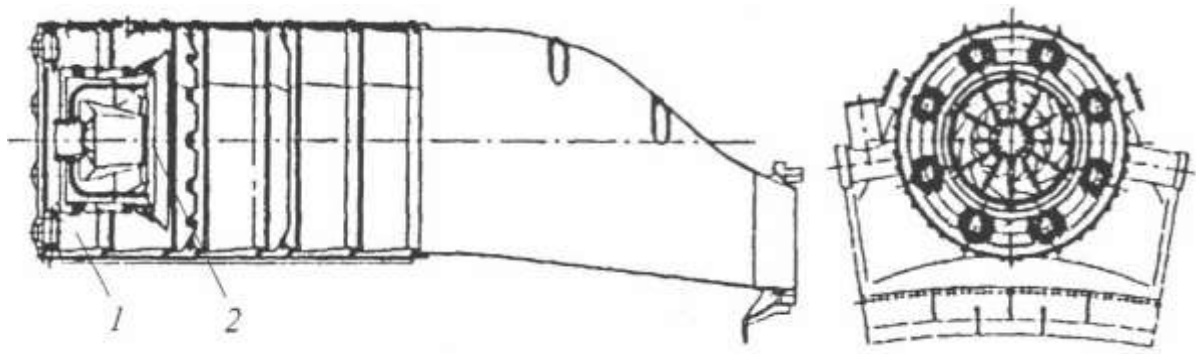


Рисунок 1.14 – Жарова труба камери згоряння двигуна UGT110:

1 – кільцева труба; 2 – основна труба

У фронтівому пристрої основної труби розташований двох'ярусний завихрювач. Його внутрішній ярус складається з лопатки осерядіального завихрювача з передкамерою, а зовнішній – з лопаткового осьового завихрювача (число лопаток в обох випадках 12). Підведення газоподібного та рідкого палива в кільцеву трубу здійснюється трьохканальними пілотними форсунками – в передкамеру кожного з восьми завихрювачів. Підведення газоподібного палива в основну трубу здійснюється за допомогою 12 трубок, а рідкого палива - в передкамеру центрального завихрювача - двоканальною форсункою (рис. 1.15–1.16). Відмітимо, що основним паливом є природний газ.

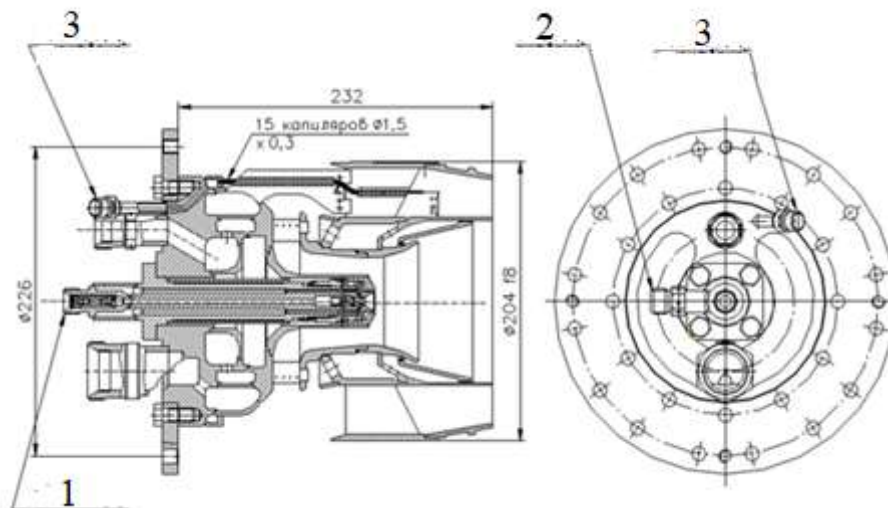


Рисунок 1.15 – Конструктивна схема низкоемісійного двопаливного пального пристрою:

1 – підвід дизельного палива в перший канал; 2 – підвід дизельного палива в другий канал; 3 – підвід дизельного палива в третій канал

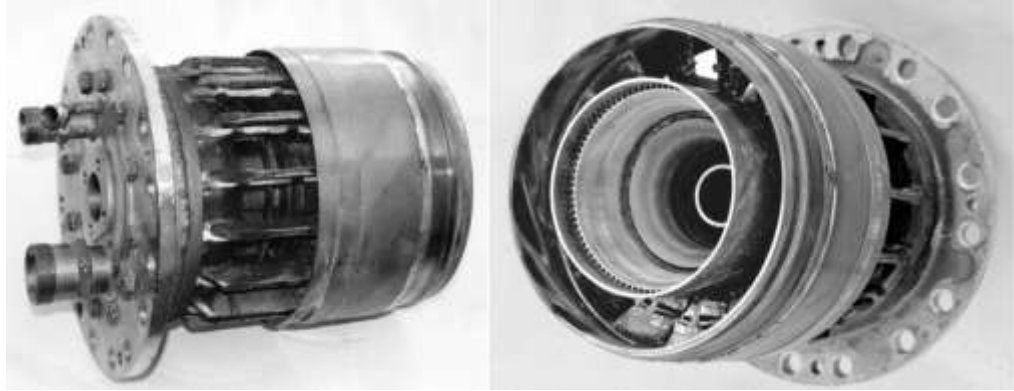


Рисунок 1.16 – Пальник двигуна ГТД 110

Запуск двигуна здійснюється подачею палива в пілотні форсунки кільцевої труби і його займання з допомогою запальвачів, розташованих на корпусі камери згорання. На режимі, що перевищує 30 % номінальної потужності, та аж до режиму 100 % потужності процес горіння організовується і в основній частині жарової труби підведенням основного палива. Для зниження викидів оксидів азоту найбільш сприятливий режим, коли в кільцевій зоні горіння відсутнє і вона служить тільки для попереднього утворення гомогенної суміші, яка вигоряє далі в основній частині жарової труби (рекомендований діапазон роботи 50–100 % потужності). Відзначається, що після доводочних робіт викиди  $\text{NO}_x$  на номінальному режимі не перевищують  $50 \text{ мг/м}^3$  [17].

Одним з перспективних варіантів забезпечення високої дисперсності розпилювання палива є застосування фронтового пристрою з двома реєстрами, що забезпечують в одному конструктивному вузлі розпилювання палива і стабілізацію фронту полум'я. Таке технічне рішення отримало назву безфорсунковий фронтовий пристрій (БФП) [18].

На ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект" розроблена конструкція БФП для суднового ГТД (рис. 1.17).

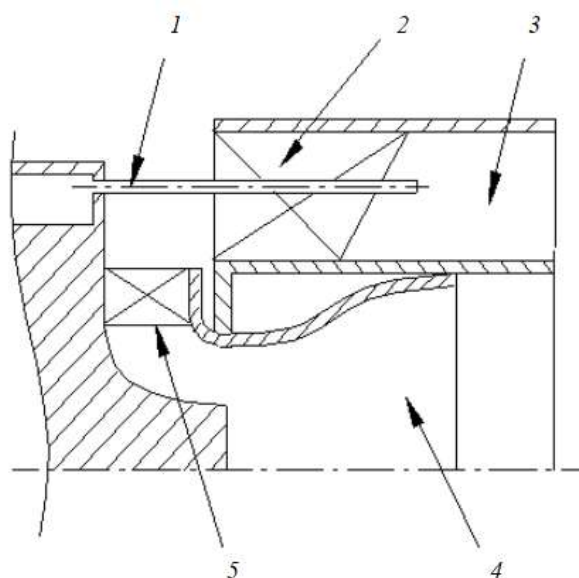


Рисунок 1.17 – Схема безфорсункового фронтного пристрою:

1 – паливоподаючі патрубки; 2 – периферійний реєстр; 3 – камера змішування;  
4 – карман стабілізаційний; 5 – центральний реєстр

БФП складається з центрального реєстра (завихрювача) 5 і периферійного реєстра (завихрювача) 2. Паливо, що підводиться по трубках 1, потрапляє в камеру змішування 3. У камері змішування паливо перемішується з повітрям і частково випаровується, при цьому паливно-повітряна суміш отримує тангенціальну закрутку.

При роботі камери згоряння з БФП межі її стійкого запуску значно розширюються. Запуск забезпечується при об'ємній витраті повітря в характерному перерізі відсіку в 3 рази меншому в порівнянні з фронтним пристроєм традиційного типу [17].

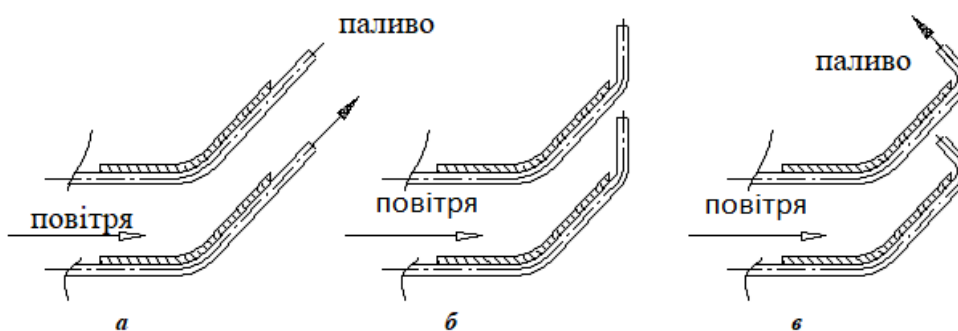


Рисунок 1.18 – Варіанти встановлення паливоподавальних патрубків

Досліджувалися три основні варіанти орієнтації в просторі вихідного перерізу паливоподавальних патрубків (рис. 1.18). У варіанті *a* паливо подається вздовж по потоку: вектор швидкості повітря збігається з вектором швидкості виходу палива з паливоподавальних патрубків. У варіантах *б* і *в* кут між векторами швидкості палива і повітря становить  $45^\circ$  і  $90^\circ$  відповідно.

При подачі дизельного палива в капілярні патрубки (рис. 1.18, а) при підігріві робочого тіла  $\Delta T \approx 480$  градусів середні відносні нерівномірності температури відпрацьованих газів на виході з камери згоряння склали в осьовому напрямку  $\theta_b = 0,90-1,15$  та в радіальному  $\theta_h = 0,8-1,1$  (рис. 1.19). На всіх режимах випробувань в діапазоні  $\Delta T = 360-700$  градусів концентрація оксидів азоту  $\text{NO}_x$  зменшилася більш ніж в 2,0-2,5 рази в порівнянні з традиційним варіантом подачі палива через форсунку і склала  $C_{\text{NO}_x} = 50-180 \text{ мг/нм}^3$  [17].

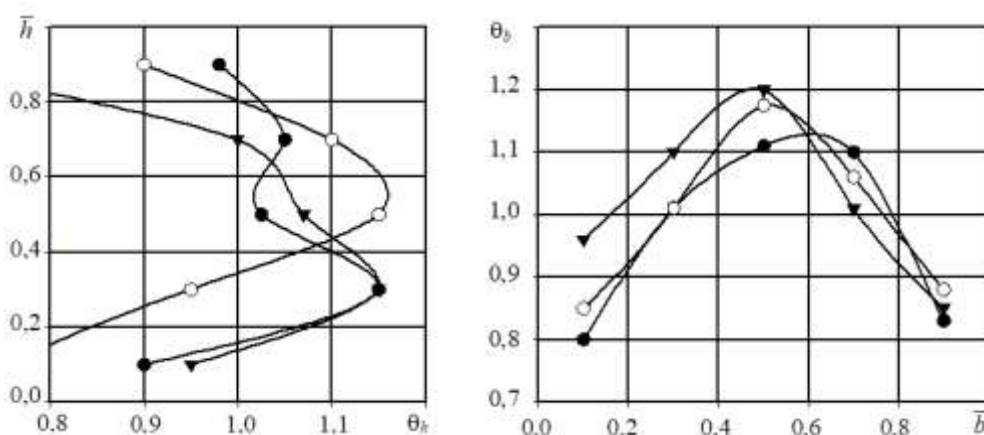


Рисунок 1.19 – Епюри осьової і радіальної нерівномірності температурного поля на виході з камери згоряння:

● – варіант рис. 1.18, а; ○ – варіант рис. 1. 18, б; ▲ – варіант рис. 1. 18, в

Для варіанту підвідних капілярних трубок з поворотом напрямку вихідної ділянки капілярів на  $45^\circ$  від напрямку потоку повітря в міжлопатковому каналі периферійного завихрювача в сторону спинки сусідньої лопатки (рис. 1.32, б) середні відносні нерівномірності температури при підігріві  $\Delta T \approx 460$  градусів склали  $\theta_b = 0,85-1,20$  та  $\theta_h = 0,65-1,15$  (рис. 1.19).

На всіх режимах випробувань в діапазоні  $\Delta T = 220-660$  градусів концентрація викидів  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$  зменшилася в порівнянні з варіантом *a* подачі палива в периферійний канал (завихрювач) і склала  $C_{\text{NO}_x} = 30-120$  мг/нм<sup>3</sup> та  $C_{\text{CO}} = 1560-15$  мг/нм<sup>3</sup>.

Для варіанту підвідних капілярних трубок з поворотом вихідної ділянки капілярів на  $90^\circ$  відносно напрямку потоку повітря в міжлопаткових каналах (рис. 1.18, в) при підігріві  $\Delta T \approx 450$  градусів середні відносні нерівномірності температури склали  $\theta_b = 0,85-1,05$  та  $\theta_h = 0,8-1,05$  (рис. 1.19).

На всіх режимах випробувань в діапазоні  $\Delta T = 250-640$  градусів концентрація викидів  $\text{NO}_x$  і  $\text{CO}$ , виміряна за допомогою зовнішнього забірника проб газу, становила  $C_{\text{NO}_x} = 30-130$  мг/нм<sup>3</sup> та  $C_{\text{CO}} = 3800-40$  мг/нм<sup>3</sup> [17].

### **1.3 Аналіз можливостей використання низькотемпературної плазми в двопаливних камерах згоряння**

Реалізація методу плазмохімічної інтенсифікації спалювання палив [18–23] в низькоемісійних камерах згоряння ГТД здійснюється системами, що містять у собі генератори низькотемпературної плазми (плазмотрони), джерела живлення, пристрої для підведення плазмоутворюючого газу, палива, засоби регулювання і контролю параметрів і режимів роботи. Головними елементами систем є плазмотрони, або розроблені на їх базі плазмохімічні реактори (ПХР), плазмово-паливні форсунки, плазмохімічні генератори водневмісного газу та плазмові запалювачі.

Використання плазмотрона в якості генератора активних часток, який інтенсифікує запалювання і спалювання палив в енергетичних установках, ставить певні вимоги до його масогабаритних, експлуатаційних та інших характеристик, що потребує технічного аналізу наявних конструктивних схем і подальших експериментальних досліджень.

Для управління стійкістю горіння наливно-повітряних сумішей в КЗ може застосовуватися нагрітий до високих температур (за допомогою плазмотрона) струмінь повітря, модульований на резонансній частоті КЗ. Зменшення амплітуди коливань тиску на резонансній частоті досягає до 10 дБ. Відзначається також стабілізуюча дія і немодульованого струменя плазмотрона, що пояснюється поширенням зони горіння уздовж струменя плазмового генератора [24].

У Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) на протязі ряду років проводилися теоретичні та експериментальні дослідження з проблеми інтенсифікації горіння вуглеводневих палив. Виконаний комплекс досліджень щодо підвищення ефективності ГТД дозволив створити системи плазмохімічного займання і горіння, які значно підвищують надійність запуску енергоустановок, збільшують коефіцієнт повноти згорання вуглеводневих палив, а також зменшують емісію канцерогенних речовин.

Система плазмохімічної інтенсифікації горіння [25–27], призначена для стабілізації полум'я в пристроях для спалювання палив (газоподібних, рідких, альтернативних) в ГТД, складається з плазмохімічного елемента і джерела його енергопостачання. При подачі палива в плазмовий повітряний струмінь відбуваються термохімічні реакції реакції, що визначають значний вихід активних компонентів (радикалів, атомів, проміжних сполук). Ці компоненти із зони безпосереднього контакту плазми з частиною палива швидко дифундують в зону основної паливно-повітряної суміші і сприяють інтенсифікації її горіння, знижуючи енергію активації, підвищуючи швидкість горіння палива в турбулентному потоці.

У схемах [28–29] застосовуються пристрої, засновані на плазмових струменях, в яких обмежена кількість електричної енергії використовується для стабілізації горіння паливно-повітряної суміші та безпосередньо контактує з електричною дугою. Недоліком їх є відкладення на стінках реакційної камери продуктів термічного розкладання вуглеводнів і порушення режимів стабілізації [30–31].



У пристроях, досліджених в роботі [28], забезпечується різне взаємне переміщення потоків паливно-повітряної суміші і плазмоутворюючого газу (аргону або азоту) в зоні реакції і підвищення стабільності полум'я, особливо при використанні азоту. В цьому випадку в плазмовому струмені під дією високих температур виникає велика кількість атомів азоту, що реагують з молекулярним киснем. Атомарний кисень, що утворився, в результаті відіграє важливу роль в процесі стабілізації полум'я.

Виконані роботи по створенню плазмохімічних систем [26, 30] дозволили здійснити дослідно-промислову перевірку ряду систем плазмохімічної інтенсифікації горіння для енергетичного обладнання. Виявлено, що подібні системи забезпечують розширення діапазону стійкого займання і горіння палива в КЗ в 2–3 рази навіть при використанні рідкого палива, підвищення стійкості горіння на перехідних режимах, підвищення повноти згорання в процесі запуску, поліпшення умов перекидання полум'я, підвищення надійності роботи, запобігання згасання КЗ при експлуатації [26, 30].

Сучасний рівень розвитку слабкострумових плазмових генераторів (струм дуги менше 2 А) дозволяє використовувати їх переваги (великий ресурс роботи електродів, відсутність необхідності їх водяного охолодження, значний тепловий ККД, малі габарити, можливість роботи на високому тиску) з метою підвищення ефективності двопаливних камер згорання.

В роботах [32-33] наведено результати досліджень плазмово-паливних форсунок, які показали істотне зниження викидів оксидів азоту при горінні паливно-повітряної суміші в експериментальній зворотно-вихровій КЗ, а також можливості розширення діапазону стійкої роботи камери в результаті плазмового впливу.

Проведені випробування плазмового генератора з гафнієвою термоемісійною вставкою дозволили встановити значне збільшення тривалості роботи електродів (більше 3000 годин) в порівнянні з раніше використовуваними для інтенсифікації процесів горіння палив плазмотронами постійного струму, а

також підтвердили його працездатність при високих тисках робочого тіла (до 3,0 МПа) [33-34].

Плазмово-паливна форсунка (рис. 1.20) забезпечує якісне розпилювання палива, низьку температуру спалаху, часткове окиснення і безперервний контроль за полум'ям двох і більше видів палива одночасно, в тому числі рідкого палива [34]. Плазмово-паливна форсунка має унікальну можливість працювати на термічному і нетермічному режимах генерації плазми в діапазоні потужностей від 50 Вт до 1,5 кВт при зміні тиску від 1 до 12 бар. Інноваційний підхід до створення надійного займання палива в будь-яких умовах, включаючи запуск при високих тисках, плавне регулювання коефіцієнта надлишку повітря в процесі горіння, температури на вході і потужності двигуна, можливість виключення зриву полум'я, використання газоподібного і рідкого палив, в тому числі з великим вмістом вологи, дозволяє розглядати такі пристрої як перспективні для двопаливних камер згоряння ГТД.

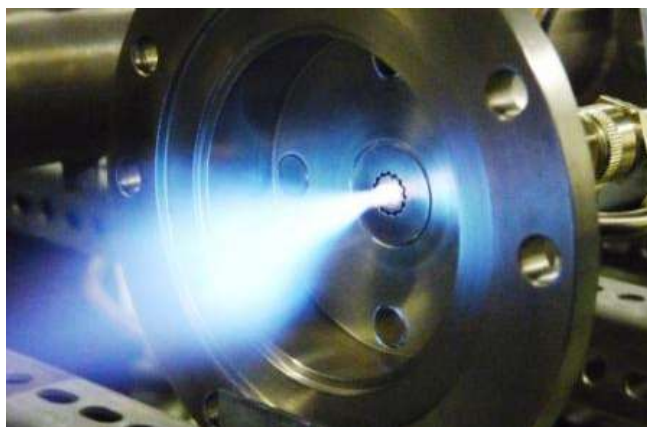


Рисунок 1.20 – Плазмово-паливна форсунка

На рис. 1.21 показана фотографія плазмового реактора, що використовується для генерування електричного розряду в рідкому паливі. Розряд постійно генерується в газовому каналі, утвореному двома протилежними повітряними потоками в рідкому етанолі, між мідними електродами [35].

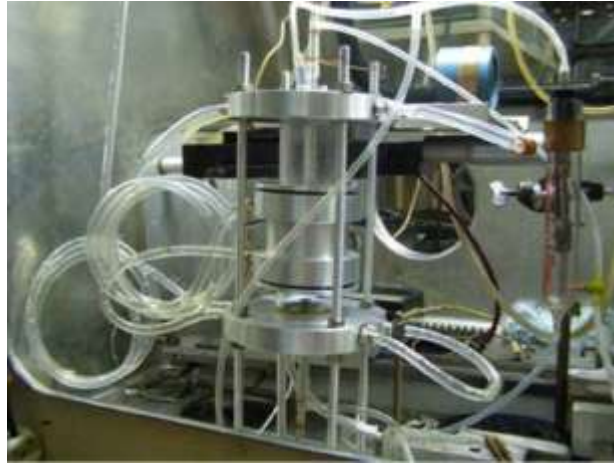


Рисунок 1.21– Фотографія плазмового реактора

Плазмовий пальник з подачею палива в дугову камеру (рис. 1.22) призначено для інтенсифікації горіння в камерах згоряння, де компоненти рухаються з високою швидкістю. Плазмовий пальник розроблено фірмою Applied Plasma Technologies (США) і заснований на використанні малопотужного імпульсного розряду з подачею палива або паливно-повітряної суміші в дугову камеру [34, 36].



Рисунок 1.22 – Плазмовий пальник з подачею палива в дугову камеру

В роботі [37] проведено ряд експериментальних та CFD–досліджень впливу плазмового супроводу на стабільність горіння факелу метану при різних швидкостях його витікання (рис. 1.23–1.24).

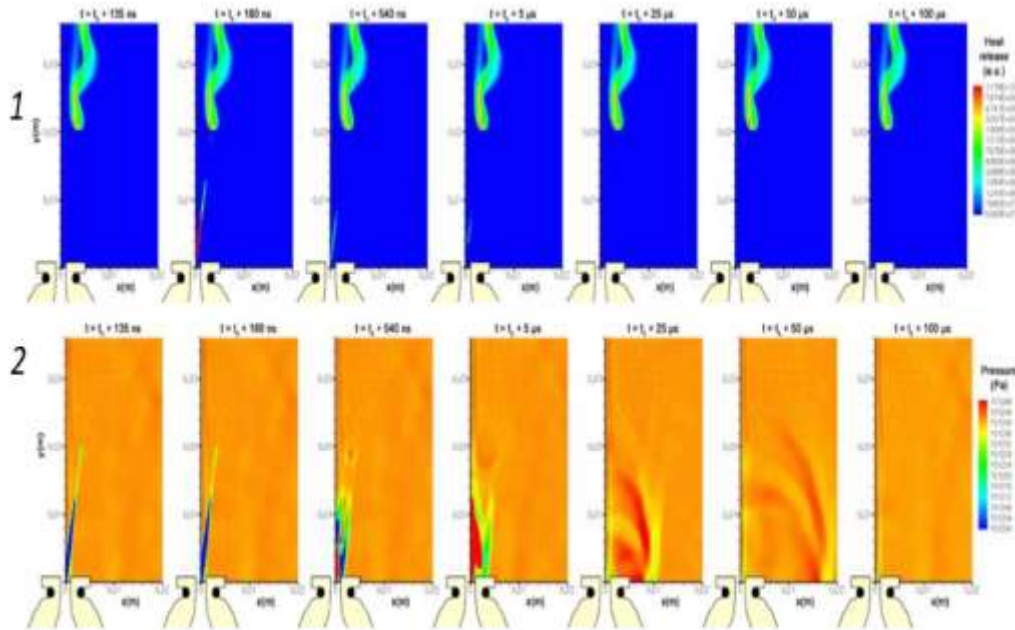


Рисунок 1.23 – Вплив плазми на виділення теплоти (1) та поле тиску (2) протягом одного електричного періоду в 135 нс, 180 нс, 540 нс, 5 мкс, 25 мкс, 50 мкс та 100 мкс після початку розряду [37]

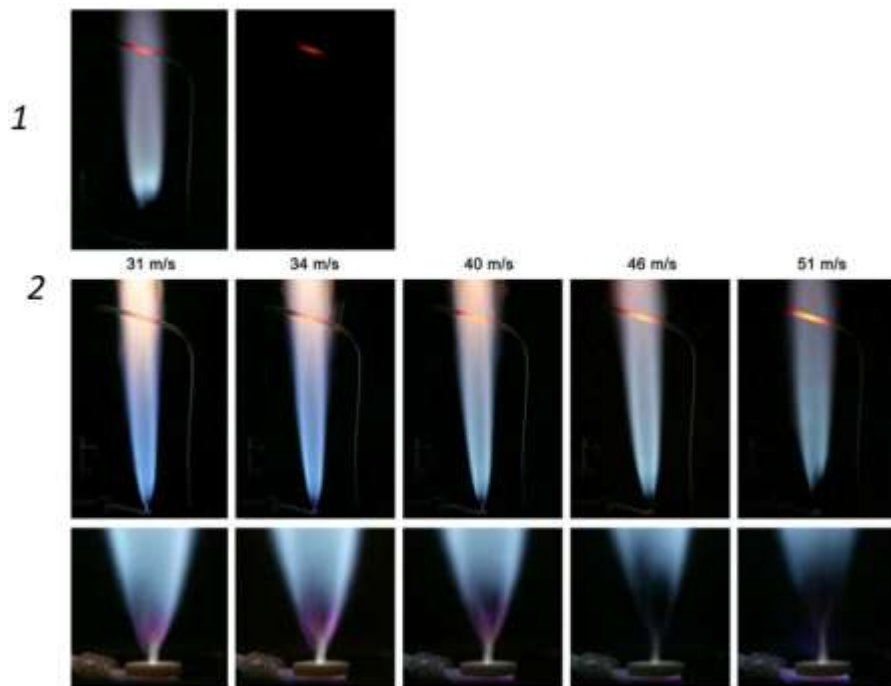


Рисунок 1.24 – Вплив плазмового розряду на поведінку факелу метану при різних швидкостях струменя:

1 – без плазмового супроводу; 2 – з плазмовим супроводом (22 kV) [37]

За отриманими результатами можна зробити висновок, що плазмовий супровід стабілізує факел палива, позитивно впливає на роботу камери згоряння та на запуск двигуна. Але дослідники відмічають, що загальноприйняті моделі симуляції горіння та турбулентності не цілком відповідають даним експерименту, тому потрібна розробка нових математичних моделей.

В Київському Національному університеті ім. Тараса Шевченка досліджувався вплив попереднього плазмового реформування палива на ефективність горіння. В якості досліджуваного палива розглядався етиловий спирт. Для попереднього реформування спирту використовувався електричний розряд в газовому каналі з рідкою стінкою. Для контролю процесів горіння здійснювалась емісійна спектроскопія плазми [35]. Отримані результати експериментів показали, що рідинно-плазмові системи з вторинними розрядами можуть бути дуже ефективними для риформінгу рідких палив. Результати експерименту показують, що поперечна плазмова дуга може ефективно застосовуватись для підвищення ефективності спалювання збіднених вуглеводнево-повітряних сумішей, що в свою чергу впливає на зменшення емісії незгорілих вуглеводнів.

Процеси плазмової активації ті моделювання хімічної кінетики для рідких палив на сьогоднішній час потребують глибокого вивчення. У роботі [38] досліджено часткове окиснення дизельного палива ( $C_{12}H_{23}$ ) за допомогою плазмової технології, в роботі [39] розглянуто кінетичні аспекти реформування дизельного палива дугою, що обертається. Генерація водню в процесі риформінгу була значно спрощена і представлена у вигляді двостадійної реакції. На першому етапі головну роль в активації палива для виробництва водню відіграє потужність плазми або термічна активація. Пізніше, на другому етапі, конверсія палива досягає свого максимального значення, але кількість кисню або співвідношення  $O_2/C$  контролює окиснення водню.

При температурах нижче 900 К виявлено [39], що реакції окиснення відбуваються тільки в межах області плазми, так як без активації плазмою реакції

швидко сповільнюються. Поведінка системи починає змінюватися при температурі вище 900 К, а реакції відбуваються поза області плазми.

В роботах [40-41] проведено теоретико-експериментальні дослідження плазмотрону постійного струму, призначеного для пригнічення акустичної нестійкості в камерах згоряння ГТД. Визначена зона стійкого горіння дуги плазмотрона для стабілізації пульсаційних процесів. В результаті експериментальних досліджень отримана вольт-амперна характеристика плазмотрона постійного струму для різних витрат плазмоутворюючого повітря. Результати числового моделювання, отримані в роботі [41], свідчать, що використання плазмохімічних стабілізаторів палив в низькоемісійних камерах згоряння ГТД дозволить зменшити рівень викидів оксидів азоту до показників, які задовольняють сучасні європейські вимоги к газотурбінним двигунам, що працюють на природному газі.

Таким чином, проведений аналіз робочого процесу в двопаливній камері згоряння ГТД і можливостей інтенсифікації горіння різних вуглеводневих палив дозволив сформулювати **робочу гіпотезу** про можливість комплексного фізико-хімічного впливу низькотемпературної повітряної плазми на процеси турбулентного горіння в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння.

Для підвищення ефективності процесів в двопаливній камері згоряння пропонується використовувати **ідею** попереднього перемішування рідкого і газоподібного палива з повітрям в радіально-осьових завихрювачах, дрібнодисперсного розпилювання рідкого палива високошвидкісним повітряним потоком після компресора високого тиску, а також активації збідненої паливно-повітряної суміші струминами низькотемпературної плазми, що забезпечить перехід з одного виду палива на інший без зупинки газотурбінного двигуна та мінімальні викиди токсичних компонентів на основних режимах роботи.

#### **1.4 Математичне моделювання робочих процесів як спосіб підвищення ефективності проєктування двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД**

Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в області математичного моделювання процесів горіння та низькоемісійних камер згоряння [42-49], методологічні і технічні аспекти вирішення задачі підвищення ефективності двопаливних камер згоряння ГТД до теперішнього часу розроблені недостатньо. Багато дослідників зосередилися на вирішенні проблем двопаливних камер згоряння виключно експериментальними методами, і тільки деякі з дослідників використовують математичне моделювання та сучасні методи обчислювальної гідродинаміки. Промислове використання плазмохімічних елементів в якості стабілізаторів горіння наливно-повітряних сумішей в двопаливних камерах згоряння ГТД практично відсутнє, що обумовлено недостатньою розробкою не тільки практичних екземплярів систем, але й недосконалістю математичних моделей прогнозування процесів плазмохімічної активації.

Відмітимо, що на протязі останніх років було опубліковано ряд робіт, в яких розглянуто окремі аспекти теоретичного моделювання та термодинамічного аналізу впливу низькотемпературної плазми на процеси горіння газоподібних палив [41, 42, 50], рідких вуглеводнів [5, 26, 33] та вугілля [51]. Всі вони здебільшого стосуються паливоспалюючих пристроїв, що працюють на одному окремому виді палива.

Для теоретичного аналізу процесів горіння рідких і газоподібних палив, а також впливу повітряної плазми на фізико-хімічні механізми в двопаливних камерах згоряння ГТД пропонується використовувати методи тривимірного моделювання з урахуванням механізмів плазмохімічної інтенсифікації горіння вуглеводневих палив, що розрізняються фізичним станом. Для цього будуть вдосконалені тривимірні математичні моделі континуального типу, які описують закони збереження та переносу маси, енергії, імпульсу та хімічних компонентів у

хімічно реагуючій турбулентній системі. Моделі планується верифікувати за даними лабораторних експериментів та використовувати при аналізі впливу енергетичних параметрів плазмових генераторів на екологічні характеристики двопаливних камер згоряння.

Відмітимо відсутність на теперішній час подібних моделей обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics - CFD), які описують процеси плазмової активації різних за фазовим станом вуглеводневих палив, тому розробка і верифікація таких моделей дозволить проводити числові експерименти з віртуальними моделями та надавати достовірну інформацію про структуру хімічно реагуючих турбулентних потоків в умовах неізотермічності, турбулентних пульсацій, плазмової активації та складних геометричних форм двопаливних камер згоряння.

## **1.5 Обґрунтування необхідності проведення досліджень за обраною темою**

Економічність і безпеку експлуатації стаціонарних і суднових енергетичних установок значною мірою визначаються ефективністю процесів спалювання вуглеводневих палив. Резерви вдосконалення традиційної техніки спалювання палив практично вичерпані. Тому в світовій науці явно позначився перехід до прогресивних низькоемісійних технологій використання органічних ресурсів.

Посилення міжнародних норм на рівні викидів токсичних компонентів визначає необхідність комплексного рішення актуальних питань удосконалення енергетичних систем, що передбачає створення принципово нових конструктивних схем двопаливних камер згоряння ГТД з плазмовим супроводом. Реалізація таких паливоспалюючих пристроїв з плазмовими інтенсифікаторами забезпечить вирішення задач підвищення ефективності двопаливних камер згоряння ГТД та прискорить створення мобільних конкурентоздатних вітчизняних ГТД наземного та морського виконання, які будуть відповідати європейським вимогам до енергетичних установок нового покоління та зможуть працювати на рідкому та газоподібному органічних паливах одночасно.



Після проведеного аналізу методів організації робочих процесів в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД, особливостей виконаних на цей час конструкцій та переваг використання низькотемпературної плазми для інтенсифікації горіння вуглеводнів можна відмітити:

1. Існує практична необхідність застосування ефективних двопаливних низькоемісійних ГТД, призначених для роботи автономних мобільних енергетичних засобів комплексного та швидкого забезпечення об'єктів електроенергією та теплотою.

2. Одним із основних недоліків сучасних двопаливних камер згоряння є високий рівень емісії токсичних компонентів (оксидів азоту і монооксиду вуглецю), особливо при роботі на рідкому паливі, що часто усувається впорскуванням води або водяної пари в первинну зону камери згоряння. Такий “мокрий” метод придушення утворення оксидів азоту не є раціональним і потребує збільшення вартості експлуатації двигуна і зміни конструктивної схеми камери згоряння і системи паливоподачі.

3. На сьогоднішній день існує потреба в експериментальних і теоретичних дослідженнях стосовно вибору раціональних методів підвищення ефективності двопаливних камер згоряння і способів подачі рідкого палива в жарові труби. Особливо це важливо для низькоемісійних камер згоряння з попереднім перемішуванням палива з окиснювачем.

4. В літературі практично відсутні дані з можливостей використання низькотемпературної повітряної плазми для інтенсифікації процесів сумішоутворення і горіння різних за фазовим станом палив в двопаливних камерах згоряння ГТД. Але існуючі результати досліджень процесів плазмохімічного горіння різних вуглеводнів показують потенційну можливість використання плазмових генераторів для підвищення ефективності двопаливних камер згоряння.

5. Існує нагальна потреба вдосконалення моделі плазмової активації горіння різних за фазовим станом палив в сукупності з кінетичними моделями окиснення

вуглеводнів для можливостей тривимірного прогнозування параметрів камер згоряння.

Зазначимо, що комплексні дослідження у напрямку підвищення ефективності двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД в Україні практично відсутні. Таким чином, необхідність проведення досліджень за обраною темою визначається відсутністю комплексного аналізу механізмів підвищення ефективності горіння різних за фазовим станом палив в двопаливних низькоемісійних камер згоряння за рахунок плазмової інтенсифікації процесів сумішоутворення і горіння вуглеводнів.

Таким чином, за **мету дисертаційної роботи** визначено підвищення ефективності двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД шляхом використання низькотемпературної повітряної плазми для активації паливно-повітряних сумішей.

Цю мету планується досягти за допомогою математичного і фізичного моделювання процесів в двопаливних камерах згоряння з плазмовим супроводом, експериментальних досліджень плазмових генераторів, а також узагальненням результатів з розробкою практичних рекомендацій по використанню запропонованих конструктивних рішень.

### **Висновки по першому розділу**

Проведені аналіз сучасних методів організації робочого процесу в двопаливних камерах згоряння ГТД, огляд основних конструктивних типів таких камер згоряння, а також аналіз можливостей використання в них повітряної плазми дозволяють зробити наступні висновки:

1. Аналіз сучасних методів організації робочого процесу в двопаливних камерах згоряння ГТД світових та вітчизняних виробників виявив можливості модернізації та вдосконалення конструктивних схем низькоемісійних камер згоряння, що працюють на газоподібному та рідкому дистильованому паливах.

2. Аналіз методів інтенсифікації горіння вуглеводневих палив показав актуальність використання плазмової активації як одного з перспективних напрямків підвищення ефективності й надійності двопаливних енергетичних систем. Підвищення ефективності процесів горіння газоподібного та рідкого палив в низькоемісійних камерах згорання ГТД може бути досягнуто за рахунок плазмохімічного впливу слабкострумових плазмових генераторів на процеси сумішоутворення й хімічної кінетики.

3. Виявлено можливості модернізації та вдосконалення пристроїв плазмової активації палив, що різняться фазовим станом.

4. Показана актуальність розробки математичної моделі континуального типу процесів турбулентного сумішоутворення та горіння різних за фізичним складом палив в камері згорання ГТД з плазмовим супроводом.

5. Обґрунтовано необхідність проведення дисертаційних досліджень за обраною темою.

Результати дослідження поточного розділу опубліковано автором в [78,79,91,112].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ В ДВОПАЛИВНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ ГТД

#### 2.1 Задачі досліджень процесів в двопаливних камерах згоряння ГТД

В основу досліджень покладена **робоча гіпотеза** про можливість комплексного фізико-хімічного впливу низькотемпературної повітряної плазми на процеси турбулентного горіння різнорідних за фазовим станом палив, який може бути ефективно використано для організації робочого процесу в двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

Для підвищення ефективності процесів в двопаливній газотурбінній камері пропонується використати **ідею** попереднього перемішування рідкого і газоподібного палива з повітрям в радіально-осьових завихрювачах жарової труби, дрібнодисперсного розпилювання рідкого палива високошвидкісним повітряним потоком після компресора високого тиску, а також активації збідненої паливно-повітряної суміші струминами низькотемпературної плазми, що забезпечить перехід з одного виду палива на інший без зупинки газотурбінного двигуна та мінімальні викиди токсичних компонентів на основних режимах роботи. Ця ідея є оригінальною та обґрунтованою з точки зору основних принципів організації низькоемісійного спалювання різних вуглеводневих палив.

**Об'єктом дослідження** є процеси турбулентного сумішоутворення та горіння різних за фізичним складом палив в двопаливній газотурбінній камері згоряння з плазмохімічним елементом.

**Предметом дослідження** є фізико-хімічні закономірності процесів турбулентного сумішоутворення та горіння різних за фізичним складом палив в двопаливній камері згоряння ГТД з плазмовим супроводом.

Закономірності високотемпературних термічних перетворень паливно-повітряної суміші в низькотемпературній повітряній плазмі досить складні. Вони

визначаються процесами теплової взаємодії вуглеводневих палив з плазмовим струменем, реагування хімічно активних нестабільних компонентів (атомів, радикалів), інтенсифікацією реакцій окиснення основного палива в камері згоряння, явищами тепло-масопереносу, тощо.

Натурні дослідження процесів розпилювання та горіння палив достатньо проблематичні у зв'язку з високою вартістю матеріальних та людських ресурсів, високими температурами і тисками в камері згоряння. Тому доцільним є розробка математичних моделей турбулентного сумішоутворення та горіння різних за фізичним складом палив з урахуванням хімічної кінетики та моделей плазмової активації, адже за допомогою сучасних методів математичного моделювання та обчислювальної гідродинаміки (CFD) задачі вибору раціональних параметрів паливоспалюючих пристроїв можуть розв'язуватися з високою швидкістю та точністю.

Процеси енергоперетворень в камерах згоряння планується розглядати за допомогою розробленої тривимірної математичної моделі, що містить у собі рівняння нерозривності, збереження кількості руху та енергії, переносу реагуючих компонентів з урахуванням дисипації вихорів, утворення і розкладання оксидів азоту, переносу характеристик турбулентності, променистого теплообміну у взаємодії з рівняннями моделі дискретної фази та рівняннями хімічної кінетики і впливу низькотемпературної повітряної плазми на енергію активації хімічних реакцій окислення вуглеводнів.

Постійний плазмовий супровід процесів горіння різних за фізичним станом палив в газотурбінних камерах згоряння значно відрізняється від наявних способів інтенсифікації і дозволить значно підвищити ефективність робочого процесу двопаливних камер, а також розширити межі поширення полум'я.

Для досягнення мети роботи, сформульованій в розділі 1, необхідно вирішити наступні задачі:

1. Аналіз сучасних методів організації процесів в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння і можливого використання плазмохімічних пристроїв.

2. Обґрунтування та модифікація математичної моделі турбулентних хімічно реагуючих потоків в двопаливній низькоемісійній камері згоряння, що працює на рідкому та газоподібному паливах.

3. Розробка кінетичних механізмів утворення токсичних компонентів в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння.

4. Верифікація запропонованих математичних моделей за результатами випробувань низькоемісійних паливоспалювальних пристроїв.

5. Визначення характеристик двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД, що працюють на газоподібному і рідкому паливах.

6. Визначення експериментальним шляхом енергетичних характеристик слабкострумових генераторів повітряної плазми.

7. Виявлення особливостей впливу плазмохімічного елемента та способів підведення рідкого палива на емісійні характеристики двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

8. Визначення основних напрямків подальших досліджень та розробка практичних рекомендацій щодо удосконалення вітчизняних двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

Головними засобами вирішення завдань дисертації є системний аналіз, математичне та фізичне моделювання процесів у двопаливних камерах згоряння ГТД, експериментальні дослідження енергетичних параметрів генераторів повітряної плазми, а також узагальнення результатів та синтез нових схемних та конструктивних рішень із розробкою рекомендацій з підвищення ефективності процесів у двопаливних камерах згоряння ГТД для створення вітчизняних двигунів нового покоління.

Загальна схема досліджень показана на рис. 2.1.

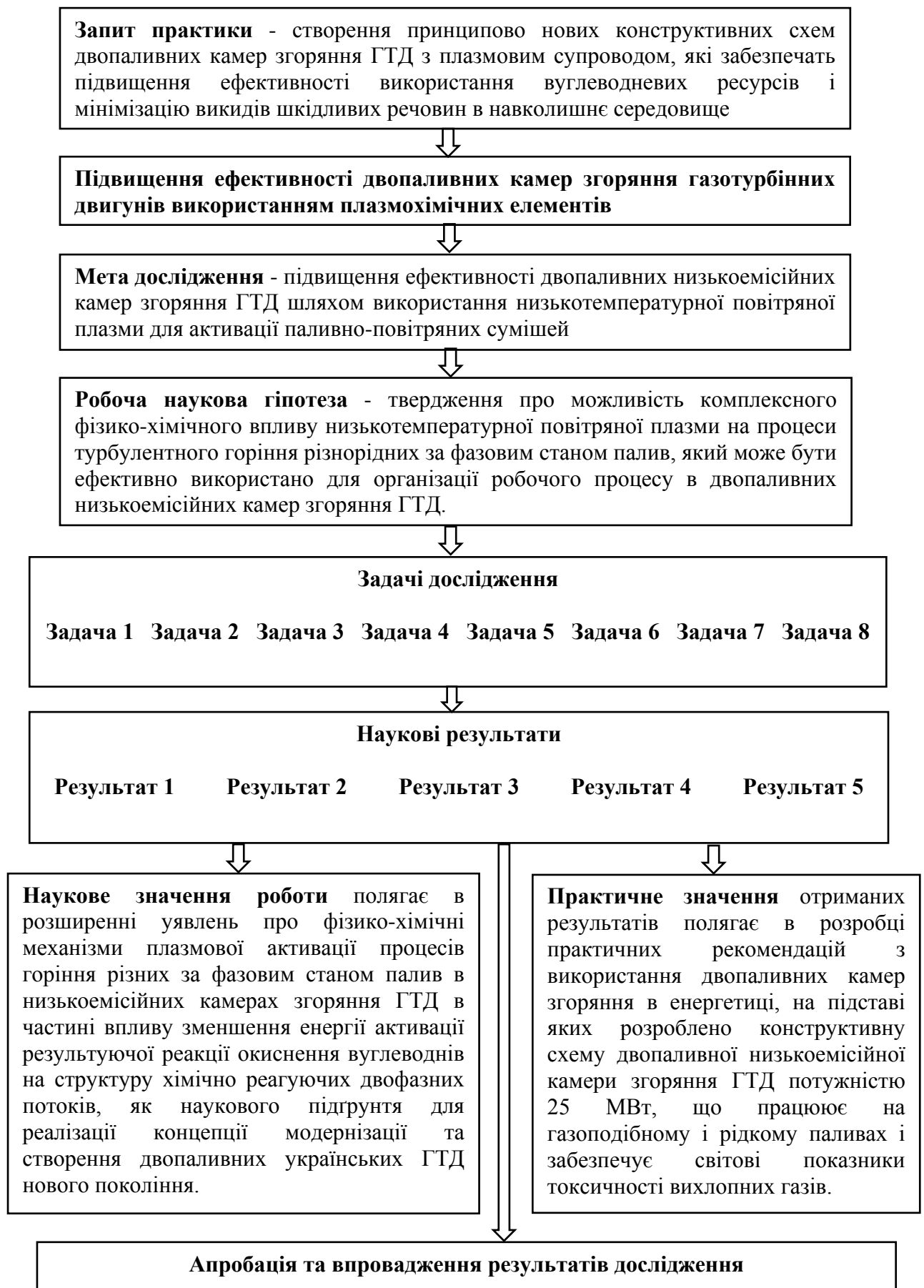


Рисунок 2.1 – Загальна схема досліджень

## 2.2 Методи теоретичних досліджень та формування математичної моделі

Як вказано в розділі 1, двопаливна камері згоряння ГТД являє собою одну зі складових технічної системи, якою є тепловий двигун в цілому. Вона може бути досліджена методами математичного моделювання, при цьому багатоваріантність схемних рішень вимагає виявлення взаємозв'язків між окремими елементами.

Завдання математичного моделювання турбулентного горіння в таких пиливоспалюючих пристроях – це завдання спільного моделювання гідродинаміки та хімічної кінетики, а також взаємодії між турбулентним потоком і хімічними реакціями. При цьому точність прогнозування рівнів утворення шкідливих викидів значно залежить від точності визначення полів швидкостей, тисків і температур. Таким чином, в першу чергу при розробці моделі двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД необхідно вибрати і обґрунтувати відповідні моделі турбулентності, змішування палива і повітря, а також моделі розпилювання й випаровування у разі використання рідкого палива.

Ці математичні моделі приймають форму систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, розв'язання яких у найважливіших аспектах повністю узгоджується з характеристиками елементів пристрою, що моделюється, або процесу. Модель можна розглядати як ідеалізований або неповний опис фактично існуючих залежностей між конструктивними і робочими характеристиками камери згоряння, з одного боку, і фундаментальними законами фізики та хімії - з іншого. Дослідження процесів горіння на рівні математичного моделювання є проміжною ланкою між дослідженнями, проведеними на рівнях інженерної практики та фундаментальної науки.

Математична модель при дослідженнях хімічно реагуючих потоків повинна бути заснована на розв'язанні систем рівнянь, що описують конвективний, дифузійний перенос і перенос концентрацій для кожного з компонентів реагуючої турбулентної системи з урахуванням двофазності течії та впливу низькотемпературної плазми на активацію паливно-повітряних сумішей.



При розробці моделі двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потрібно врахувати, що вона буде містити ряд субмоделей найбільш важливих фізичних і хімічних процесів: сумішоутворення реагентів до повної молекулярної однорідності, турбулентного переносу, а також горіння газоподібного та рідкого палив з урахуванням пульсацій концентрацій компонентів реагуючої системи.

Для розв'язання задач прогнозування параметрів двопаливних камер згоряння ГТД найбільш доцільним є використання тривимірних моделей континуального типу [43-45, 52-56].

При використанні математичної моделі двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД при роботі на газоподібному паливі враховано досвід Національного університету кораблебудування з проведення числових тривимірних експериментів з моделями паливоспалюючих пристроїв різних типів [5, 13, 41, 50].

Математична модель двопаливної низькоемісійної камери згоряння, що працює на газоподібному паливі, заснована на рівняннях: нерозривності (2.1), збереження кількості руху (2.2), збереження енергії (2.3), перенесення хімічних компонентів суміші (2.5), утворення/розкладання оксидів азоту (2.6). Математична модель також містить треступінчасту модель горіння метану  $\text{CH}_4$ .

Через складність фізико-хімічних процесів в камерах згоряння при побудові математичної моделі зроблено певні допущення, які спрощують процедуру числового рішення: об'ємною в'язкістю, в'язким нагріванням, теплообміном через стінки камери згоряння нехтуємо.

Рівняння збереження маси або рівняння нерозривності для стислих і нестислих середовищ запишемо у вигляді [13, 43, 48]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m. \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – масова густина потоку;

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

$S_m$  – джерельний член, який визначає масу, яка приноситься в потік будь-яким способом (наприклад, випаровуванням крапель рідини).

Рівняння збереження кількості руху в нерухомій системі координат можна записати таким чином [13, 44, 49]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla(\rho \bar{v} \bar{v}) = \nabla p + \nabla(\tau) + \rho \bar{g} + \bar{F}. \quad (2.2)$$

де  $p$  - статичний тиск;

$\rho \bar{g}$  - гравітаційна сила, що діє на одиницю маси;

$\bar{F}$  - зовнішні сили, що діють на потік;

$\tau$  - тензор тисків.

Рівняння збереження енергії в загальному вигляді записується так [43, 50–52]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla(-\bar{J}_q + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v})) + S_h, \quad (2.3)$$

де  $E$  – повна енергія;

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

$\bar{J}_j$  – густина дифузійного теплового потоку  $j$ -го компонента суміші.

У рівнянні (2.3) повна енергія  $E$  визначається таким чином [43, 50–52]:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2},$$

де  $h$  – ентальпія ідеального газу, що знаходиться за виразом  $h = \sum_j Y_j h_j$  для

багатокомпонентної суміші.

У даному випадку  $Y_j$  – концентрація  $j$ -го компонента, а  $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$  – ентальпія компонента в інтервалі температур від  $T_{ref} = 293 \text{ K}$  до температури  $T$ .

Вираз у дужках у правій частині диференціального рівняння (2.3) –  $(\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v})$  описує в'язкісний нагрів. Оскільки для газів і хімічно реагуючих потоків внесок в'язкісного нагріву незначний, то рівняння збереження енергії можна перетворити таким чином [43, 50–52]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\bar{v}(\rho E + p)) = -\nabla \bar{J}_q + S_h, \quad (2.4)$$

де  $S_h = -\sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j$  – джерельний член, що описує тепловиділення в результаті

хімічних реакцій;

$h_j^0$  – ентальпія формування  $j$ -го компонента;

$R_j$  – об'ємна швидкість утворення компонента;

$M_j$  – молярна маса.

Якщо необхідно враховувати рівняння для хімічних речовин, то отримати концентрацію кожного компонента можна розв'язавши рівняння для його конвективно-дифузійного переносу.

Рівняння збереження маси для окремих хімічних компонентів суміші у загальному вигляді має вигляд [43, 44, 50–52]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \bar{J}_i + R_i + S_i, \quad (2.5)$$

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

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

$\bar{J}_i$  – масова дифузія  $i$ -го компоненту.

У цьому виді рівняння розв'язуються для  $N - 1$  компоненту, де  $N$  – загальна кількість хімічних елементів, присутніх в системі. Оскільки сумарна масова частка всіх компонентів повинна дорівнювати одиниці, то масова частка  $N$ -го компоненту визначається як одиниця мінус сума  $N - 1$  знайдених масових часток. Щоб звести до мінімуму числову помилку  $N$ -й компонент вибирається таким чином, щоб його масова частка в суміші була максимальна. Цим компонентом може бути, наприклад  $N_2$ , коли окиснювачем є повітря.

Математична модель емісії оксидів азоту являє собою систему рівнянь масового переносу, які враховують конвекцію, дифузію, а також утворення і

розкладання NO і споріднених сполук, та отримана на основі закону збереження маси. Вплив часу перебування реагентів у реакційному об'ємі на швидкість утворення NO<sub>x</sub> враховано в конвективних членах визначальних рівнянь, записаних в Ейлеровій системі відліку. Для термічних і швидких оксидів азоту необхідно розв'язувати рівняння переносу для NO, записане у векторній формі, засноване на рівнянні збереження маси для окремих хімічних компонентів суміші:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{NO}}) + \nabla(\rho \bar{u} Y_{\text{NO}}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}}, \quad (2.6)$$

де  $Y_{\text{NO}}$  – масова концентрація NO;

$D$  – коефіцієнт дифузії;

$\bar{u}$  – вектор швидкості;

$S_{\text{NO}}$  – джерельний член, який визначається в залежності від механізму утворення NO<sub>x</sub>.

Термічний спосіб утворення оксидів азоту (або утворення за механізмом Я. Б. Зельдовича) складається з наступних елементарних реакцій [52, 53]:



Константи швидкості для цих реакцій взяті за рекомендаціями робіт [7, 13] і мають такі значення:

$$k_1 = 1,8 \cdot 10^8 e^{-38370/T}, \quad k_{-1} = 3,8 \cdot 10^7 e^{-425/T},$$

$$k_2 = 1,8 \cdot 10^4 T e^{-4680/T}, \quad k_{-2} = 3,8 \cdot 10^3 T e^{-20820/T},$$

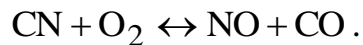
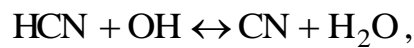
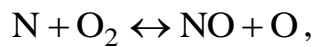
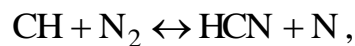
$$k_3 = 7,1 \cdot 10^7 e^{-450/T}, \quad k_{-3} = 1,7 \cdot 10^8 e^{-24560/T},$$

де  $k_1, k_2, k_3$  – константи швидкості прямих реакцій;

$k_{-1}, k_{-2}, k_{-3}$  – константи швидкості зворотних реакцій.

Механізм утворення швидких оксидів азоту NO запропоновано Фенімором виходячи по результатах вимірів концентрації NO<sub>x</sub> над плоским вуглеводневим

полум'ям [7]. В цьому механізмі беруть участь радикали СН, які утворюються як проміжні компоненти у фронті полум'я:



Енергія активації першої реакції (75 кДж/моль) значно менша в порівнянні з енергією активації реакції термічного утворення NO (318 кДж/моль), тому утворення швидких NO відбувається при відносно низьких температурах (близько 1000 К) і в Perezбагачених сумішах.

Для визначення швидкості утворення швидких оксидів азоту прийнято наступний емпіричний вираз [7, 52]:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = f \cdot k'_{pr} [\text{O}_2]^a [\text{N}_2] [\text{C}_x\text{H}_{2n+2}] e^{-E/RT},$$

де  $f, a$  – поправочні емпіричні коефіцієнти;

$n$  – кількість атомів вуглецю в молекулі вуглеводневого палива;

$$\phi = \frac{G_{нов} / G_{нал}}{L_0} \text{ – еквівалентне співвідношення;}$$

$R$  – універсальна газова стала;

$E$  – енергія активації реакції;

$k'_{pr}$  – швидкість реакції].

Система рівнянь (2.1, 2.2, 2.4, 2.5, 2.6) є незамкненою. Зазвичай вона замикається шляхом додавання відповідних диференціальних рівнянь моделі турбулентності, напівемпіричних залежностей для тензора тисків (2.10), теплового і дифузійного потоків (2.12-2.14), а також рівняння стану суміші ідеальних газів (2.16). Залежність термодинамічних та теплофізичних властивостей газів від температури враховується за допомогою апроксимуючих формул.

Скористуємось співвідношення для тензора тисків, відомим з кінетичної теорії розріджених газів [13, 43]:

$$\tau = \mu \left[ \nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T - \left( \frac{2}{3\mu} - k \right) \nabla \cdot \bar{v} I \right], \quad (2.10)$$

де  $\mu$  – молекулярна в'язкість;

$I$  – одиничний тензор;

$k$  – коефіцієнт, що відображає ефект об'ємного розширення.

Скориставшись допущенням про нехтування об'ємною в'язкістю, перепишемо вираз (2.10) у вигляді [13, 43]:

$$\tau = \mu \left[ \nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} I \right]. \quad (2.11)$$

Згідно закону Фур'є тепловий потік в суміші задається двома членами: тепловим потоком, викликаним теплопровідністю  $\vec{J}_{q,\lambda}$ , і потоком теплоти за рахунок дифузії  $\vec{J}_{q,d}$

$$\vec{J}_q = \vec{J}_{q,\lambda} + \vec{J}_{q,d}, \quad (2.12)$$

де  $\vec{J}_{q,\lambda} = -\lambda_{eff} \nabla T$ ;  $\vec{J}_{q,d} = \sum_j h_j \vec{J}_j$ .

Тоді закон Фур'є матиме вигляд:

$$\vec{J}_q = -\lambda_{eff} \nabla T + \sum_j h_j \vec{J}_j, \quad (2.13)$$

де  $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$  – коефіцієнт ефективної теплопровідності.

Дифузійний потік  $\vec{J}_i$  згідно закону Фіка для термодифузії розраховується наступним чином [13, 43]:

$$\vec{J}_i = - \left( \rho \cdot D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \cdot \nabla Y_i - D_{i,T} \frac{\nabla T}{T}, \quad (2.14)$$

де  $D_{i,T}$  – коефіцієнт термічної дифузії;

$D_{i,m}$  – середній коефіцієнт масової дифузії для  $i$ -го компонента в суміші;

$Sc_t$  – турбулентне число Шмідта, яке визначається за формулою  $Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$ ;

$\mu_t$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості, що визначається за формулою Колмогорова–Прандтля [43, 52]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.15)$$

де  $C_\mu$  – емпірична константа;

$D_t$  – коефіцієнт турбулентної дифузії.

Закон Клайперона–Менделєєва для суміші ідеальних газів встановлює зв'язок між термодинамічними змінними наступним чином:

$$p = R \rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}, \quad (2.16)$$

де  $M_i$  – молекулярна маса хімічного компонента  $i$ ;

$R$  – універсальна газова стала.

Істотний вплив на прогностні властивості математичної моделі двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД, що розробляється, має вибір гідродинамічної моделі турбулентності. В даний час відомо досить велика кількість різних їх модифікацій, проте обґрунтованого рішення стосовно до систем гомогенно-дифузійного горіння остаточно ще немає. Тому питання про ефективне використання та вибір моделей турбулентного перенесення є актуальним, але засновуючись на ряді досліджень [50, 52-53] можна прийти до висновку про можливість використання достатньо розробленої  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності.

*Стандартна  $k-\varepsilon$  модель турбулентності* являє собою сукупність диференційних рівнянь переносу кінетичної енергії турбулентності  $k$  і питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності  $\varepsilon$  [43, 44, 52].

Ці рівняння мають такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_{t,k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_{t,\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (2.18)$$

У формулах (2.17) і (2.18):

$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  – генерація турбулентної кінетичної енергії залежно від

градієнтів осереднених швидкостей;

$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$  – генерація турбулентної кінетичної енергії в результаті

плавучості для ідеальних газів;

$Y_M$  – внесок пульсуючого розширення для стислих потоків, що розраховується наступним чином:

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2,$$

де  $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$  – турбулентне число Маха,

$a$  – місцева швидкість звуку;

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

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

$S_k, S_\varepsilon$  – джерельні члени для  $k$  і  $\varepsilon$ .

В результаті перетворень [43] отримаємо наступні співвідношення:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_{t,k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_{t,\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (2.20)$$

Значення емпіричних констант взяті з експериментальних даних [13, 43, 44] для турбулентних потоків продуктів згорання і повітря:



$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_{2\varepsilon} = 1,92, Pr_{t,k} = 1, Pr_{t,\varepsilon} = 1,3.$$

*RNG різновид  $k - \varepsilon$  моделі турбулентності.* Рівняння RNG  $k - \varepsilon$  моделі турбулентності виведено з нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса з використанням математичного методу реномгрупи [57]. У них присутнє додаткове рівняння для обчислення турбулентної в'язкості, а значення констант відрізняються від тих, що використовуються в стандартній  $k - \varepsilon$  моделі.

Загальний вигляд диференціальних рівнянь RNG-моделі:

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

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

де  $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  – величини зворотні значенням ефективного числа Прандтля для  $k$  і  $\varepsilon$  відповідно;

$\mu_{eff}$  – ефективна в'язкість, для обчислення якої додається нове диференціальне рівняння:

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu}, \quad (2.21)$$

де  $\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu$ ;  $C_\nu = 100$  – константа.

Рівняння (2.21) інтегрується по Ренольдсу для того, щоб визначити вплив масштабу турбулентності на ефективний турбулентний перенос. Це дозволяє краще описувати низькорейнольдсові течії і течії біля стінок.

Величини  $\alpha_k$  і  $\alpha_\varepsilon$  розраховуються з використанням аналітичного виразу, отриманого в теорії ренормування [57]

$$\left| \frac{\alpha - 1,3929}{\alpha_0 - 1,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{\alpha + 2,3929}{\alpha_0 + 2,3929} \right|^{0,3679} = \frac{\mu_{\text{мол}}}{\mu_{\text{eff}}},$$

де  $\alpha_0 = 1,0$  – константа;

$\mu_{\text{мол}}$  – коефіцієнт молекулярної в'язкості.

Зазначимо, що основна відмінність між стандартною і RNG  $k - \varepsilon$  моделями турбулентності полягає в додатковій умові:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad (2.22)$$

де  $\eta \equiv Sk / \varepsilon$ ;  $\eta_0 = 4,38$ ;  $\beta = 0,012$ .

Значення констант для RNG-моделі:  $C_{1\varepsilon} = 1,42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,68$ ,  $C_\mu = 0,0845$ .

В областях потоку, де  $\eta > \eta_0$  значення  $R_\varepsilon$  є негативним, тим самим зменшуючи значення ефективної в'язкості. Таким чином, для потоків з великим градієнтом напружень RNG-модель дає більш низькі значення турбулентної в'язкості, ніж стандартна  $k - \varepsilon$  модель турбулентності. Внаслідок цього RNG-модель більш придатна для моделювання потоків, що різко розширюються і течій з великою кривизною ліній струму, що дає підставу рекомендувати її для проведення практичних розрахунків двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

З метою моделювання процесів окиснення газоподібного пального використано тріступінчасту схему горіння метану, запропоновану в [13]. Відмінною особливістю цієї схеми від традиційної моделі горіння  $\text{CH}_4$  є додавання третьої реакції – дисоціації вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ . Ця схема раніше була застосовна для прогнозування параметрів низькоемісійних камер згоряння ГТД, які працюють на газоподібному паливі, в інтервалі тисків від 0,1 до 4,0 МПа і коефіцієнтів надлишку повітря 0,7-1,7. Константи швидкостей реакцій представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Константи швидкості для триступінчастого механізму окиснення метану

Реакція	$A$	$E$ , Дж/моль	$\beta$	Порядок реакції			
$\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$4,64 \cdot 10^9$	$1,17 \cdot 10^8$	-0,062	$\text{CH}_4$	0,5	$\text{O}_2$	1,066
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$	$3,97 \cdot 10^{11}$	$7,68 \cdot 10^7$	0,215	$\text{O}_2$	1,756	$\text{CO}$	1,258
$\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 0,5\text{O}_2$	$6,02 \cdot 10^5$	$1,31 \cdot 10^8$	-0,108	$\text{CO}_2$	1,357		

### 2.3 Методологія експериментальних досліджень

Загальне завдання математичного і фізичного моделювання процесів плазмохімічної активації горіння вуглеводневих палив полягає у виявленні закономірностей впливу параметрів низькотемпературної повітряної плазми на ефективність робочого процесу двопаливної низькоемісійної камери згорання.

Відсутність низки даних щодо важливих енергетичних характеристик слабкострумових генераторів низькотемпературної плазми у складі двопаливних паливоспалюючих пристроїв визначила необхідність розв'язання експериментальних задач, пов'язаних з розробкою нових конструктивних схем плазмових інтенсифікаторів, розширенням діапазонів їх стійкої роботи, покращенням масогабаритних показників.

Для дослідження характеристик слабкострумових генераторів низькотемпературної повітряної плазми використано обладнання науково-дослідного центру плазмохімічних технологій в енергетиці Науково-дослідного інституту енергетики та машинобудування Національного університету кораблебудування.

Відповідно до завдань дисертаційної роботи сформульовано наступні задачі експериментальних досліджень слабкострумових генераторів низькотемпературної плазми:

- модернізація експериментальної установки для дослідження характеристик слабкострумових генераторів плазми;
- визначення діапазону стійкої роботи слабкострумових генераторів плазми;

- експериментальні дослідження енергетичних параметрів плазмохімічних інтенсифікаторів при різних витратах плазмоутворюючого и розпилюючого повітря.

Методологія експериментальних досліджень включала розробку програми випробувань, вибір засобів і методів вимірювань, що забезпечують задану точність, проведення експерименту, обробку та аналіз отриманих даних.

Схема модернізованої експериментальної установки показана на рис. 2.2.

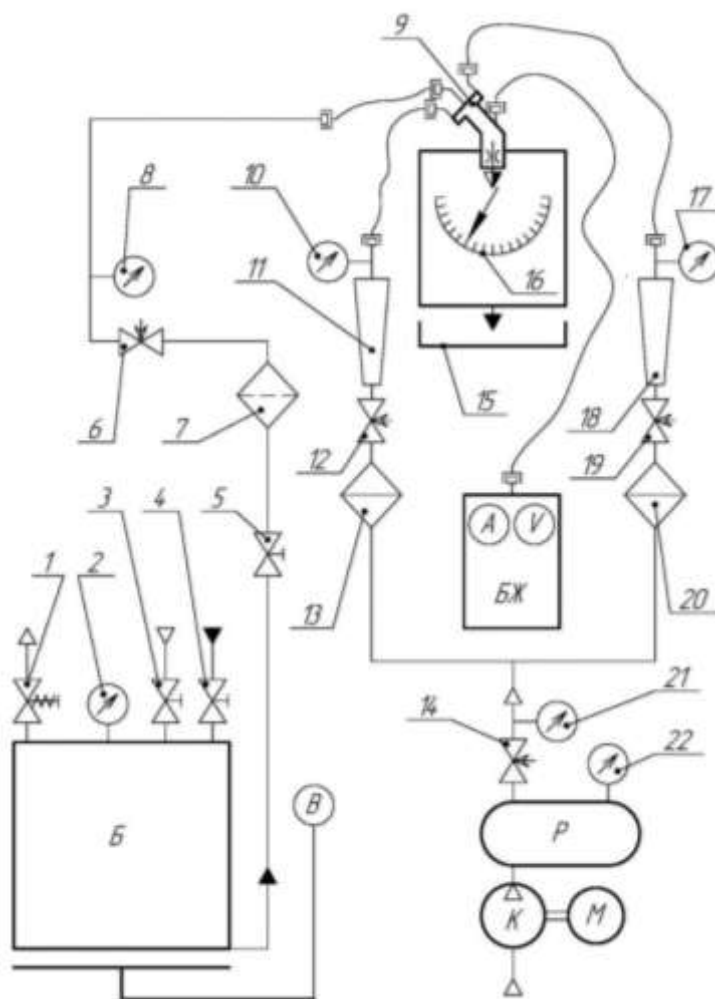


Рисунок 2.2 – Принципова схема експериментальної установки:

1 – клапан запобіжний скидний; 2, 8, 10, 17, 21, 22 – манометр; 3, 4, 5 – клапан запірний; 6, 12, 14, 19 – клапан регулюючий; 9 – плазмохімічний інтенсифікатор; 11, 18 – ротаметр; 13, 20 – фільтр повітряного типу «Циклон»; 15 – піддон; 16 – кутомір; Б – балон з водою та повітрям під тиском; В – ваги; БЖ – блок живлення плазмотрону; А – амперметр; V – вольтметр; Р – повітряний ресивер; К – повітряний поршневий компресор; М – електричний двигун

Плазмоутворююче повітря з компресора високого тиску К через ротаметр 11 подається до плазмохімічного інтенсифікатора 5, що являє собою слабкострумний різновид плазмово-паливної форсунки [5, 18]. Від інверторного регулюючого блока живлення БЖ (зі спеціальною падаючою зовнішньою характеристикою) через високовольтний кабель до плазмового генератора підводиться напруга (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Експериментальна установка для дослідження вольт-амперних і енергетичних характеристик генераторів повітряної плазми

Джерелом струму плазмотрона є блок живлення БЖ, який підключається до мережі змінного струму напругою 220 В. Сила струму електричної дуги плазмотрона регулюється у межах від 0 до 1 А за допомогою спеціального регулятора. При цьому вихідні значення напруги електричної дуги контролює вольтметр V. Робочою середою плазмотрону є повітря, яке під тиском подається з ресивера Р через регулюючий клапан 14 та повітряний фільтр типу «Циклон» 13.

Витрата плазмоутворюючого повітря регулюється за допомогою регулюючого клапана 12 та показань ротаметра 11. Тиск у каналі плазмоутворюючого повітря фіксує манометр 10.

Розпилююче повітря під тиском подається з ресивера Р через регулюючий клапан 14 та повітряний фільтр типу «Циклон» 20. Витрата розпилюючого повітря регулюється за допомогою регулюючого клапана 19 та показань ротаметра 18. Тиск у каналі розпилюючого повітря фіксує манометр 17.

Повітря у ресивер подає компресор К, який підтримує тиск у ресивері в автоматичному режимі у межах від 0,8 до 1,0 МПа. Приводом компресора є електричний двигун М, який підключається до мережі змінного струму напругою 220 В.

Рідина (вода, що імітує рідке паливо) з балону Б під тиском повітря подається через фільтр 7. Витрата води регулюється за допомогою регулюючого клапана 6 та манометра 8. Витрату води фіксують ваги В. Для миттєвого зупинення витоку води з балону служить запірний клапан 5.

При проведенні експериментальних досліджень вимірювання здійснювались прямими та опосередкованими методами.

Для оцінки точності результату знаходилось значення середнього квадратичного відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

де  $x_i$  та  $\bar{x}$  – відповідно результат  $i$ -го вимірювання та середнього арифметичного значення величини;

$n$  – кількість вимірювань.

Значення квадратичного відхилення середнього арифметичного значення  $\bar{x}$  визначалась таким чином

$$\bar{\sigma}(\bar{x}) = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} = \mp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Для оцінки випадкової похибки визначалась не тільки її величина, але і ймовірність з якою вона приймає ці значення, тобто довірча ймовірність та

довірча границя похибки вимірювання. Результати вимірювань, які мають надто великі похибки, виключались з обробки.

При допущенні нормального розподілу похибка опосередкованого вимірювання оцінювалась середнім квадратичним відхиленням

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_i^2},$$

де  $\frac{\partial y}{\partial x_i}$  – часткова похідна функції;  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  – середні квадратичні відхилення результатів вимірювань величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Наприклад, при визначенні потужності плазмового генератора  $Q = UI$  відносна випадкова похибка вимірювань складала:

$$\delta_Q = \pm \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2}.$$

Вимірювання струму дуги плазмохімічного інтенсифікатора здійснювалось універсальним приладом Щ4300, а напруги - вольтметром універсальним В7-20. Величини граничної відносної похибки вимірювання струму дуги  $\pm 0,3 \%$ , напруги  $\pm 0,75 \%$ . Витрата повітря визначалась ротаметрами типу RMC 20-200. Величина граничної відносної похибки вимірювання витрати повітря  $\pm 2,0 \%$ . Похибка вимірювань визначалась з урахуванням метрологічних характеристик засобів вимірювання. Для підвищення точності експерименту використовувались багатократні вимірювання.

## **Висновки по другому розділу**

1. Сформульовано основні задачі дисертаційної роботи, спрямованої на підвищення ефективності двопаливних камер згоряння ГТД за рахунок плазмового супроводу та показана можливість їх реалізації.

2. Основні методи та засоби, що використовуються в роботі і засновані на математичному і фізичному моделюванні процесів у двопаливних камерах згоряння, дозволять отримати достовірні наукові результати та відповідають напрямку досліджень.

3. Представлено узагальнену математичну модель хімічно реагуючих турбулентних потоків, яка містить підмоделі найбільш важливих фізичних і хімічних процесів: сумішоутворення реагентів, турбулентного переносу, горіння газоподібного палива, утворення оксидів азоту, що буде використана в подальшому визначенні параметрів двопаливної камери згорання ГТД при підведенні газоподібного пального.

4. Проведено модернізацію експериментальної установки для дослідження енергетичних характеристик слабкострумових генераторів повітряної плазми, наведено засобів і методів вимірювання параметрів при проведенні експерименту.

Результати досліджень поточного розділу опубліковано автором в [79,87,92]



## РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДВОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД З ПЛАЗМОВИМ СУПРОВОДОМ

### 3.1 Розробка моделі двофазного горіння рідкого палива в камері згоряння

Математична модель процесів горіння вуглеводневих палив, представлена в розділі 2, здатна прогнозувати параметри низькоемісійних паливоспалюючих пристроїв, що працюють на газоподібному паливі. Звичайно, що для розширення її можливостей при моделюванні двопаливних систем, цю модель потрібно доповнити відповідними рівняннями, що враховують двофазність потоків (вплив рідкої фази на газоподібну і навпаки), поведінку крапель рідкого палива, процеси їх випаровування, сумішоутворення і горіння в умовах радіаційного теплообміну.

Для подальшого аналізу процесів горіння рідкого дистильованого палива у двопаливній камері згоряння ГТД використовуємо такі допущення [54, 55, 60]:

1. Крапля палива розглядається сферичною.
2. Процес горіння краплі палива складається із трьох основних стадій: прогріву її до температури рівноважного випаровування; випаровування та горіння летючої складової палива.
3. Хімічні реакції в рідкій фазі незначно впливають на процеси в камері.
4. Склад рідкої та газоподібної фаз та температура поверхні краплі пов'язані умовою фазової рівноваги.
5. Температура краплі постійна повздовж її радіусу.
6. Випаровування близько до сферично-симетричного.
7. Горіння частки рівномірне по всій її поверхні.
8. Взаємодія між частинками дуже мала.

Для розрахунків вигорання рідкого палива в двопаливній камері згоряння ГТД обрано модель дискретної фази DPM (Discrete Phase Model), яка розраховує траєкторії руху окремих частинок в турбулентному потоці [54, 58–61].

Модель прогнозує траєкторії частинок рідкої фази шляхом інтегрування рівнянь їх руху, записаних у формі Лагранжа (наводиться тільки для напрямку  $x$ ) [59, 60]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x, \quad (3.1)$$

де  $F_x$  – додатковий член, що враховує прискорення газового потоку;

$F_D(u - u_p)$  – сила опору, яка припадає на одиницю маси частинки:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}.$$

У наведених вище виразах:

$u$  – швидкість газової фази;

$u_p$  – швидкість частинки;

$\mu$  – коефіцієнт молекулярної в'язкості газової фази;

$\rho$  – густина газової фази;

$\rho_p$  – густина частинки;

$d_p$  – поточний діаметр частинки;

$Re$  – відносне число Рейнольдса;

$C_D$  – коефіцієнт опору частинки.

Модель інертного нагріву використовується, коли температура краплі менша за температуру випаровування. Для розрахунку зміни температури часток за часом  $T_p(t)$  використовується рівняння теплового балансу, що враховує конвекційний та радіаційний перенос теплоти [55, 60]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4), \quad (3.2)$$

де  $m_p$  – маса частинки;

$c_p$  – питома теплоємність частинки при постійному тиску;

$A_p$  – площа поверхні частинки;

$T_\infty$  – локальна температура газової фази;

$h$  – коефіцієнт тепловіддачі;

$\varepsilon_p$  – коефіцієнт випромінювання частинки;

$\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана;

$\theta_R$  – радіаційна температура.

Коефіцієнт тепловіддачі  $h$  обчислюється з використанням кореляції Ранца и Маршала (Ranz, Marshall):

$$\text{Nu} = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 \text{Re}_d^{1/2} \text{Pr}^{1/3}, \quad (3.3)$$

де  $k_\infty$  – коефіцієнт теплопровідності газової фази;

$\text{Re}_d$  – число Рейнольдса, яке визначається діаметром краплі і її відносною швидкістю;

$\text{Pr}$  – число Прандтля для газової фази.

Радіаційна температура і падаюче випромінювання  $G$ :

$$\theta_R = (G/4\sigma)^{1/4}; \quad G = \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega \quad (3.4)$$

де  $I$  – інтенсивність випромінювання;

$\Omega$  – тілесний кут.

Наведені вище рівняння (3.1)-(3.4) інтегруються в часі з використанням наближеної лінійної форми, яка передбачає, що температура частинок змінюється досить повільно.

Модель випаровування ініціюється, коли температура частинки досягає температури випаровування  $T_{vap}$ , і використовується до тих пір, поки температура не перевищує значення точки кипіння  $T_{bp}$ , або поки летючі компоненти частинок повністю не витрачені (в разі горіння залишкових палив).

Рівняння теплообміну частинок з газовою фазою при їх випаровуванні враховує конвективний і радіаційний потоки теплоти, а також процес пароутворення [60]:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg}, \quad (3.5)$$

де  $h_{fg}$  – прихована теплота випаровування.

Маса частинки протягом випаровування зменшується у відповідність з балансовим рівнянням :

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t, \quad (3.6)$$

де  $M_{w,i}$  – молекулярна вага частинки  $i$ .

Ступінь випаровування визначається дифузійним потоком парів палива в газову фазу, пропорційним градієнту концентрацій парів на поверхні частинки і в газовому середовищі [60]:

$$N_i = k_c (C_{i,S} - C_{i,\infty}), \quad (3.7)$$

де  $N_i$  – молярний потік випаруваної речовини;

$k_c$  – коефіцієнт масообміну;

$C_{i,S}$  – концентрація пари на поверхні краплі;

$C_{i,\infty}$  – концентрація пари в газовому середовищі.

Коли температура частки досягає температури кипіння, то використовується наступне рівняння для швидкості зміни її діаметра [60]:

$$-\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{\rho_p h_{fg}} \left[ \frac{2k_\infty [1 + 0.23 \sqrt{\text{Re}_d}]}{d_p} (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \right]. \quad (3.8)$$

Для спрощення передбачається, що при кипінні температура краплі не змінюється. Енергія, необхідна для випаровування, враховується у вигляді джерельного члена в рівнянні збереження енергії газової фази. Випаровування рідини також є джерелом хімічного компонента  $i$  для газової фази.

У цьому дослідженні для моделювання радіаційного теплообміну обрано модель випромінювання (DO) дискретних ординат. Модель DO [60, 72] розглядає рівняння радіаційного переносу як рівняння поля і розв'язує його для дев'яти дискретних тілесних кутів, кожен з яких пов'язаний з векторним напрямком  $\vec{s}$ , фіксованим у глобальній декартовій системі  $(x, y, z)$ .

Рівняння переносу випромінювання для середовищ, що поглинають, випромінюють та розсіюють, в положенні  $\vec{r}$  в напрямку  $\vec{s}$  представлено у вигляді рівняння поля [62]:

$$\frac{\partial I(\vec{r}\vec{s})}{\partial s} + (a + \sigma_s)(I\vec{r}\vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{4\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} (I(\vec{r}\vec{s}')\Phi(\vec{s}\cdot\vec{s}')) d\Omega', \quad (3.9)$$

де  $\vec{r}$  – вектор положення;

$\vec{s}$  – вектор напрямку;

$s'$  – вектор напрямку розсіювання;

$s$  – довжина шляху;

$a$  – коефіцієнт поглинання;

$n$  – показник заломлення;

$\sigma_s$  – коефіцієнт розсіювання;

$\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана;

$I$  – інтенсивність випромінювання, яка залежить від положення  $\vec{r}$  та напрямку  $\vec{s}$ ;

$T$  – локальна температура;

$\Phi$  – функція розсіювання;

$\Omega$  – тілесний кут.

Рівняння моделі дискретних ординат

$$\nabla \cdot (I\vec{r}\vec{s})\vec{s} + (a + \sigma_s)(I\vec{r}\vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{4\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} (I(\vec{r} \cdot \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')) d\Omega', \quad (3.10)$$

де  $(I\vec{r}\vec{s})$  – загальна інтенсивність.

Рівняння (3.1)-(3.10) дозволяють знайти відповідні джерельні члени, які необхідно додати до рівнянь нерозривності, збереження кількості руху, енергії та хімічних компонентів газоподібної фази. Ці параметри обчислюються підсумовуванням членів, що характеризують зміну маси, імпульсу та енергії для всіх крапель у спектрі розпилювання.

Для рідких палив, що розпилюються допомогою форсунок, зручно представити розподіл крапель за розмірами за допомогою залежності Розіна-Раммлера

$$M_D = \exp(-bD^n),$$

де  $M_D$  - масова частка крапель з розміром, більшим ніж  $D$ ;

$b, n$  - константи, що характеризують рівномірність розпилювання.

Нехай характеристика полідисперсності  $y = D_{p0i} / D_{p01}$  і  $m = bD_{p01}^n$  (індекс 1 відноситься до частки максимального розміру). Тоді

$$M_D = \exp(-my^n)$$

Для визначення діаметра краплі найбільшого розміру  $D_{p1}$  використовувалися залежності [5] відносної величини середнього діаметра краплі по Заутеру від геометричних розмірів форсунок, параметрів впорскування та фізичних властивостей палива, що розпилюється:

- для форсунок механічного розпилювання

$$\frac{D_{ps}}{d_c} = 2,35 \left( \frac{\mu_f^2}{\rho_f \sigma_f d_c} \right)^{-0,18} \left( \frac{v_f d_c}{v_f} \right)^{-0,473};$$

- для форсунок повітряно-механічного розпилювання

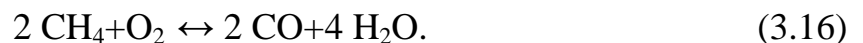
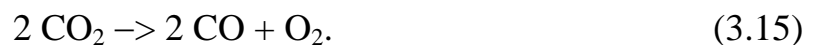
$$\frac{D_{ps}}{d_c} = 1,21 \left( \frac{\mu_f^2}{\rho_f \sigma_f d_c} \right)^{-0,0186} \left[ \frac{\rho_{air} (v_{air} - v_f)^2 d_c}{\sigma_f} \right]^{-0,334},$$

де  $d_c$  - діаметр сопла форсунки.

Між  $D_{ps}$  і  $D_{p1}$  задається залежність  $D_{p1} = (1,9-2,6) D_{ps}$ .

Для моделювання процесів окиснення вуглеводнів в двопаливній камері згоряння ГТД запропоновано використовувати шестиступінчасту модель горіння, що моделює процеси окиснення легкого дистилатного палива ( $C_{16}H_{29}$ ) з додаванням реакцій окиснення метану  $CH_4$ . Цей кінетичний механізм є об'єднанням механізму горіння дистилатного палива, використаного в роботах [63, 64] з метою моделювання процесів горіння рідкого палива в дифузійній камері згоряння ГТД, з механізмом окиснення метану.

Кінетичний механізм горіння виглядає наступним чином:



Коефіцієнти швидкостей реакцій представлено в табл. 3.1.

Рівняння (3.1)-(3.16) являють собою замкнуту систему, яка за відповідних початкових умов та відомих характеристик газоподібної фази визначає зміну в часі транспортних властивостей крапель рідкого палива.

Утворення/розкладання оксидів азоту в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД прогнозується за допомогою рівнянь, наведених в розділі 3 з урахуванням рекомендацій робіт [65-71].

Таблиця 3.1 – Константи швидкості реакцій запропонованого механізму окиснення в двопаливній камері згоряння

Реакція	$A$	$E$ , Дж/моль	$\beta$	Порядок реакції			
$2 C_{16}H_{29} + 16 O_2 \rightarrow 32 CO + 29 H_2$	1,1206e+19	1,2238e+08	2,541	$C_{16}H_{29}$	2,066	$O_2$	1,953
$2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$	9,1048e+14	2,7007e+08	0,467	$H_2$	0,57	$O_2$	1,178
$2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$	6,2327e+14	8,4199e+07	-0,309	$CO$	1,736	$O_2$	1,804
$2 H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$ ;	6,5724e+19	3,6931e+08	-0,068	$H_2O$	2,868		
$2 CO_2 \rightarrow 2 CO + O_2$	6,7299e+11	3,5065e+08	-0,255	$CO_2$	1,871		
$2CH_4+O_2\leftrightarrow 2CO+4H_2O$	9,9126e+14	2,9825e+08	2,618	$CH_4$	1,109	$O_2$	1,572

### 3.2 Модель плазмової активації горіння палив

Горіння – процес окиснення палива, який супроводжується виділенням значної кількості теплоти. Реакції хімічного реагування супроводжуються низкою фізичних явищ – випаровуванням, перемішуванням компонентів, підведенням і відведенням теплоти. Таким чином, горіння в КЗ ГТД є складним комплексом взаємозалежних фізико–хімічних процесів, спрямованих на отримання газу з високою температурою [72-73].

Особливістю процесів турбулентного горіння в жарових трубах камер згоряння ГТД є їх просторовий характер з великою ступню закрутки. Отже, для якісного моделювання процесів горіння в таких пристроях існує необхідність використання адекватних хімічних механізмів окиснення пального при визначенні аеродинамічної структури течії, особливо при використанні плазмохімічних інтенсифікаторів.

Кінетика хімічних процесів визначає швидкості реакцій окиснення і їх залежність від температури, тиску, концентрації і ряду інших чинників. У будь–якій реакції беруть участь кілька речовин, причому концентрації вихідних компонентів зменшуються, а продуктів реакції – зростають.



З огляду на це, швидкість хімічної реакції можна визначити або через швидкість утворення кінцевих продуктів:

$$\frac{dZ_A}{dt(dZ_M/dt)}$$

або через швидкість витрачання однієї з вихідних речовин:

$$\frac{dZ_A}{dt(-dZ_B/dt)}$$

Надалі швидкість хімічної реакції будемо визначати величиною  $v = \frac{dZ_M}{dt}$ .

На основі закону діючих мас швидкості реакцій запишуться в такий спосіб [72, 74-75]:

– для мономолекулярної реакції  $\frac{dZ_M}{dt} = kZ_a$ ;

– для бімолекулярної реакції  $\frac{dZ_M}{dt} = kZ_aZ_b$ ;

– для тримолекулярної реакції  $\frac{dZ_M}{dt} = kZ_aZ_bZ_c$ ,

де  $k$  – відповідна константа швидкості хімічної реакції.

Розглянемо випадок хімічного реагування в ізотермічних умовах. Для отримання залежності  $v = f(t)$  в кінетичне рівняння вводиться концентрація одного з компонентів, а інші визначаються через їх початкові значення і значення концентрації обраної змінної. Для мономолекулярної реакції

$$\frac{dZ_M}{dt} = kZ_a = k(Z_A^0 - Z_M),$$

де  $Z_A^0$  – початкова концентрація молекул речовини  $A$ .

Поділяючи змінні в цьому виразі і інтегруючи, отримаємо

$$\ln(Z_A^0 - Z_M) = -kt + \ln C.$$

При  $t = 0$ ;  $Z_M = 0$ ;  $\ln C = Z_A^0$ , тоді:

$$\ln \frac{(Z_A^0 - Z_M)}{Z_A^0} = -kt \text{ і } Z_M = Z_A^0(1 - e^{-kt}).$$

Вихід продуктів реакції з часом сповільнюється та зменшується зі збільшенням порядку реакції.

Акти хімічного перетворення відбуваються при зіткненнях молекул, при цьому їх кінетична енергія переходить в потенційну і витрачається на руйнування

зв'язків в молекулах. Однак руйнування зв'язків відбуватиметься тільки тоді, коли величина потенційної енергії перевищить певну межу – енергію активації  $E$ .

Потрібно відзначити, що не всі зіткнення, при яких енергія перевищує енергію активації, приводять до хімічної реакції. Для цього необхідно ще й відповідна орієнтація молекул між собою. Таким чином, активація передбачає переведення середньої в енергетичному відношенні молекули в активну. Чим менше величина  $E$ , тим вище швидкість реакції [72, 73].

Для константи швидкості хімічної реакції отримано співвідношення:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E}{RT^2},$$

виходячи з чого  $\ln k = -\frac{E}{RT} + \text{const}$ , тоді

$$k = k_0 e^{\frac{-E}{RT}} \quad \text{та} \quad \nu = k_0 e^{\frac{-E}{RT}} Z_A^a Z_B^b,$$

де  $k_0$  – передекспоненційний множник, що визначає загальне число зіткнень молекул (в першому наближенні константа, яка не залежить від температури).

Ця формула виражає закон Ареніуса для залежності швидкості хімічної реакції від температури. Видно, що швидкість реакції змінюється зі зміною температури за експонентою. При певній температурі швидкості хімічних реакцій можуть стати настільки низькими, що процес в камері згоряння завершиться не в повному обсязі, і виникне втрата від хімічного недопалу. Тому встановлюють нижній температурний рівень в зоні горіння (близько 1200-1400 К), при якому реакції встигають закінчитися.

Існує залежність між швидкістю хімічної реакції і тиском. При постійній температурі і заданому складі суміші зв'язок між парціальними тисками  $p_A, p_B, \dots, p_M, \dots$  і молярними концентраціями визначає рівняння стану

$$p_A = Z_A RT; p_B = Z_B RT; \dots; p_M = Z_M RT.$$

Позначимо відносні об'ємні концентрації речовин через

$$\bar{Z}_A = \frac{Z_A}{Z}; \bar{Z}_B = \frac{Z_B}{Z}; \dots; \bar{Z}_M = \frac{Z_M}{Z},$$

де  $Z$  – загальне число молей в одиниці об'єму.

$$\text{Тоді } p_A = \bar{Z}_A p; p_B = \bar{Z}_B p, \dots; p_M = \bar{Z}_M p,$$

де  $p$  – загальний тиск в газовій системі.

Використовуючи отримані співвідношення для визначення швидкостей хімічних реакцій, отримаємо:

– для мономолекулярної реакції

$$\frac{dZ_M}{dt} = kZ_A = k \frac{p_A}{RT} = k\bar{Z}_A \frac{p_A}{RT};$$

– для бімолекулярної реакції

$$\frac{dZ_M}{dt} = kZ_A Z_B = k \frac{p_A}{RT} \frac{p_B}{RT} = k \frac{\bar{Z}_A \bar{Z}_B}{(RT)^2} p^2;$$

– для тримолекулярної реакції

$$\frac{dZ_M}{dt} = kZ_A Z_B Z_C = k \frac{p_A}{RT} \frac{p_B}{RT} \frac{p_C}{RT} = k \frac{\bar{Z}_A \bar{Z}_B \bar{Z}_C}{(RT)^3} p^3,$$

тобто в загальному випадку для реакції  $i$ -го порядку

$$\frac{dZ_M}{dt} \sim p^i.$$

Для складних реакцій представлені залежності не завжди прийнятні: їх швидкість виявляється вище розрахункової. Особливістю складних реакцій, що називаються ланцюговими, є те, що вони проходять через ряд перетворень, у процесі яких утворюються проміжні речовини у вигляді різних частинок – осколків атомів, радикалів, проміжних з'єднань та ін. Ці речовини інтенсифікують течію реакцій і тому їх називають активними центрами. Відмітимо, що одним із факторів плазмохімічного впливу на процеси окиснення вуглеводнів як раз ї є утворення великої кількості проміжних і нестабільних з'єднань в процесі плазмової активації.

Окиснення горючих компонентів відносять до розгалужених ланцюгових реакцій, при яких активний центр вступає в реакцію та генерує принаймні два нових активних центри. Розгалужені ланцюгові реакції характеризуються декількома типами проміжних реакцій: реакції зародження ланцюга, що приводять до утворення активних центрів; реакції продовження ланцюга, коли активні центри зберігають кількість в ході реакції; реакції розгалуження ланцюга, коли замість одного центру утворюється кілька нових; реакції обриву ланцюга,

пов'язані зі зникненням активних центрів: рекомбінацією їх як в об'ємі, так і на стінках камери.

Якщо швидкість обриву ланцюга більше швидкості розвитку реакції, то режим стає стаціонарним. При швидкості розгалуження ланцюга більше швидкості обриву реакція йде з саморозгінном і стає реакцією вибухового типу. Саморозгін реакції починається не відразу, а через деякий час, необхідний для накопичення достатньої кількості активних центрів (час затримки або індукційним періодом реакції). Спочатку швидкість реакції низька (індукційний період), потім швидкість різко зростає і далі, в зв'язку з витратою основної маси реагентів, починає падати.

Горіння в камері згоряння також має ланцюговий характер, але в зв'язку зі складним складом вуглеводневого палива побудувати повний механізм реакцій рідкого палива з окиснювачем достатньо складно. Виходячи із загальних положень теорії ланцюгових реакцій, можна тільки якісно оцінювати роль активних центрів в ході реакції горіння вуглеводнів.

Кінетика хімічних процесів визначає швидкості реакцій окиснення і їх залежність від температури, тиску, концентрації і ряду інших факторів [72, 76]. Акти хімічного перетворення відбуваються при зіткненнях молекул, при цьому їх кінетична енергія переходить в потенційну і витрачається на руйнування зв'язків в молекулах. Однак руйнування зв'язків відбуватиметься тільки тоді, коли величина потенційної енергії перевищить деяку межу – енергію активації  $E$  [58, 72]. Таким чином, активація передбачає переведення середньої в енергетичному відношенні молекули в активну. Величина енергії активації  $E$  є результуючою енергією одноступінчастої бімолекулярної реакції між паливом і окиснювачем, що протікає за схемою:  $i$  кг окиснювача + 1 кг палива  $\rightarrow$   $(1 + i)$  кг продуктів реакції ( $i$  – стехіометричне співвідношення) [58].

В табл. 3.1 представлено елементарні реакції окиснення вуглеводнів, запропоновані в роботі [5]. Видно, що в процесах окиснення вуглеводнів велику роль відіграють радикали Н, О, ОН, НО<sub>2</sub>, СН<sub>3</sub>, СН<sub>2</sub>, які формуються при плазмохімічному впливі при активації вуглеводнів [4, 5, 30].

Таблиця 3.2 – Елементарні реакції окиснення вуглеводнів

Елементарні реакції	
1. $\text{CH}_3+\text{CH}_3(+\text{M})=\text{C}_2\text{H}_6(+\text{M})$	41. $\text{C}+\text{CH}_3=\text{C}_2\text{H}_2+\text{H}$
2. $\text{CH}_3+\text{H}(+\text{M})=\text{CH}_4(+\text{M})$	42. $\text{C}+\text{CH}_2=\text{C}_2\text{H}+\text{H}$
3. $\text{CH}_4+\text{O}_2=\text{CH}_3+\text{HO}_2$	43. $\text{CH}_2+\text{CO}_2=\text{CH}_2\text{O}+\text{CO}$
4. $\text{CH}_4+\text{H}=\text{CH}_3+\text{H}_2$	44. $\text{CH}_2+\text{O}=\text{CO}+\text{H}_2$
5. $\text{CH}_4+\text{O}=\text{CH}_3+\text{OH}$	45. $\text{CH}_2+\text{O}=\text{CO}+\text{H}_2$
6. $\text{CH}_4+\text{OH}=\text{CH}_3+\text{H}_2\text{O}$	46. $\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}_2+2\text{H}$
7. $\text{CH}_4+\text{HO}_2=\text{CH}_3+\text{H}_2\text{O}_2$	47. $\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CH}_2\text{O}+\text{O}$
8. $\text{CH}_3+\text{HO}_2=\text{CH}_3\text{O}+\text{OH}$	48. $\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}_2+\text{H}_2$
9. $\text{CH}_3+\text{O}_2=\text{CH}_3\text{O}+\text{O}$	49. $\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}+\text{H}_2\text{O}$
10. $\text{CH}_3+\text{O}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$	50. $\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}+\text{OH}+\text{H}$
11. $\text{CH}_2\text{OH}+\text{H}=\text{CH}_3+\text{OH}$	51. $\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{HCO}+\text{OH}$
12. $\text{CH}_3\text{O}+\text{H}=\text{CH}_3+\text{OH}$	52. $\text{CH}_2\text{O}+\text{OH}=\text{HCO}+\text{H}_2\text{O}$
13. $\text{CH}_3+\text{OH}=\text{CH}_2+\text{H}_2\text{O}$	53. $\text{CH}_2\text{O}+\text{H}=\text{HCO}+\text{H}_2$
14. $\text{CH}_3+\text{H}=\text{CH}_2+\text{H}_2$	54. $\text{CH}_2\text{O}+\text{M}=\text{HCO}+\text{H}+\text{M}$
15. $\text{CH}_3\text{O}(+\text{M})=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}(+\text{M})$	55. $\text{CH}_2\text{O}+\text{O}=\text{HCO}+\text{OH}$
16. $\text{CH}_2\text{OH}+\text{M}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}+\text{M}$	56. $\text{HCO}+\text{OH}=\text{H}_2\text{O}+\text{CO}$
17. $\text{CH}_3\text{O}+\text{H}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2$	57. $\text{HCO}+\text{M}=\text{H}+\text{CO}+\text{M}$
18. $\text{CH}_2\text{OH}+\text{H}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2$	58. $\text{HCO}+\text{H}=\text{CO}+\text{H}_2$
19. $\text{CH}_3\text{O}+\text{OH}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2\text{O}$	59. $\text{HCO}+\text{O}=\text{CO}+\text{OH}$
20. $\text{CH}_2\text{OH}+\text{OH}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2\text{O}$	60. $\text{HCO}+\text{O}=\text{CO}_2+\text{H}$
21. $\text{CH}_3\text{O}+\text{O}=\text{CH}_2\text{O}+\text{OH}$	61. $\text{HCO}+\text{O}_2=\text{HO}_2+\text{CO}$
22. $\text{CH}_2\text{OH}+\text{O}=\text{CH}_2\text{O}+\text{OH}$	62. $\text{CO}+\text{O}+\text{M}=\text{CO}_2+\text{M}$
23. $\text{CH}_3\text{O}+\text{O}_2=\text{CH}_2\text{O}+\text{HO}_2$	63. $\text{CO}+\text{OH}(+\text{M})=\text{CO}_2+\text{H}(+\text{M})$
24. $\text{CH}_2\text{OH}+\text{O}_2=\text{CH}_2\text{O}+\text{HO}_2$	64. $\text{HOCO}(+\text{M})=\text{CO}_2+\text{H}(+\text{M})$
25. $\text{CH}_2+\text{H}=\text{CH}+\text{H}_2$	65. $\text{HOCO}(+\text{M})=\text{CO}+\text{OH}(+\text{M})$
26. $\text{CH}_2+\text{OH}=\text{CH}+\text{H}_2\text{O}$	66. $\text{CO}+\text{O}_2=\text{CO}_2+\text{O}$
27. $\text{CH}_2+\text{OH}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$	67. $\text{HO}_2+\text{CO}=\text{CO}_2+\text{OH}$
28. $\text{CH}+\text{O}_2=\text{HCO}+\text{O}$	68. $\text{C}_2\text{H}_6+\text{CH}_3=\text{C}_2\text{H}_5+\text{CH}_4$
29. $\text{CH}+\text{O}=\text{CO}+\text{H}$	69. $\text{C}_2\text{H}_6+\text{H}=\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}_2$
30. $\text{CH}+\text{OH}=\text{HCO}+\text{H}$	70. $\text{C}_2\text{H}_6+\text{O}=\text{C}_2\text{H}_5+\text{OH}$
31. $\text{CH}+\text{CO}_2=\text{HCO}+\text{CO}$	71. $\text{C}_2\text{H}_6+\text{OH}=\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}_2\text{O}$
32. $\text{CH}+\text{H}=\text{C}+\text{H}_2$	72. $\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}=\text{C}_2\text{H}_3+\text{H}_2$
33. $\text{CH}+\text{H}_2\text{O}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$	73. $\text{C}_2\text{H}_4+\text{O}=\text{CH}_3+\text{HCO}$
34. $\text{CH}+\text{CH}_2\text{O}=\text{CH}_2\text{CO}+\text{H}$	74. $\text{C}_2\text{H}_4+\text{OH}=\text{C}_2\text{H}_3+\text{H}_2\text{O}$
35. $\text{CH}+\text{C}_2\text{H}_2=\text{C}_3\text{H}_2+\text{H}$	75. $\text{CH}_2+\text{CH}_3=\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}$
36. $\text{CH}+\text{CH}_2=\text{C}_2\text{H}_2+\text{H}$	76. $\text{H}+\text{C}_2\text{H}_4(+\text{M})=\text{C}_2\text{H}_5(+\text{M})$
37. $\text{CH}+\text{CH}_3=\text{C}_2\text{H}_3+\text{H}$	77. $\text{C}_2\text{H}_5+\text{H}=\text{CH}_3+\text{CH}_3$
38. $\text{CH}+\text{CH}_4=\text{C}_2\text{H}_4+\text{H}$	78. $\text{C}_2\text{H}_5+\text{O}_2=\text{C}_2\text{H}_4+\text{HO}_2$
39. $\text{C}+\text{O}_2=\text{CO}+\text{O}$	79. $\text{C}_2\text{H}_2+\text{O}=\text{CH}_2+\text{CO}$
40. $\text{C}+\text{OH}=\text{CO}+\text{H}$	80. $\text{C}_2\text{H}_2+\text{O}=\text{HCCO}+\text{H}$

Елементарні реакції	
81. $H_2 + C_2H = C_2H_2 + H$	121. $C_3H_2 + O_2 = HCO + HCCO$
82. $H + C_2H_2(+M) = C_2H_3(+M)$	122. $H_2CCCH + O_2 = CH_2CO + HCO$
83. $C_2H_3 + H = C_2H_2 + H_2$	123. $H_2CCCH + O = CH_2O + C_2H$
84. $C_2H_3 + O = CH_2CO + H$	124. $H_2CCCH + OH = C_3H_2 + H_2O$
85. $C_2H_3 + O_2 = CH_2O + HCO$	125. $2C_2H_2 = HCCHCCH + H$
86. $C_2H_3 + OH = C_2H_2 + H_2O$	126. $HCCHCCH + M = C_4H_2 + H + M$
87. $C_2H_3 + CH_2 = C_2H_2 + CH_3$	127. $CH_2SING + C_2H_2 = H_2CCCH + H$
88. $C_2H_3 + C_2H = 2C_2H_2$	128. $C_4H_2 + O = C_3H_2 + CO$
89. $C_2H_3 + CH = CH_2 + C_2H_2$	129. $C_2H_2 + O_2 = HCCO + OH$
90. $OH + C_2H_2 = C_2H + H_2O$	130. $C_2H_2 + M = C_2H + H + M$
91. $OH + C_2H_2 = HCCOH + H$	131. $C_2H_4 + M = C_2H_2 + H_2 + M$
92. $OH + C_2H_2 = CH_2CO + H$	132. $C_2H_4 + M = C_2H_3 + H + M$
93. $OH + C_2H_2 = CH_3 + CO$	133. $H_2 + O_2 = 2OH$
94. $HCCOH + H = CH_2CO + H$	134. $OH + H_2 = H_2O + H$
95. $C_2H_2 + O = C_2H + OH$	135. $O + OH = O_2 + H$
96. $CH_2CO + O = CO_2 + CH_2$	136. $O + OH + M = HO_2 + M$
97. $CH_2CO + H = CH_3 + CO$	137. $O + H_2 = OH + H$
98. $CH_2CO + H = HCCO + H_2$	138. $H + O_2 + M = HO_2 + M$
99. $CH_2CO + O = HCCO + OH$	139. $OH + HO_2 = H_2O + O_2$
100. $CH_2CO + OH = HCCO + H_2O$	140. $H + HO_2 = 2OH$
101. $CH_2CO(+M) = CH_2 + CO(+M)$	141. $O + HO_2 = O_2 + OH$
102. $C_2H + O_2 = 2CO + H$	142. $2OH = O + H_2O$
103. $C_2H + C_2H_2 = C_4H_2 + H$	143. $H + H + M = H_2 + M$
104. $H + HCCO = CH_2SING + CO$	144. $H + H + H_2 = 2H_2$
105. $O + HCCO = H + 2CO$	145. $H + H + H_2O = H_2 + H_2O$
106. $HCCO + O_2 = 2CO + OH$	146. $2H + CO_2 = H_2 + CO_2$
107. $CH + HCCO = C_2H_2 + CO$	147. $H + OH + M = H_2O + M$
108. $2HCCO = C_2H_2 + 2CO$	148. $H + O + M = OH + M$
109. $CH_2SING + M = CH_2 + M$	149. $O + O + M = O_2 + M$
110. $CH_2SING + CH_4 = 2CH_3$	150. $H + HO_2 = H_2 + O_2$
111. $CH_2SING + C_2H_6 = CH_3 + C_2H_5$	151. $2HO_2 = H_2O_2 + O_2$
112. $CH_2SING + O_2 = CO + OH + H$	152. $H_2O_2 + M = 2OH + M$
113. $CH_2SING + H_2 = CH_3 + H$	153. $H_2O_2 + H = HO_2 + H_2$
114. $CH_2SING + H = CH_2 + H$	154. $H_2O_2 + OH = H_2O + HO_2$
115. $C_2H + O = CH + CO$	
116. $C_2H + OH = HCCO + H$	
117. $2CH_2 = C_2H_2 + H_2$	
118. $CH_2 + HCCO = C_2H_3 + CO$	
119. $CH_2 + C_2H_2 = H_2CCCH + H$	
120. $C_4H_2 + OH = C_3H_2 + HCO$	

Відмітимо, що повний механізм окиснення вуглеводнів практично неможливо в даний час використати при проведенні тривимірних розрахунків

камер згоряння через великі обчислювальні ресурси навіть при паралельних комп'ютерних системах. Тому, частіше за все, використовують спрощені (глобальні) кінетичні механізми окислення вуглеводнів. Такий підхід використано і у даному дисертаційному дослідженні.

Добавка плазмохімічних продуктів в первинну зону двопаливної камери згоряння ГТД приводить до зниження енергії активації глобальних реакцій окиснення вуглеводнів (3.11) та (3.16) внаслідок високої хімічної активності атомів, радикалів і продуктів термічного розкладання вуглеводнів. В результаті цього відбувається зміна розподілу параметрів потоку всередині паливоспалюючого пристрою [5, 40, 41].

Після обробки експериментальних і теоретичних даних, приведених в роботі [5], побудована залежність, яка відображає вплив кількості плазмохімічних продуктів (за об'ємом) на зменшення енергії активації  $\Delta E$  результуючої реакції між паливом і окиснювачем (рис. 3.1). Ця залежність і пропонується для використання при проведенні розрахунків з урахуванням плазмової активації.

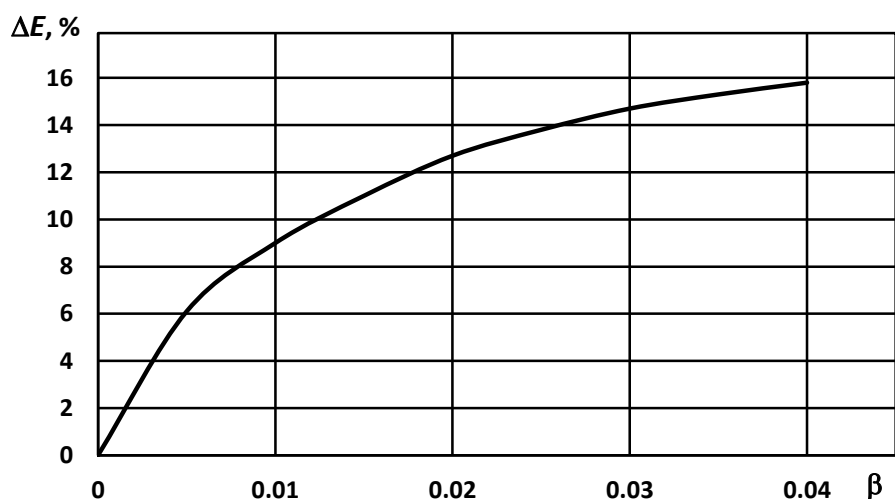


Рисунок 3.1 – Залежність зменшення енергії активації реакції окиснення вуглеводнів від кількості продуктів плазмохімічних реакцій  $\beta$  (за об'ємом)

Апроксимація цієї графічної залежності дозволила отримати наступну формулу для зменшення енергії активації  $\Delta E$  глобальної реакції окислення

вуглеводнів в залежності від кількості добавок  $\beta$  (за об'ємом) плазмохімічних продуктів

$$\Delta E = 3,87 \cdot 10^5 \beta^3 - 3,51 \cdot 10^4 \beta^2 + 1,17 \cdot 10^3 \beta + 0,363$$

з достовірністю апроксимації  $R^2 = 0,996$ .

Передбачається встановлення плазмохімічного інтенсифікатора у фронтівому пристрої двопаливної камери згоряння ГТД з попередніми перемішуванням палива з повітрям з метою підвищення ефективності спалювання вуглеводневих палив, різних за фазовим станом. Плазмовий факел прискорює реакції окиснення пального (рідкого та газоподібного) за рахунок швидкого виникнення активних центрів – заряджених молекул, атомів, радикалів, іонів, внаслідок чого знижується енергія активації основної паливно-повітряної суміші [5].

### 3.3 Верифікація математичної моделі

Для перевірки прогнозних можливостей розробленої тривимірної математичної моделі двопаливної камери згоряння ГТД проведено співставлення результатів числового моделювання з результатами експериментальних досліджень двох різних типів камер згоряння, отриманих в роботах [5, 13].

На першому етапі розраховано розподіли температури та об'ємних концентрацій оксидів азоту на виході низькоемісійної камери згоряння ГТД, що працює на газоподібному паливі, а на другому - розподіли температури на виході камери згоряння дифузійного типу, що працює на дистильованому рідкому паливі, та виконано порівняння розрахованих значень з експериментальними.

Для співставлення на першому етапі взято експериментальні вимірювання температурного поля в 25 точках вихідної секції однопальникового відсіку камери згоряння ГТД UGT25000 виробництва ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” для семи режимів роботи в стендових умовах [13] (табл. 3.3). Режими роботи відрізнялися параметрами повітря і палива на вході, розподілом витрат газоподібного палива між каналами завихрювача. Завдяки особливостям використаного



випробувального стенду, робочий тиск у відсіку не перевищував 0,15 МПа на всіх режимах роботи.

Таблиця 3.3 – Режими та параметри стендового експерименту

№ режиму	Витрата повітря через відсік, кг/с	Температура повітря на вході в камеру згоряння, К	Витрата палива, кг/год	Температура палива, К
1	0,395	389	4,8	286
2	0,313	624	18,8	287,2
3	0,318	626	22,6	287,5
4	0,315	628	25,6	287,6
5	0,315	627	25	287,5
6	0,316	605	20,9	287,5
7	0,327	667	27,9	288

На рис. 3.2 показано порівняння вимірної та обчисленою температурою продуктів згоряння на виході низькоемісійної камери згоряння [77-79], що дозволяє зробити висновок про можливість достовірного прогнозування температурного поля в камері для широкого діапазону режимів її роботи.

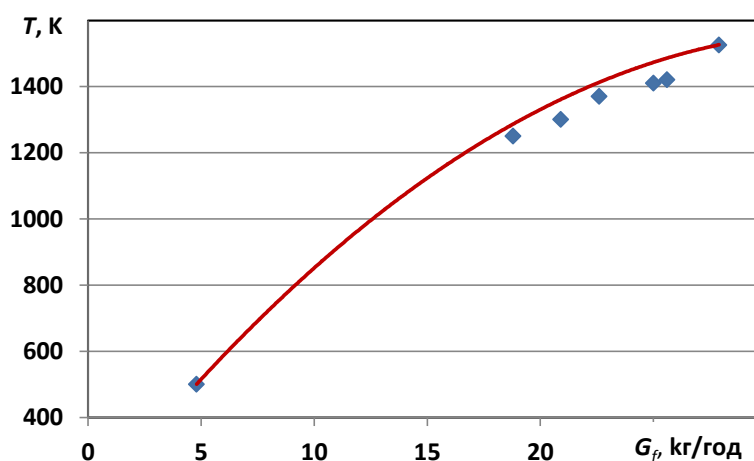


Рисунок 3.2 – Розподіл середньомасової температури на виході з камери згоряння в залежності від витрати палива:

◆ – експеримент; — — — — — розрахунок

Виміряні та розраховані значення викидів оксидів азоту для семи режимів випробувань представлені на рис. 3.3. Задовільна кореляція даних свідчить про адекватність математичної моделі утворення/розпаду оксидів азоту реальним фізико-хімічним процесам.



Рисунок 3.3 – Розподіл об’ємних концентрацій оксидів азоту на виході з камери згоряння в залежності від витрати палива:

◆ – експеримент; — — — — розрахунок

На другому етапі проведено співставлення розрахованих за допомогою числового методу температур газу на виході експериментального пального відсіку довжиною 685 мм і діаметром 186 мм з фронтним пристроєм камери згоряння суднового ГТД з експериментальними даними роботи [5]. Відмітимо, що при проведенні експериментальних досліджень у вихідному перерізі камери згоряння значення температур контролювалися в 20 точках п’ятьма термопарами, розташованими на знімному координаторі, що обертався і встановлювався на корпусі відсіку.

На рис. 3.4 представлено залежності усередненої температури газів на виході експериментального відсіку від коефіцієнту надлишку повітря в камері згоряння  $\alpha$ , який визначався витратами рідкого палива і повітря. Можемо бачити добру кореляцію експериментальних і розрахункових даних. Максимальне відхилення експериментальних значень від розрахункової кривої

становить 1,5 %.

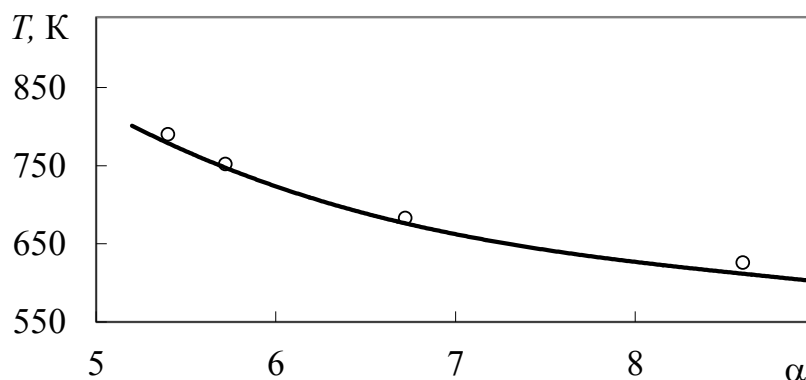


Рисунок 3.4 – Середня температура газу в вихідному перерізі експериментального відсіку камери згоряння:

○ , – експеримент; — — розрахунок

Зауважимо, що дослідження аеродинамічної структури потоку в низькоемісійній камері згоряння ГТД в ізотермічних і неізотермічних умовах при спалюванні газоподібного і рідкого палив підтверджує надійність запропонованої математичної моделі [80-82], її адекватність фізичним процесам, якісне та кількісне узгодження експериментальних і розрахункових даних, що дає змогу використовувати її й для прогнозування параметрів двопаливної камери згоряння.

### Висновки по третьому розділу

1. Розроблено математичну модель двофазного горіння рідкого палива в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД, яка містить у собі систему диференціальних рівнянь: нерозривності, збереження кількості руху та енергії, переносу хімічних компонентів з урахуванням дисипації вихорів, утворення і розкладання оксидів азоту, переносу характеристик турбулентності, променистого теплообміну у взаємодії з рівняннями моделі дискретної фази, які дозволяють обчислити траєкторії руху окремих крапель, їх інертний нагрів,

випаровування рідкого палива з урахуванням теплообміну частинок з газовою фазою, а також окиснення парів вуглеводнів.

2. Для аналізу процесів горіння рідких і газоподібних палив в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД запропоновано використовувати шестиступінчасту кінетичну схему окиснення вуглеводнів, яка моделює процеси окиснення легкого дистильного палива  $C_{16}H_{29}$  з додаванням реакцій окиснення метану  $CH_4$ .

3. Удосконалено підхід до моделювання плазмової активації горіння рідких та газоподібних палив в двопаливних камерах згоряння ГТД, заснований на урахуванні впливу кількості добавок плазмохімічних продуктів на зменшення енергії активації результуючої реакції між паливом і окиснювачем.

4. Вдосконалено модель двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД, що дозволяє коректно прогнозувати аеродинамічні і хімічні особливості паливоспалюючих пристроїв з урахуванням плазмохімічного впливу на процеси сумішоутворення і кінетики різних за фазовим станом палив.

5. Проведено верифікацію розробленої математичної моделі двопаливної камери згоряння ГТД співставленням результатів числового моделювання з результатами експериментальних досліджень процесів горіння газоподібного і рідкого палива інших авторів. Доведено адекватність розробленої моделі і задовільна кореляція експериментальних і розрахункових даних.

Результати досліджень поточного розділу опубліковано автором в [78-82].

## РОЗДІЛ 4

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ГАЗОПОДІБНОМУ ТА РІДКОМУ ПАЛИВАХ

#### 4.1 Методика числового експерименту

Для теоретичних досліджень процесів у двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД використано методику числового експерименту з віртуальними моделями, що складається із п'яти основних етапів.

Перший етап – створення об'ємної геометричної моделі двопаливної низькоемісійної КЗ.

Другий етап - створення тетраедричної сіткової моделі (розрахункової сітки) на основі побудованої об'ємної геометричної моделі.

Третій етап – вибір та завдання граничних та початкових умов для числового експерименту. Цей етап також містить завдання відповідних підмоделей (турбулентності, хімічного реагування, утворення оксидів азоту та ін.).

Четвертий етап – проведення розрахунків процесів у двопаливних камерах згоряння ШТД, що працюють окремо на газоподібному і рідкому паливах та одночасно на обох видах палив.

П'ятий етап – аналіз отриманих результатів і вибір найбільш ефективних конструктивних схем паливоспалюючих пристроїв.

В якості об'єкта дослідження обрано низькоемісійну камеру згоряння з попереднім перемішуванням паливно-повітряної суміші газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт виробництва «Зоря»-«Машпроект» з двокаскадним турбокомпресором [84-86]. Камера згоряння має кільцеву-трубчасту протитоківу конструкцію (рис.4.1)

Низькоемісійна камера згоряння ГТД UGT25000 потужністю 25 МВт виробництва НВКГ «Зоря» - «Машпроект» являє собою трубчасто-кільцеву протитоківу конструкцію (рис. 4.1), в якій реалізовано принцип «сухого»

горіння частково перемішаної бідної суміші [83-86]. Основним елементом такої камери є пальниковий пристрій, що складається з двох радіально-осьових завихрювачів першого і другого каналів, за якими розташовані кільцеві камери змішування. Частка повітря, що надходить через завихрювач першого каналу, становить приблизно 12 % від сумарної витрати повітря через жарову трубу, а через завихрювач другого каналу - близько 61 %. Паливний газ подається через ряд отворів, виконаних в лопатках радіально-осьових завихрювачів першого і другого каналів [83-85].

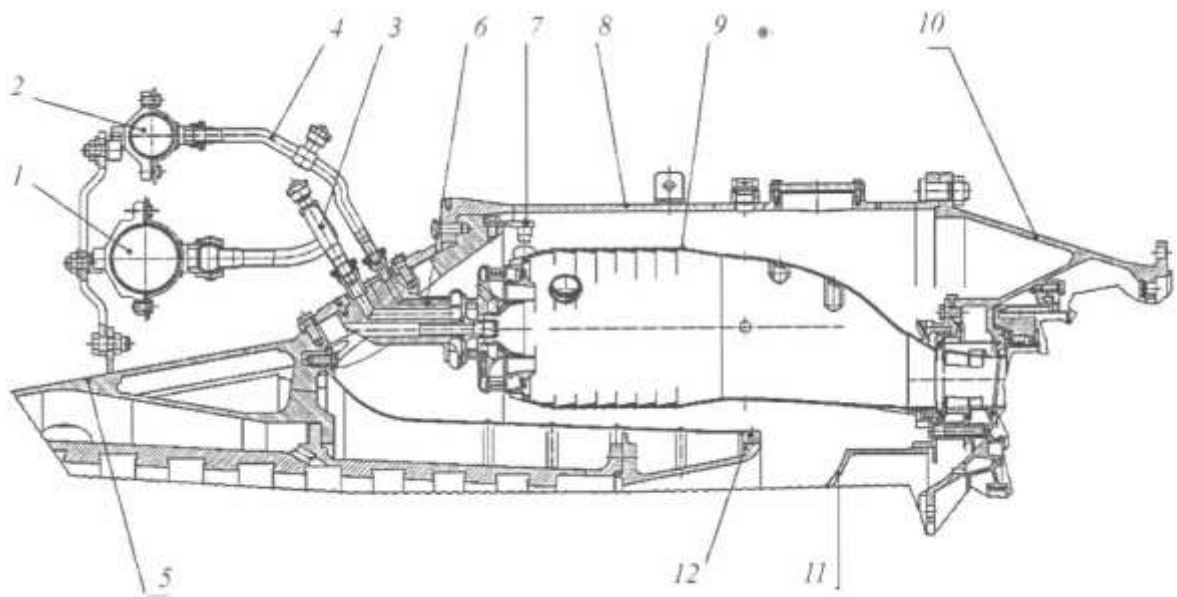


Рисунок 4.1 – Низькоемісійна камера згорання ГТД потужністю 25 МВт:

1, 2 – колектори першого і другого каналів; 3, 4 – трубки підведення палива в перший і другий канали; 5 – корпус компресора; 6 – пальниковий пристрій; 7 – фіксатор; 8 – кожух камери згорання; 9 – жарова труба; 10 – корпус силовий; 11 – дифузор; 12 – кожух внутрішній

Попередній аналіз, проведений за допомогою комплексів обчислювальної гідродинаміки ANSYS Fluent, показав потенціальні можливості струминного підведення рідкого палива в канали радіально-осьових завихрювачів першого і другого каналів подібних пальникових пристроїв із забезпеченням ефективної роботи низькоемісійної камери на рідкому паливі з мінімальними викидами токсичних компонентів

Параметрична цифрова модель 1/16 частини камери згорання ГТД потужністю 25 МВт (рис. 4.2), для проведення тривимірних розрахунків робочих процесів в камері згорання ГТД була побудована за допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks. На рис. 4.3 приведено конструктивну схему жарової труби цієї камери згорання.

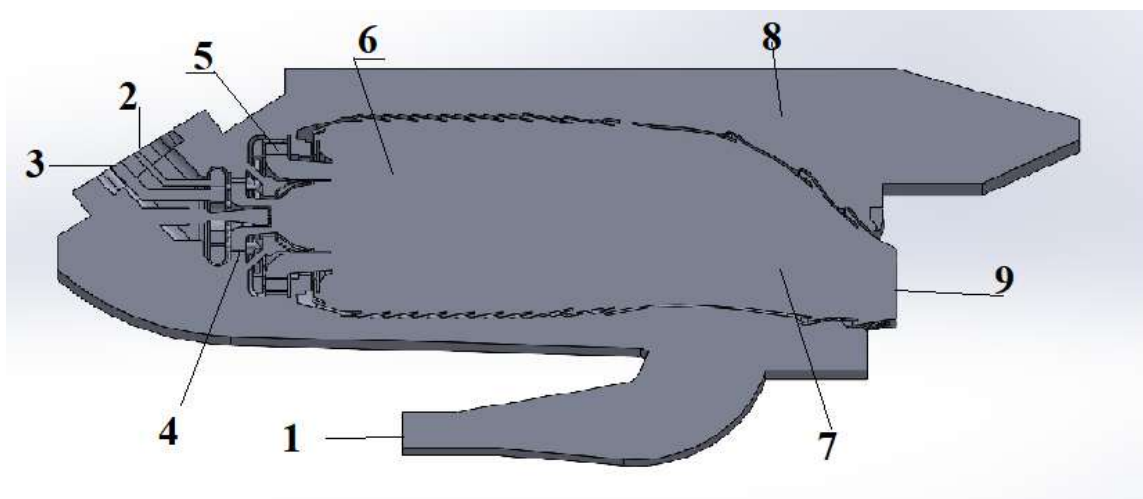


Рисунок 0.1 – Повздовжній переріз 1/16 частини камери згорання ГТД потужністю 25 МВт:

1 – вхідний канал стиснутого повітря; 2, 3 – первинні і вторинні трубки підведення газоподібного палива; 4, 5 – радіально-осьові завихрювачі; 6 – жарова труба; 7 – дифузор; 8 – внутрішній кожух камери згорання; 9 – вихідний пристрій

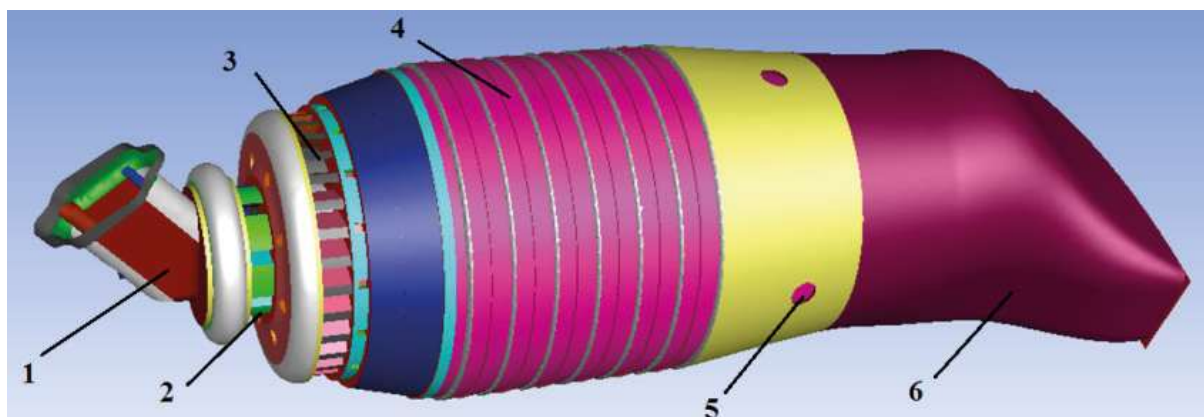


Рисунок 0.3 – Жарова труба:

1 – пальник; 2 – внутрішній завихрювач; 3 – зовнішній завихрювач; 4 – стінки жарової труби; 5 – отвори вторинного повітря; 6 – дифузор жарової труби

При встановленні початкових умов на вході паливоспадіючого пристрою використовувалися значення масових витрат повітря, його температури та тиску, характеристик турбулентності, а також масових витрат палива, які задавались у відповідності до режимних параметрів камери згоряння.

## 4.2 Дослідження енергетичних та екологічних характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД, що працює на газоподібному паливі

### 4.2.1 Результати тривимірних розрахунків на режимі холодної продувки

Аеродинамічна структура потоку досліджувалась для варіанту низькоемісійної камери згоряння ГТД (рис. 4.1) на режимі холодної продувки (без горіння палива) при витраті повітря 4,355 кг/с, його температурі 770 К, тиску 2,0523 МПа. Тривимірні розрахунки проведено з використанням розробленої математичної моделі двопаливної камери згоряння ГТД, представленої в розділах 2 і 3.

Результати представлено на рис. 4.4–4.10. На рис. 4.4 зображено розподіл амплітуд швидкостей повітря в об'ємі камери згоряння. Найбільші значення швидкості (біля 150 м/с) мають місце в перерізах внутрішнього завихрювача та в районі стінок жарової труби в первинній зоні низькоемісійної камери згоряння.

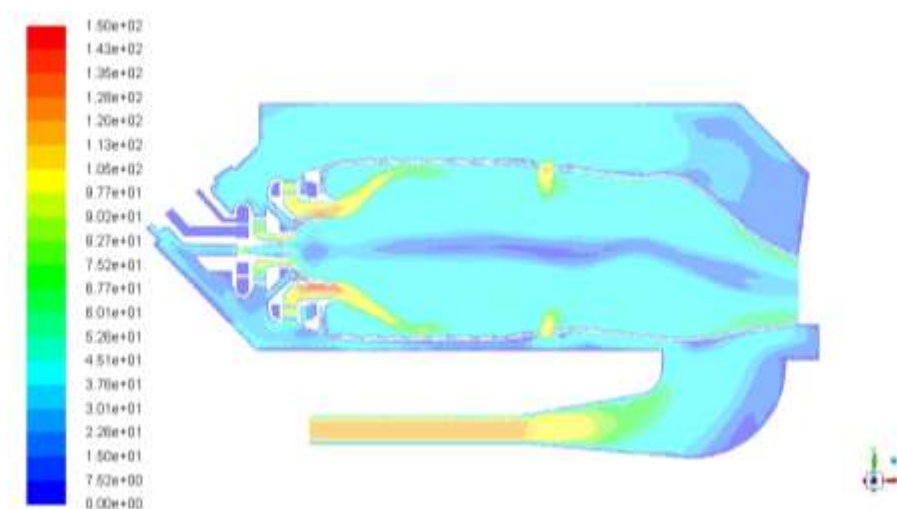


Рисунок 4.4 – Розподіл амплітуд швидкостей повітря (м/с) в об'ємі камери згоряння



На рис. 4.5 приведено вектори швидкості повітря, яке після компресора високого тиску двигуна подається в камеру згоряння через вхідний дифузор. Надалі робоче тіло через два радіально-осьових завихрювача поступає всередину жарової руби в районі фронтового пристрою і за рахунок інтенсивної закрутки змінює свій напрямок руху, набуваючи інтенсивне обертання. В міру віддалення від головної частини фронтового пристрою внаслідок тертя і турбулентної дифузії інтенсивність закрутки потоку різко зменшується. Відмітимо, що нерівномірність розподілу швидкості в радіальному напрямку спостерігається в усій центральній частині жарової труби.

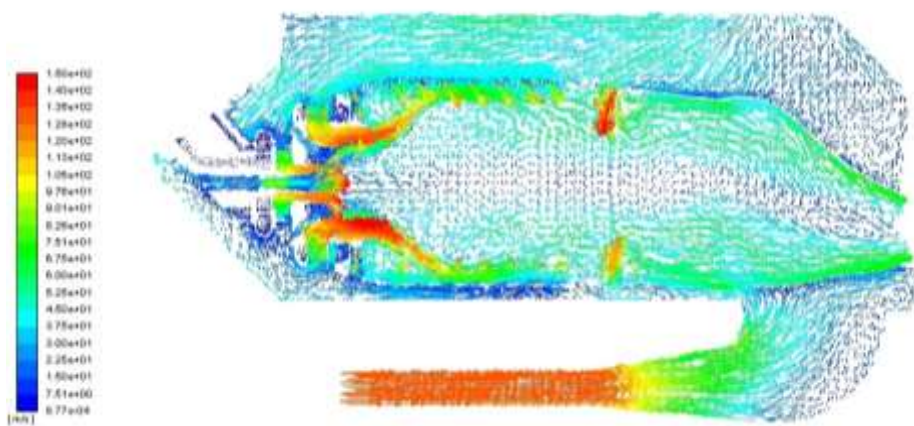


Рисунок 4.5 – Розподіл векторів швидкостей повітря (м/с) в об’ємі камери згоряння

Для більш детального аналізу характеру потоків на режимі холодної продувки на рис. 4.6–4.7 представлено контури осьової та радіальної компонент швидкості повітря. Розглядаючи розподіли радіальної компоненти швидкості (рис. 4.7) та швидкостей потоку в районі зовнішнього завихрювача (рис. 4.8), можна відмітити вплив радіальних течій всередині жарової руби на форму і протяжність зони зворотних течій, яка обумовлює стабільність положення фронту полум’я на режимах горіння.

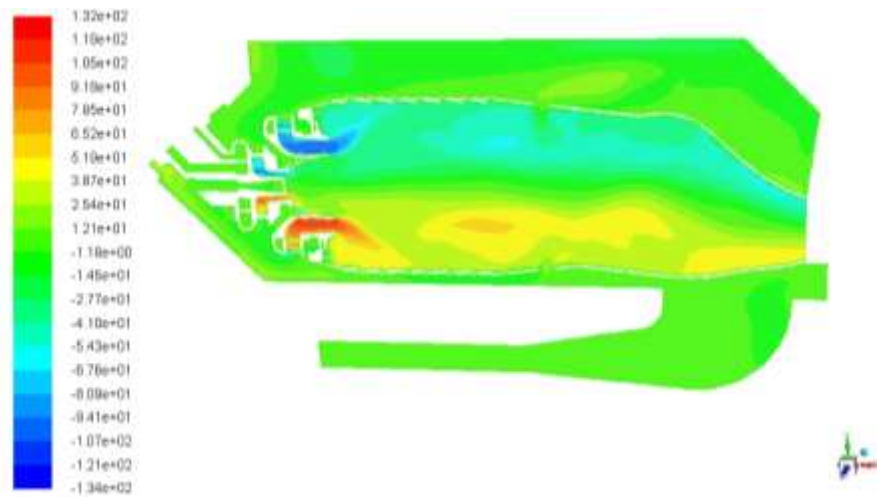


Рисунок 4.6 – Розподіл осьової компоненти швидкості повітря (м/с)

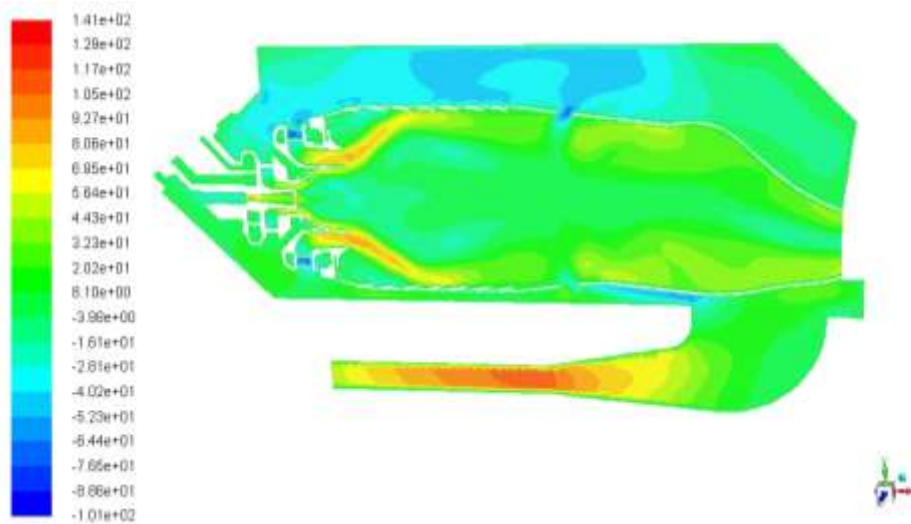


Рисунок 4.7 – Розподіл радіальної компоненти швидкості повітря (м/с)

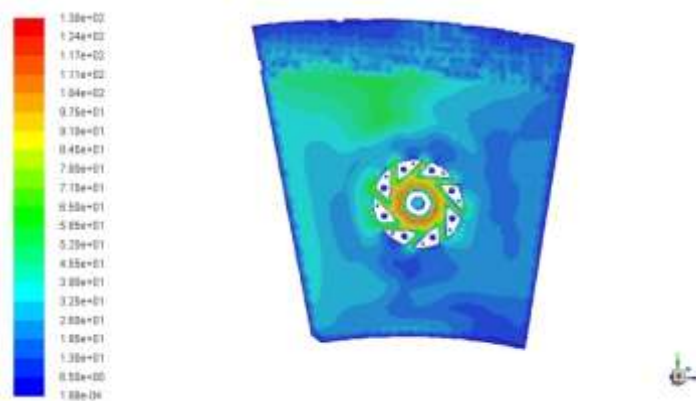


Рисунок 4.8 – Розподіл амплітуд швидкостей повітря (м/с) в районі зовнішнього завихрювача

Розподіл кінетичної енергії турбулентності в об'ємі камери згоряння (рис. 4.9) ілюструє області всередині жарових труб камери згоряння, де має місце інтенсивне турбулентне перемішування. Це район фронтового пристрою та зона, що безпосередньо слідує за отворами вторинного повітря.

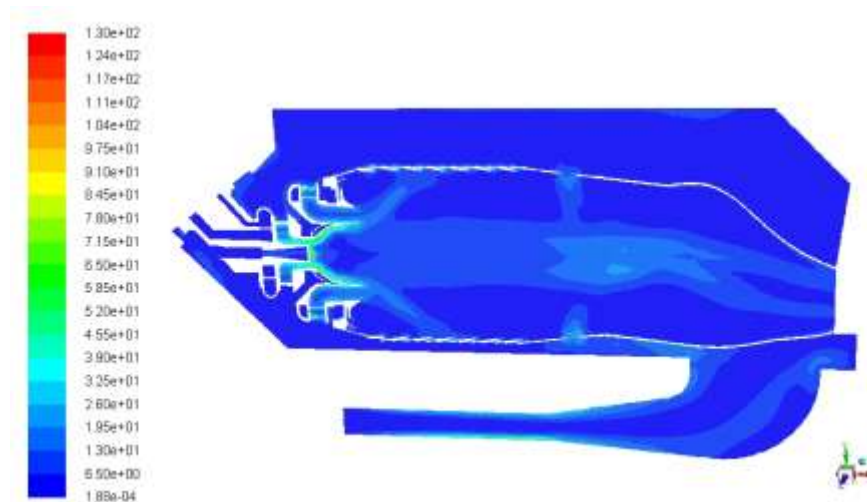


Рисунок 4.9 – Розподіл кінетичної енергії турбулентності ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) в об'ємі камери згоряння

На рис. 4.10 наведено контури статичного тиску в камері згоряння, які відображають наявність зони пониженого тиску (розрядження) в центральній зоні жарової труби (від'ємні значення) і підвищеного - в районі стінок. Це є результат інтенсивної закрутки повітря в радіально-осьових завихрювачах пального пристрою.

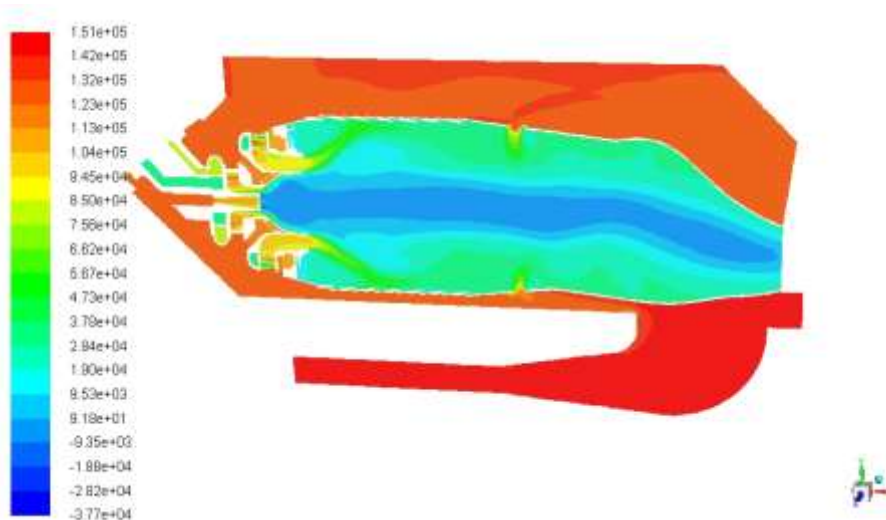


Рисунок 4.10 – Розподіл тиску (Па) в об'ємі камери згоряння

Відносні втрати повного тиску в камері згоряння обчислюються за формулою:

$$\sigma = 100 \frac{P_{in}^* - P_{out}^*}{P_{in}^*}, \quad (4.1)$$

де  $P_{in}^*$ ,  $P_{out}^*$  – відповідно повний тиск повітря на вході та виході із камери згоряння.

За отриманими розрахунковими даними ці втрати склали 5,78 %, що збігається з експериментальними даними [50, 77] і підтверджує достовірність математичної моделі.

Представлені результати розрахунку параметрів на режимі холодної продувки відображають складність аеродинамічної структури потоку в низькоемісійній камері згоряння, наявність характерних зон зворотних течій в центральній зоні жарової труби та велику нерівномірність розподілу швидкості по перерізах.

#### **4.2.2 Дослідження впливу розподілу газоподібного палива через канали завихрювачів на характеристики камери**

Вплив розподілу газоподібного палива між каналами лопаткових завихрювачів першого і другого каналів жарової труби низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт досліджувався на номінальному режимі її роботи за допомогою інструментів обчислювальної гідродинаміки.

Початкові дані для розрахунків низькоемісійної камери згоряння, що працює на газоподібному паливі, при різних режимах підведення палива представлено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вхідні параметри для розрахунку камери, що працює на газоподібному паливі

Назва параметру	Значення			
	1	2	3	4
Режим підведення палива				
Витрата метану через зовнішній завихрювач, кг/с	0,089 (100 %)	0,07565 (85 %)	0,0712 (80 %)	0,06675 (75 %)
Витрата метану через внутрішній завихрювач, кг/с	0	0,01335 (15 %)	0,0178 (20 %)	0,02225 (25 %)
Витрата повітря через жарову трубу, кг/с	4,355			
Тиск в камері, Па	2052300			
Температура повітря на вході в камеру, К	770			
Температура метану на вході в камеру, К	309,6			

Нижче представлено результати тривимірних розрахунків процесу горіння газоподібного палива в низькоемісійній камері згорання ГТД на різних режимах підведення палива через завихрювачі. На рис. 4.11 показано поля температур в поздовжньому перерізі низькоемісійної камери згорання для досліджених варіантів 1-4 (табл. 4.1). Видно, що максимальні значення температур в поздовжньому перерізі (2520 та 2560 К) характерні для варіантів 3 та 4. Зона високих температур простягається при цьому практично до вихідного перерізу жарової труби, що обумовлено неоптимальним співвідношенням окиснювач-паливо в центральній і приосьовій її частині. При зменшенні витрати газоподібного палива через канали внутрішнього завихрювача зростає коефіцієнт надлишку повітря в приосьовій області і, відповідно, падає температура продуктів згорання. Так, для варіантів підведення палива 1 та 2 максимальна температура складає 1890 та 2140 К. Має місце більш рівномірний характер вигорання пального по всьому об'єму первинної зони жарової труби. Видно, що при наявності горіння в головній частині жарової труби утворюється потужна зона зворотних течій, в якій циркулюють продукти повного згорання палива і

спостерігаються максимальні температури [86-87].

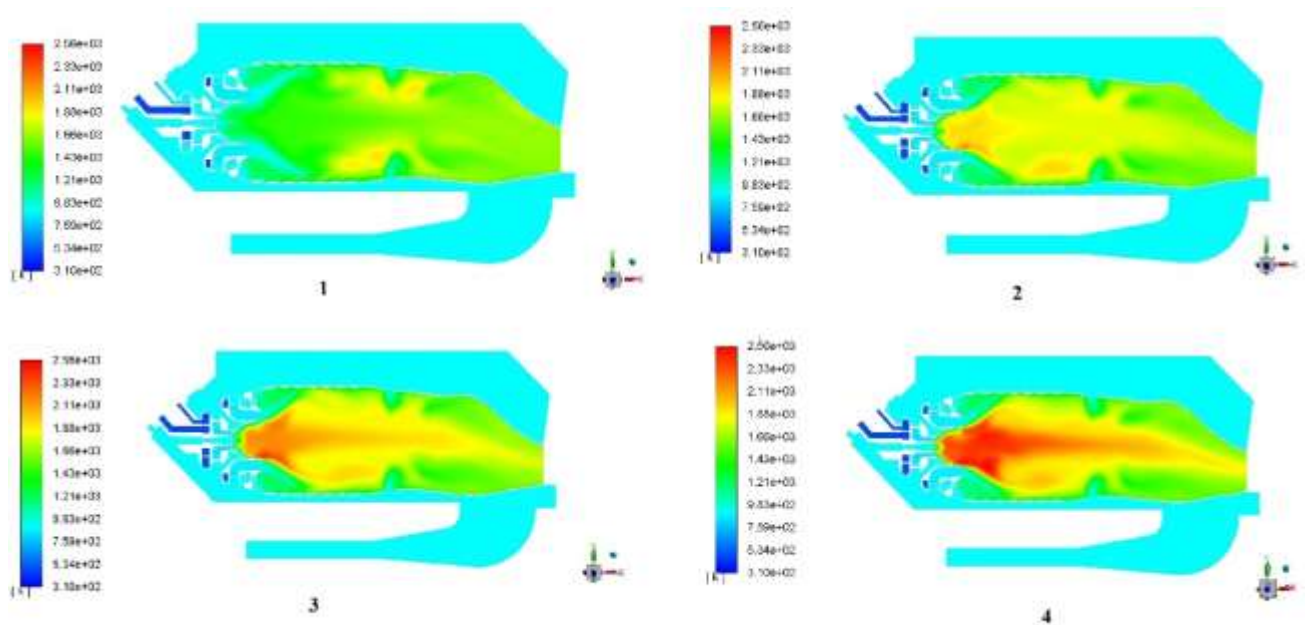


Рисунок 4.11 – Розподіл температур газу (К) повздовж жарової труби камери згоряння при різних режимах підведення газоподібного пального

Основна маса газоподібного пального хімічно реагує з киснем в первинній зоні жарової труби. Найвищі концентрації оксидів азоту та діоксиду вуглецю (рис. 4.12) мають місце в зонах максимальних температур в районі зони зворотних течій.

Утворення оксидів азоту (рис. 4.13) залежить від величини температури та локального коефіцієнту надлишку повітря в локальній зоні жарової труби. У зв'язку з більш високими температурами в об'ємі камери згоряння для варіантів 2-4, у порівнянні з першим варіантом спостерігаються більш високі пікові концентрації оксидів азоту NO у повздовжньому перерізі (рис. 4.13), а також й більш високі їх середньоінтегральні значення у вихідному перерізі камери згоряння.



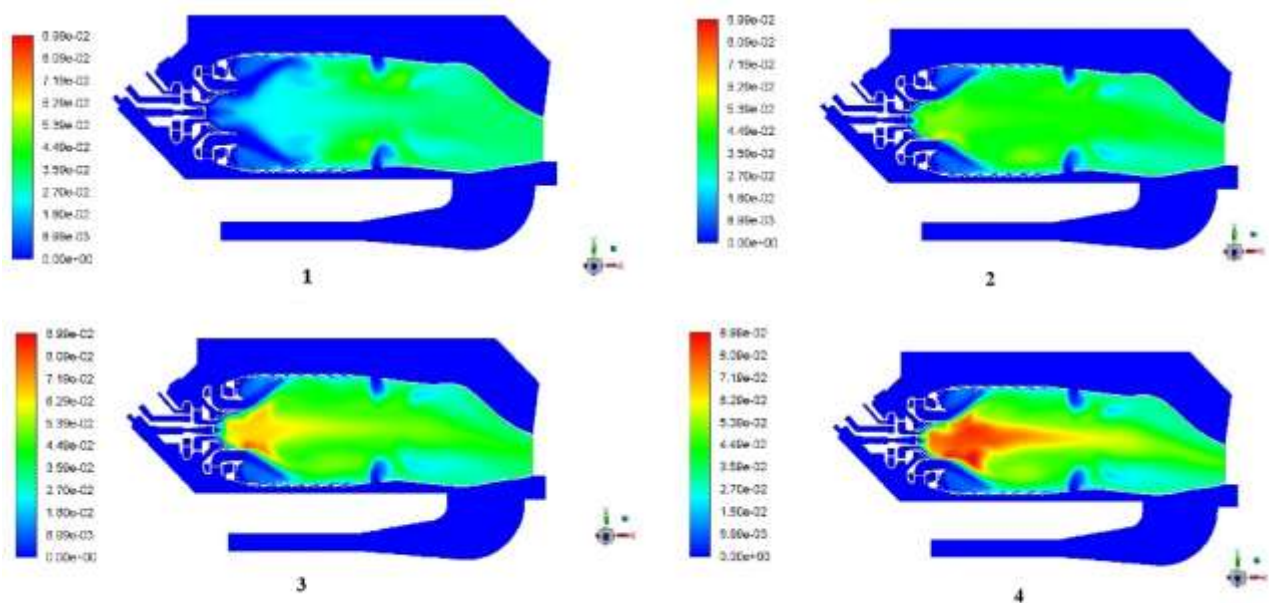


Рисунок 4.12 – Розподіл об’ємних концентрацій діоксиду вуглецю в жаровій трубі камери згоряння при різних режимах підведення газоподібного пального

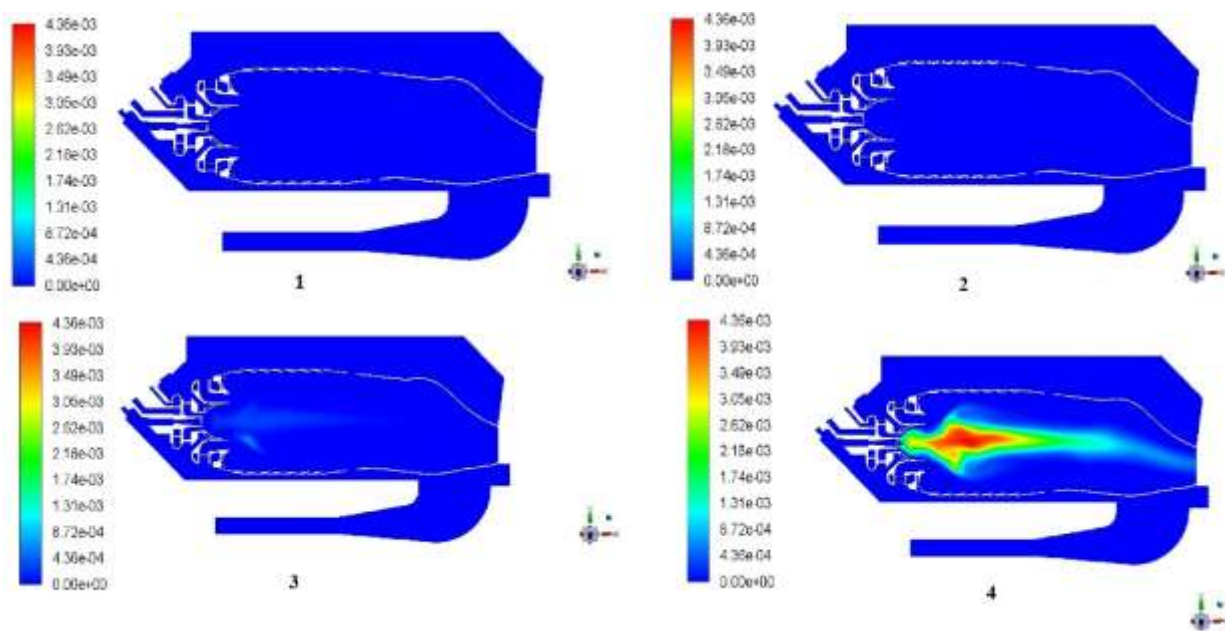


Рисунок 4.13 – Розподіл об’ємних концентрацій оксидів азоту в жаровій трубі камери згоряння при різних режимах підведення газоподібного пального

На рис. 4.14-4.16 [86-87] представлено порівняння розподілу масових концентрацій оксиду азоту NO (в межах від 0,11 до 271,3 мг/нм<sup>3</sup>), монооксиду вуглецю CO (в межах від 13,9 до 20,0 мг/нм<sup>3</sup>) та загальної нерівномірності температури в вихідному перерізі жарової труби (в межах від 0,16 до 0,27) для

різних режимів підведення палива. Для першого варіанту нерівномірність поля температур у вихідному перерізі жарової труби камери згоряння дорівнює 16 % при максимальній температурі 1666 К, мінімальній 1360 К і середній 1541 К. Цей показник може бути зменшено за допомогою оптимізації подачі палива в канали паливної форсунки та більш ефективного розподілу повітря за поясами охолодження.

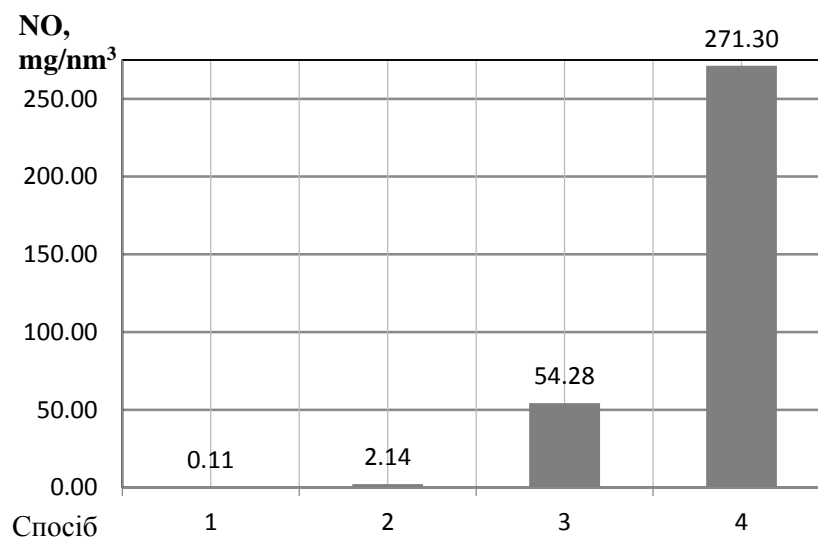


Рисунок 4.14 – Масові концентрації оксиду азоту NO в вихідному перерізі жарової труби для різних способів підведення палива

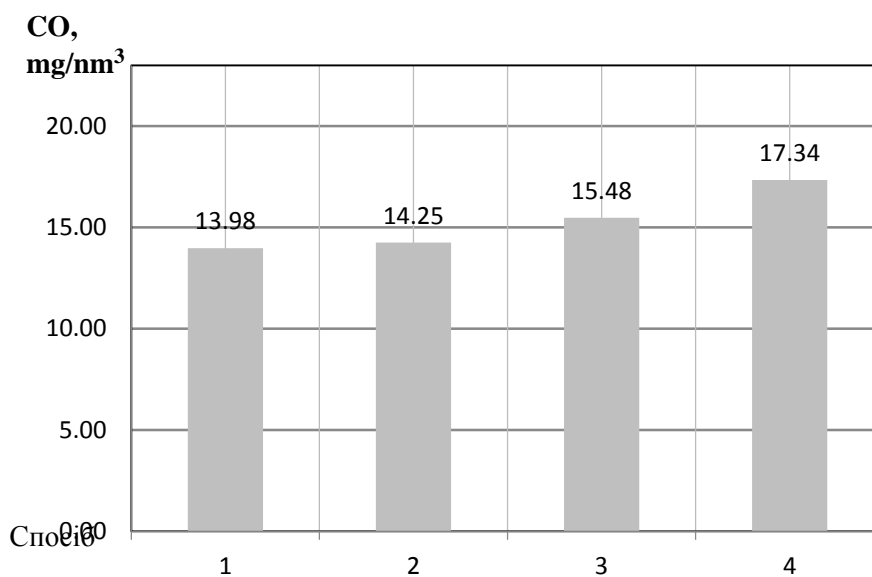


Рисунок 4.15 – Масові концентрації монооксиду вуглецю CO в вихідному перерізі жарової труби для різних способів підведення палива



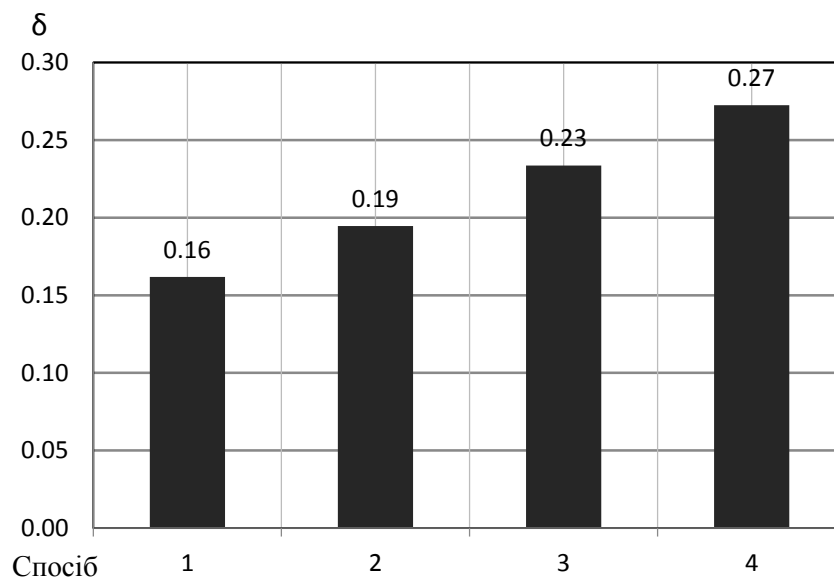


Рисунок 4.16 – Загальна нерівномірність температурного поля в вихідному перерізі жарової труби при різних способах підведення палива

Параметри в вихідному перерізі жарової труби двопаливної низькоемісійної камери згоряння, що працює на газоподібному паливі, які характеризують її екологічні показники для варіантів 1-4, представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2– Параметри на виході з камери згоряння

Варіант підведення палива	1	2	3	4
Назва параметру	Значення			
1. Середньомасова температура на виході, К	1544,60	1541,6	1540,9	1541,3
2. Мольна частка $\text{CH}_4$	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
3. Масова частка $\text{CO}_2$	0,055	0,055	0,055	0,05524
4. Масова частка $\text{H}_2\text{O}$	0,0452	0,0452	0,0451	0,0452
5. Мольна частка $\text{O}_2$	0,13	0,13	0,13	0,13

### **4.3 Дослідження енергетичних та екологічних характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД, що працює на рідкому паливі**

Для переведення низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт виробництва НВКГ “Зоря”-”Машпроект” на рідке паливо запропоновано використати дрібнодисперсне розпилювання крапель дистильного палива високошвидкісним повітряним потоком після компресора високого тиску, а також попереднє перемішування рідкого палива з повітрям в радіально-осьових завихрювачах пальникового пристрою жарової труби.

Розглянуто чотири способи підведення рідкого палива в пальниковий пристрій жарової труби камери згоряння: 1 – відцентровий спосіб, в якому 100 % палива подається через центральну відцентрову форсунку (рис. 4.17, а); 2 – осьовий спосіб, в якому 95 % палива (витрата 0,09495 кг/с) подається в осьовому напрямку через п'ятнадцять трубок, розташованих у зовнішньому завихрювачі, та 5 % палива (витрата 0,00495 кг/с) – в осьовому напрямку через п'ятнадцять трубок, розташованих у внутрішньому завихрювачі (рис. 4.17, б); 3 – змішаний спосіб (радіально-відцентровий), в якому 92 % палива (витрата 0,09193545 кг/с) подається через зовнішній завихрювач радіально, 4,8 % палива (витрата 0,0048375 кг/с) подається через внутрішній завихрювач радіально та 3,2 % палива (витрата 0,003225 кг/с) – через центральну відцентрову форсунку (рис. 4.17, в); 4 – радіальний спосіб, в якому 95 % палива подається в радіальному напрямку через зовнішній завихрювач та 5 % палива – в радіальному напрямку через внутрішній завихрювач (рис. 4.17, г) [88-89].

У більшості випадків при моделюванні використано метод впорскування палива "single": паливо протікає через ряд одиничних трубок малого діаметра, які встановлено в радіально-осьовий завихрювач. Початкові діаметри крапель палива для випадків з центральною форсункою прийнято за розподілом Розіна-Раммлера (від 5 до 75 мкм), для всіх інших випадків (осьова та радіальна подача рідкого палива) початковий діаметр крапель прийнято 50 мкм. Для четвертого способу

прийнято такі параметри розпилювання дизельного палива: швидкість витікання крапель 50 м/с, середній діаметр крапель в спектрі розпилювання 50 мкм.

На рис. 4.17 показано траєкторії руху крапель рідкого палива та зміну їх діаметрів в повздовжньому перерізі жарової труби в залежності від способу підведення рідкого палива з урахуванням особливостей змішування палива з окиснювачем в каналах радіально-осьових завихрювачів.

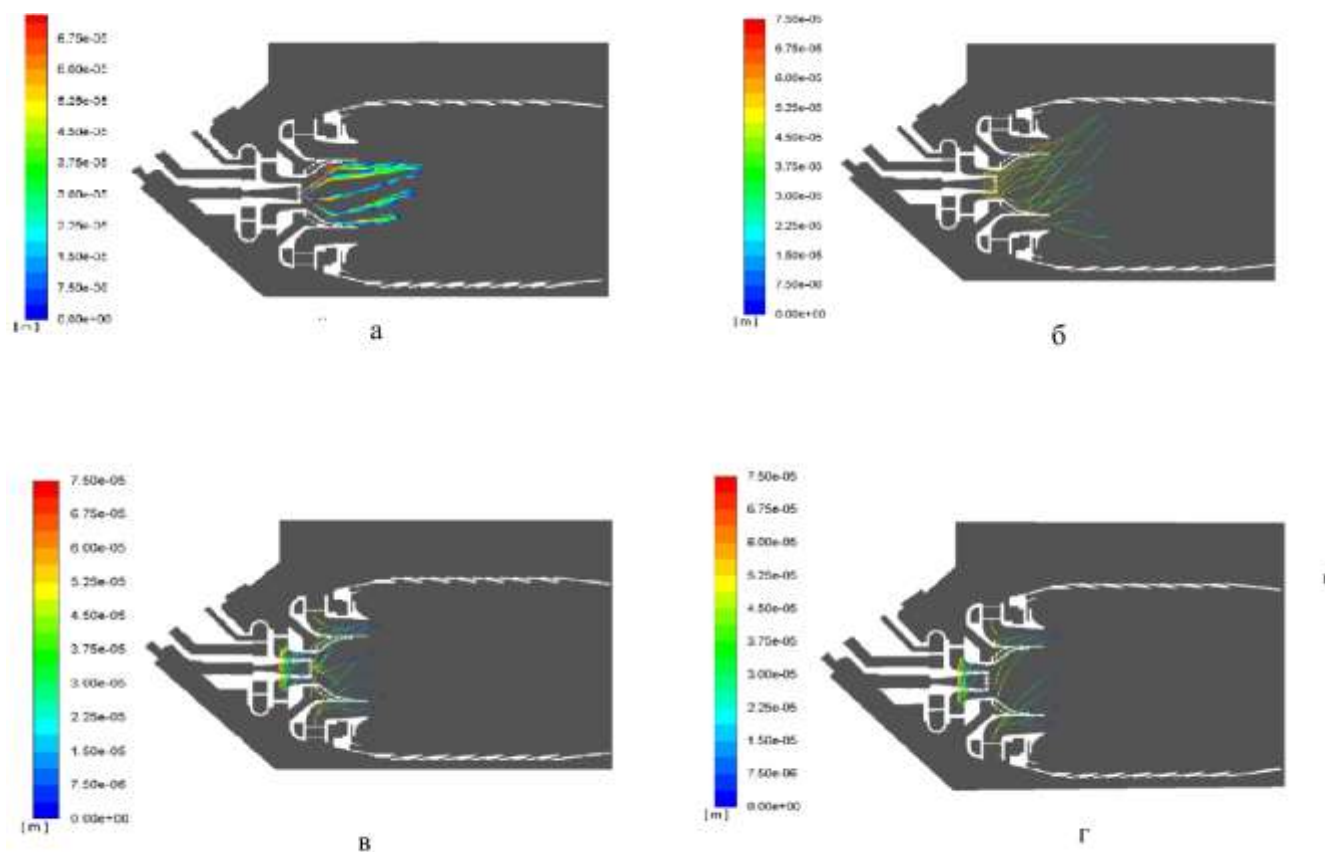


Рисунок. 4.17 – Лінії треків крапель рідкого палива та зміна діаметрів при різних способах його підведення:

а – 1; б – 2; в – 3; г – 4

Для відцентрового та осьового способів підведення рідкого палива (1, 2) характерні найбільш протяжні лінії треків, а процес випаровування крапель завершується тільки в районі третьої обичайки жарової труби. Це говорить про незадовільну якість процесів прогріву крапель, їх випаровування та сумішоутворення парів палива з окиснювачем.

Це підтверджують дані рис. 4.18 [88-89], де приведені контури температури в повздовжньому перерізі жарової труби в залежності від способу підведення рідкого палива в канали завихрювачів.

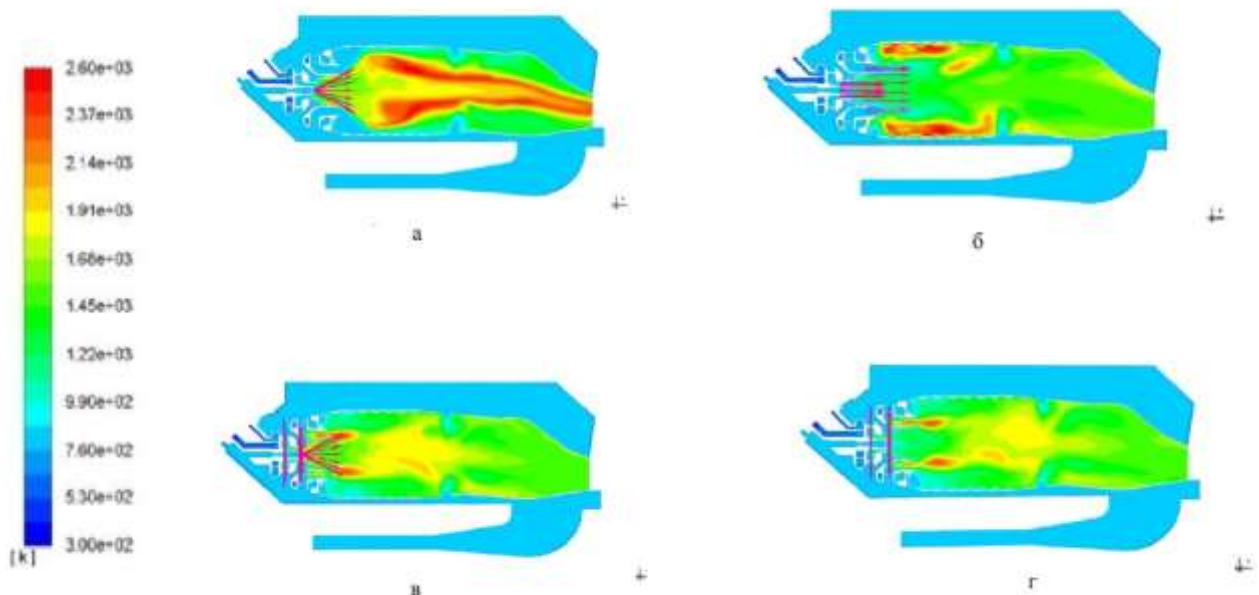


Рисунок. 4.18 – Розподіл температур газу повздовж жарової труби камери згоряння при різних способах підведення палива:

а – 1; б – 2; в – 3; г – 4

Видно, що при відцентровому способі підведення (1) факел палива простягається практично до вихідного перерізу жаровою труби, паливо повністю не вигоряє, обумовлюючи надзвичайно високу нерівномірність температурного поля на виході. При осьовому способі підведення палива (2) краплі концентруються в районі стінок жарової труби, вигоряють на них, що призводить до різкого підвищення температури обичайок жарової труби і їх можливого прогорання та руйнації. Способи 3 та 4 позбавлені вищеназваних недоліків, що обумовлює значно ефективніше вигорання палива.

На рис. 4.19 наведено контури об'ємних концентрацій оксидів азоту в повздовжньому перерізі жарової труби, які визначаються відповідним розподілом

температур, бо найважливішим фактором є термічний механізм утворення повітряних оксидів азоту.

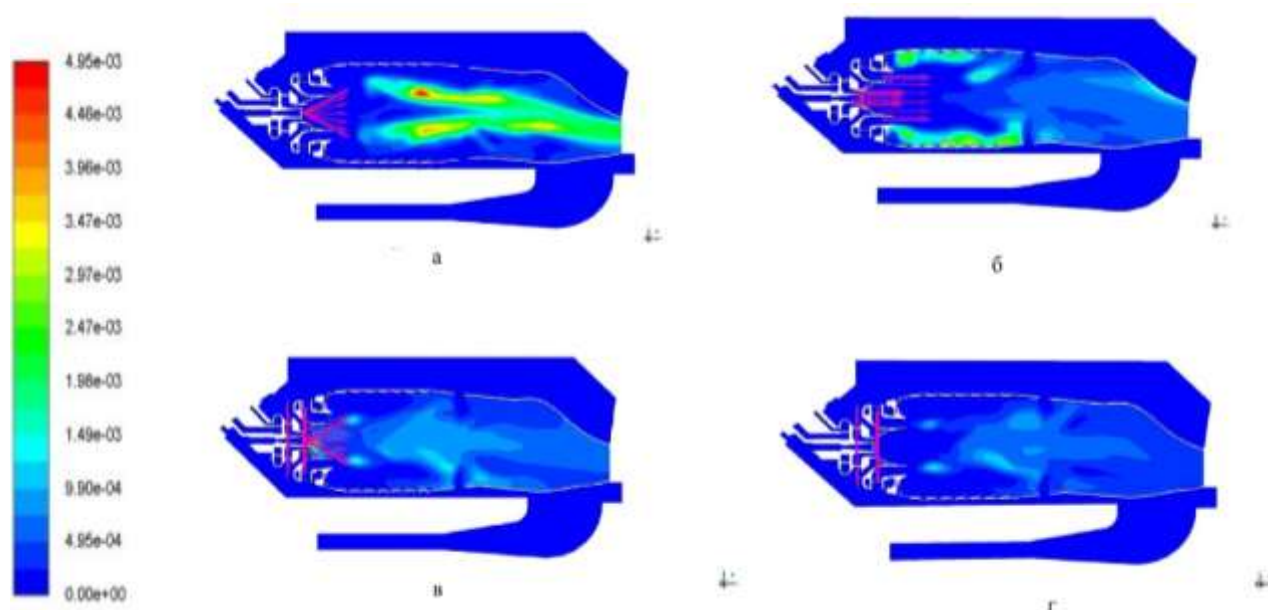


Рисунок. 4.19 – Розподіл об’ємних концентрацій оксидів азоту при різних способах підведення палива: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4

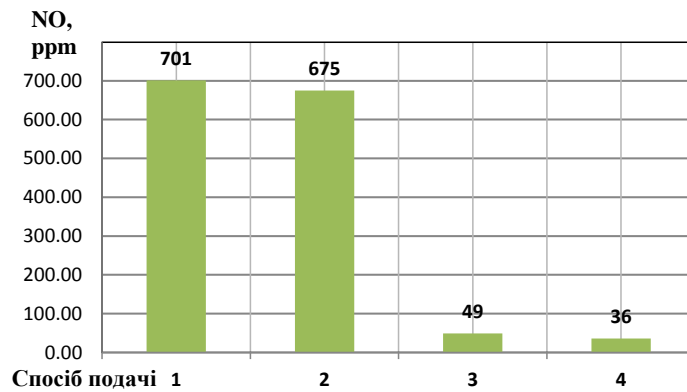
Способи підведення рідкого палива 3 та 4 з меншою максимальною температурою горіння визначають і менші рівні емісії оксидів азоту.

Параметри продуктів згорання для вихідного перерізу жарової труби (середня температура газів  $T_{exit}$ , об’ємна концентрація оксидів азоту NO та монооксиду вуглецю CO, загальний коефіцієнт нерівномірності температурного поля  $\delta$ ) представлено в табл. 4.3.

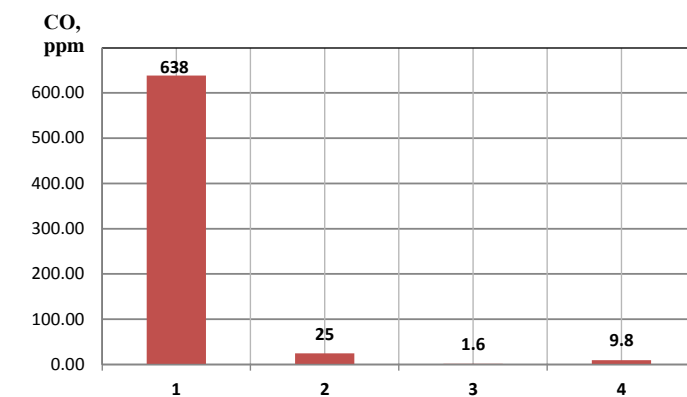
Таблиця 4.3 – Параметри в вихідному перерізі при роботі на рідкому паливі

Спосіб підведення палива	$T_{exit}$ , K	NO, ppm	CO, ppm	$\delta$
1	1489,4	701	638	0,81
2	1555,2	675	25	0,21
3	1513,4	49	1,6	0,17
4	1506,6	36	9,8	0,12

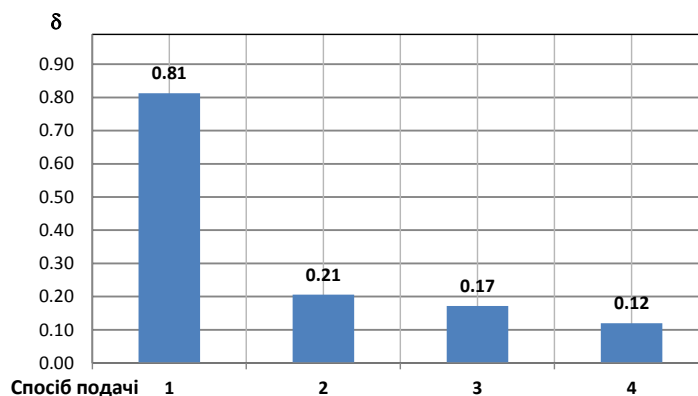
На рис. 4.20 наведено залежності основних параметрів камери згоряння від способу підведення рідкого палива.



*a*



*б*



*в*

Рисунок. 4.20 – Параметри камери при різних способах підведення палива:

а – викиди NO; б – викиди CO; в – нерівномірність температурного поля

Видно, що способи підведення 1 і 2 не задовольняють вимоги к параметрам сучасних камер згоряння по показникам екологічності і рівномірності температурного поля. Способи 3 і 4 значно більш ефективніші. Мінімальне

розрахункове значення викидів оксиду азоту 36 ppm при коефіцієнті загальної нерівномірності поля температур 0,12 характерно для радіального способу підведення рідкого палива.

#### **4.4 Вибір раціональних режимів підведення рідкого палива в канали повітряних радіально-осьових завихрювачів**

Для визначення раціональних режимів підведення рідкого палива проведено серію розрахунків з метою визначення впливу швидкості впорскування рідкого палива при його радіальній подачі в канали аксіально-радіальних завихрювачів на характеристики камери згоряння. При проведенні розрахунків враховано, що 95 % палива подається в радіальному напрямку через зовнішній завихрювач фронтового пристрою, а 5 % палива – також в радіальному напрямку через внутрішній завихрювач. Базові параметри розпилювання дизельного палива: швидкість витікання крапель 50 м/с, середній діаметр крапель в спектрі розпилювання 50 мкм [86].

На рис. 4.21 – 4.24 зображено розподіли основних параметрів в повздовжніх перерізах жарової труби: температур, швидкостей, кінетичної енергії турбулентності та концентрацій оксидів азоту при двох значеннях (мінімальній та максимальній) швидкості витікання рідкого палива в канали аксіально-радіальних завихрювачів: 5 та 50 м/с.

Існує тісний взаємозв'язок між розподілом температур, об'ємними викидами азоту, швидкостями потоку та турбулентністю. При збільшенні швидкості радіального підведення палива збільшується емісія оксидів азоту за рахунок збільшення сумарної протяжності факела палива (рис. 4.21, 4.24). Характер і розміри зони зворотних течій всередині жарової труби також дещо змінюються (рис. 4.22) за рахунок невеликого підвищення інтенсивності турбулентності (рис. 4.23) при збільшенні різниці в швидкостях рідкої та газоподібної фаз [86].

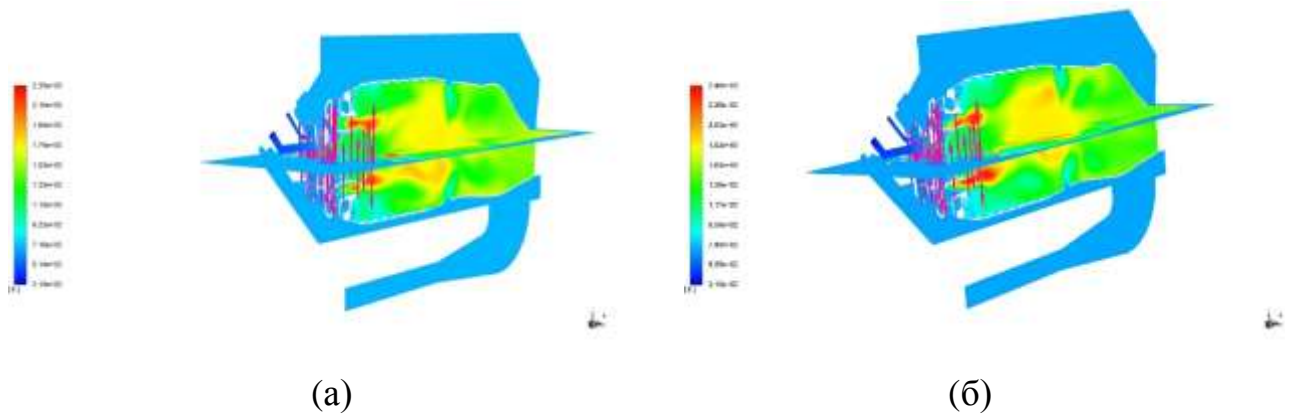


Рисунок. 4.21 – Розподіл температур газу (К) повздож жарової труби камери згоряння при різних швидкостях впорскування: а – 5 м/с; б – 50 м/с

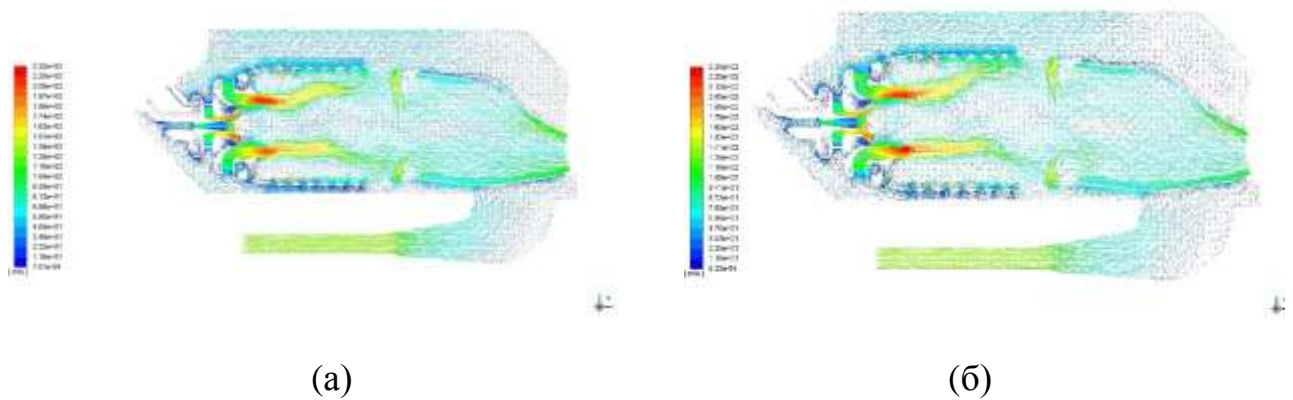


Рисунок. 4.22 – Розподіл швидкостей (м/с) потоку в жаровій трубі при різних швидкостях впорскування: а – 5 м/с; б – 50 м/с

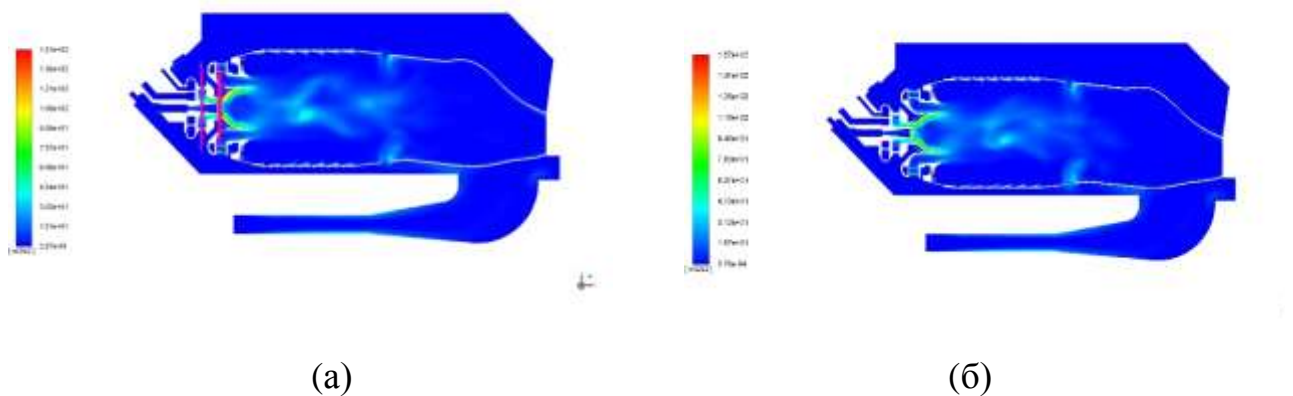


Рисунок. 4.23 – Розподіл кінетичної турбулентності ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ ) в жаровій трубі при різних швидкостях впорскування: а – 5 м/с; б – 50 м/с



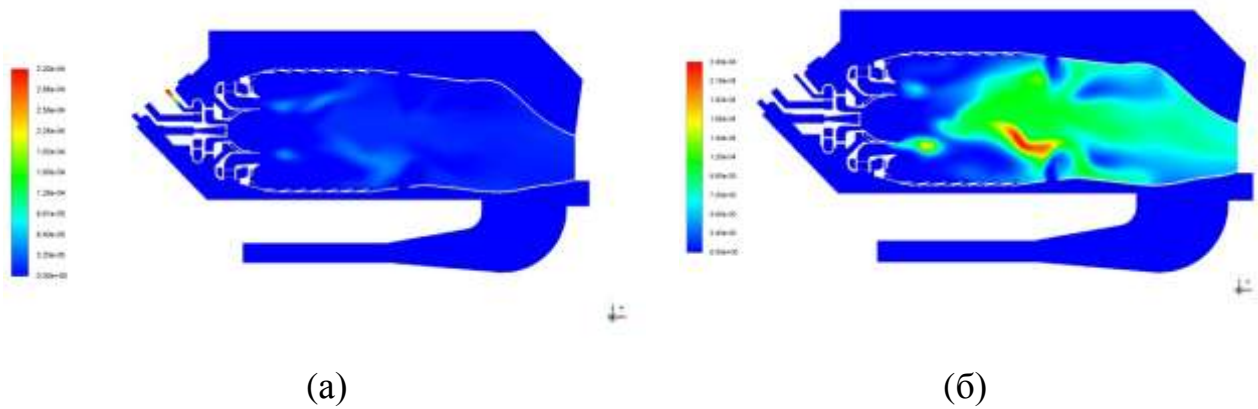


Рисунок. 4.24 – Розподіл об’ємних концентрацій оксидів азоту в жаровій трубі при різних швидкостях впорскування: а – 5 м/с; б – 50 м/с

Відмітимо, що при радіальному підведенні рідкого палива процес випаровування крапель та перемішування парів з повітрям відбувається достатньо швидко. Процес горіння розпочинається навіть в каналах завихрювачів, що може призвести до підвищення температури металевих поверхонь, нагароутворень і зниження надійності жарової труби в цілому.

Залежність викидів оксиду азоту від швидкості подачі рідкого палива представлена на рис. 4.25. Очевидно, що зменшення швидкості витікання палива в канали завихрювачів сприяє зниженню емісії оксиду азоту, що вимагає конструювання більш ефективних паливорозпилюючих пристроїв [86].

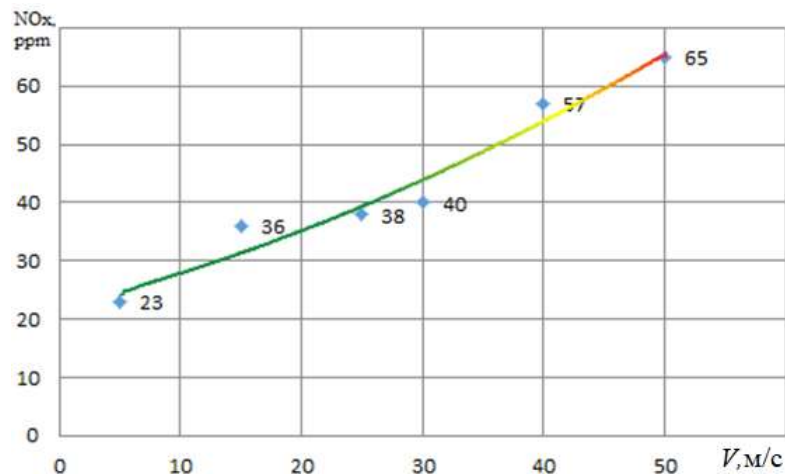


Рисунок. 4.25 – Вплив швидкості підведення палива в камеру згорання на викиди оксидів азоту

Зміна швидкості радіального підведення рідкого палива в канали внутрішнього і зовнішнього завихрювачів жарової труби з 5 до 50 м/с призводить до зростання розрахункової емісії оксидів азоту з 24 до 66 ppm [86].

В розділі 4.3, проаналізувавши декілька варіантів підведення рідкого палива в камеру згоряння ГТД (рис. 4.17–4.20), в якості одного з перспективних був обраний радіальний спосіб, який задовольняє сучасним Європейським екологічним вимогам [90] до викидів токсичних компонентів. Але через те, що процес горіння значною мірою розпочинався в об'ємі завихрювачів (рис. 4.18), а це, в свою чергу, може негативно впливати на ресурс жарової труби, прийнято рішення розглянути та провести вибір раціональних режимів підведення рідкого пального.

Тривимірні розрахунки робочого процесу проведено з використанням розробленої математичної моделі двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД [91-95] з урахуванням рекомендацій [96-104].

Для 1/16 частини низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт використано кінцево-різницеву сітку, яка складається з 2,7 мільйонів тетраєдрів. Прийнято наступні початкові умови: температура повітря на вході в дифузор 770 К, тиск 2,0523 МПа, витрата 4,355 кг/с, загальна витрата рідкого палива 359,64 кг/год. Ці параметри відповідають номінальному режиму роботи газотурбінного двигуна. Для спрощення числових розрахунків стінки жарової труби приймалися адіабатичними. Типове значення середньоквадратичного відхилення (RSM) для встановлення збіжності розв'язку становить  $1e-4$ .

При моделюванні використано спосіб впорскування палива з порожнистим конусом (hollow-cone), що імітує розпилювання різними форсунками, які встановлено в радіально-осьовий завихрювач. Проаналізовано вплив п'яти різних розподілів початкових діаметрів крапель рідкого палива на характеристики камери згоряння.

Початкові діаметри крапель рідкого палива для першого випадку прийнято за розподілом Розіна-Раммлера (рис. 4.26,а): від 5 до 95 мкм з середнім діаметром 50 мкм; для другого випадку (рис. 4.26,б): від 5 до 75 мкм з середнім діаметром 35

мкм, для третього випадку (рис. 4.26,в): від 5 до 60 мкм з середнім діаметром 30 мкм, для четвертого випадку (рис.4.26, г): для від 5 до 50 мкм з середнім діаметром 25 мкм; для п'ятого випадку (рис. 4.26, г): від 3 до 40 мкм з середнім діаметром 20 мкм. Відмітимо, що розподіли крапель за розмірами для першого-четвертого випадку властиві форсункам механічного розпилювання, а для п'ятого - повітряно-механічним.

Загальними для всіх розрахунків прийнято параметри дизельного палива: температура 313 К, кут розпилювання  $5^\circ$ , швидкість витікання крапель 15 м/с. Відмітимо, що 95 % палива (витрата 0,09495 кг/с) подається в осьовому напрямку через п'ятнадцять форсунок, розташованих у зовнішньому завихрювачі, та 5 % палива (витрата 0,00495 кг/с) – через п'ятнадцять форсунок у внутрішньому завихрювачі.

Результати тривимірних розрахунків представлено на рис. 4.26–4.28. На рис. 4.26 показано траєкторії руху крапель рідкого палива та зміну їх діаметрів в поздовжньому перерізі жарової труби в залежності від параметрів розпилювання з урахуванням особливостей змішування палива з окиснювачем в каналах радіально-осьових завихрювачів. При зменшенні середнього діаметру крапель в спектрі розпилювання лінії треків характеризуються коротшим часом перебування крапель в жаровій трубі, а отже і більш ефективним процесом нагрівання крапель, випаровування та змішування з окиснювачем [86-87].

Це підтверджується даними рис. 4.27, де показано контури температур в поздовжньому перерізі жарової труби при досліджених випадках розподілу початкових діаметрів. При більших максимальному та середньому діаметрах крапель в спектрі розпилювання вони концентруються в області стінок жарової труби і догорають на цих поверхнях, що призводить до різкого підвищення температури обичайок жарової труби та можливого їх прогорання.

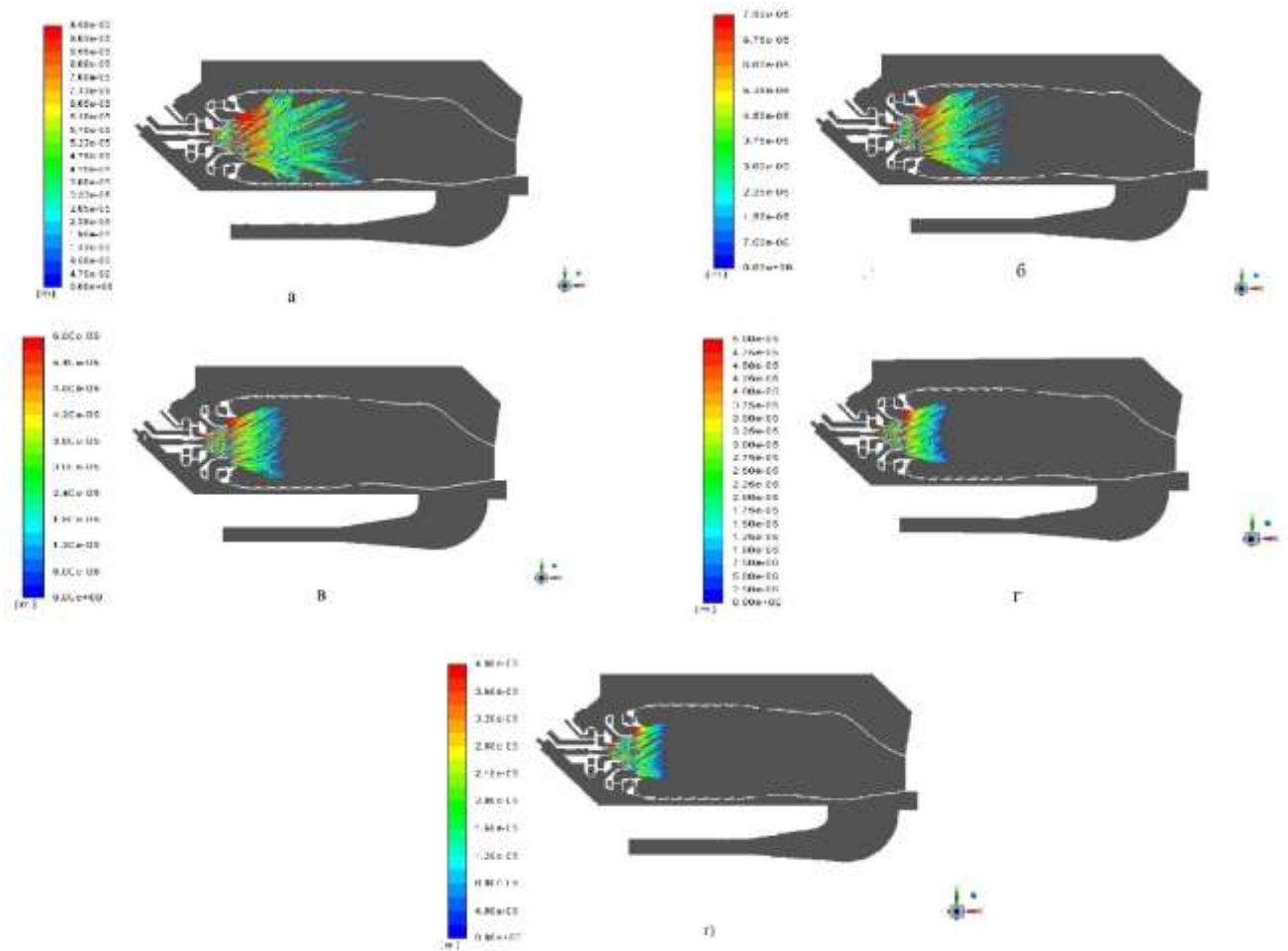


Рисунок 4.26 – Лінії треків крапель рідкого палива та зміна їх діаметрів при різних розподілах початкових діаметрів:

а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5

У порівнянні з рис. 4.17, б (при підведенні палива через ряди трубок невеликого діаметру в осьовому напрямку) розпилювання рідкого палива за допомогою форсунок приводить до кращого розподілу крапель за розмірами і більш ефективного випаровування і утворення паливно-повітряної суміші. Дослідження показали, що емісійні характеристики камери згоряння практично не змінюються при значеннях середнього діаметра крапель в спектрі розпилювання, менших ніж 35 мкм.

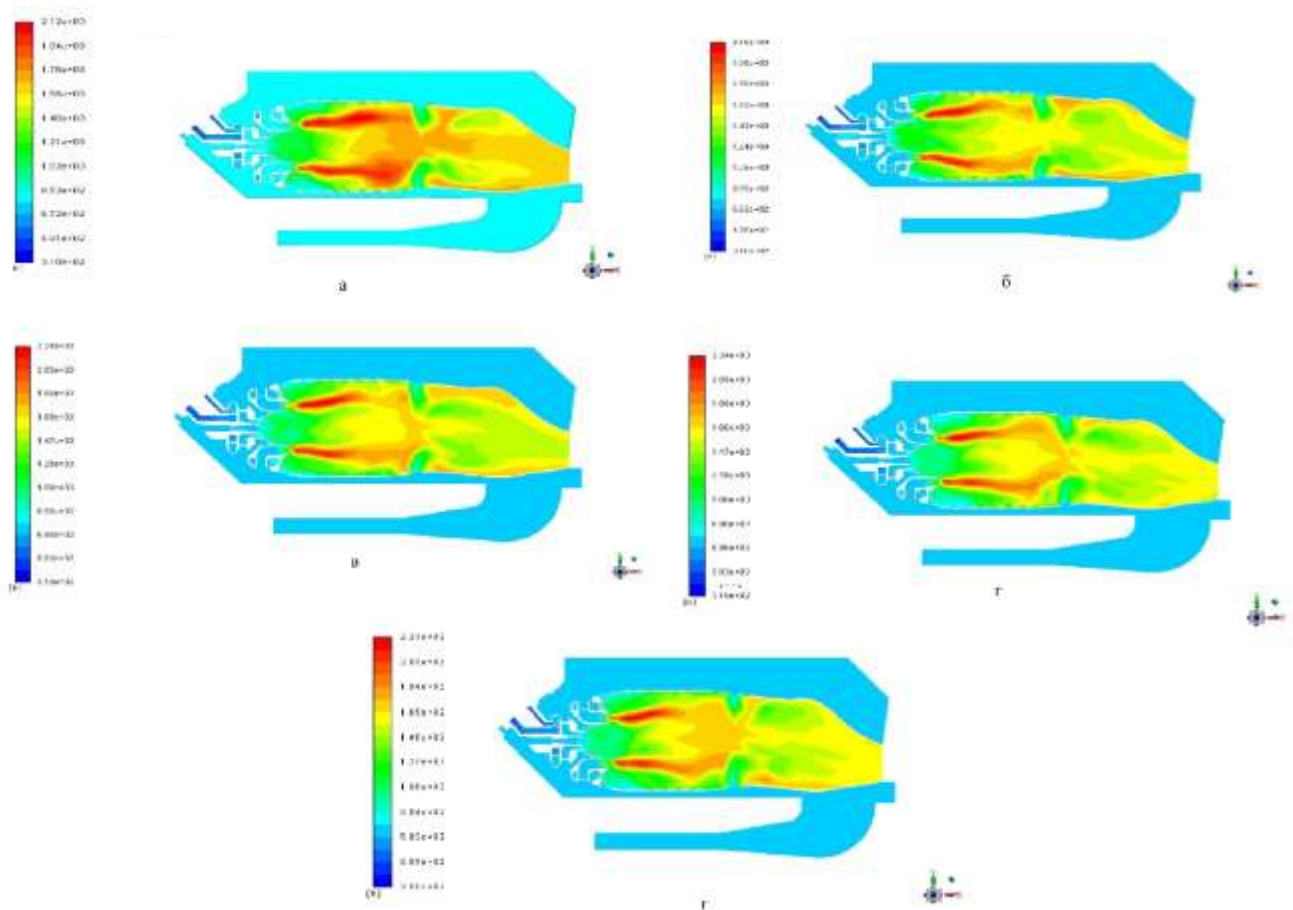
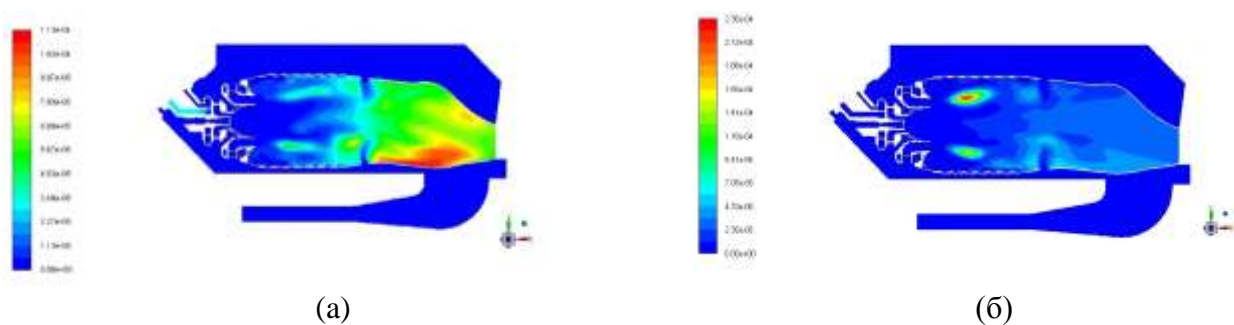


Рисунок 4.27 – Розподіл температур повздовж жарової труби камери згоряння різних розрідлах початкових діаметрів:

а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; ґ – 5

На рис. 4.28 представлено контури об'ємних концентрацій оксидів азоту в поздовжньому перерізі жарової труби, які визначаються відповідним розподілом температури робочого середовища, оскільки визначальним фактором є термічний механізм утворення повітряних оксидів азоту.



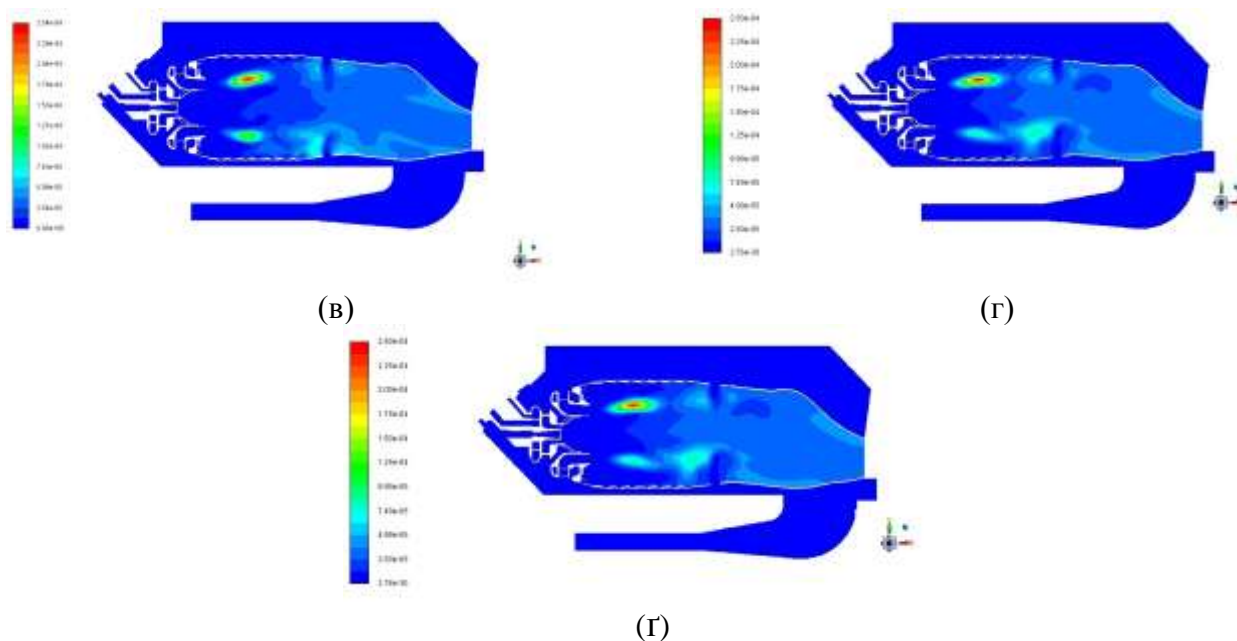


Рисунок 4.28 – Об’ємні концентрації оксиду азоту NO повздовж жарової труби камери згоряння при різних розподілах початкових діаметрів:

а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; г – 5

Параметри продуктів згоряння для вихідного перерізу жарової труби (середня температура газів  $T_{\text{exit}}$ , об’ємна концентрація оксидів азоту NO та монооксиду вуглецю CO, загальний коефіцієнт нерівномірності температурного поля  $\delta$ ) представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Параметри камери згоряння в вихідному перерізі

Розподіл початкових діаметрів	$T_{\text{exit}}$ , K	NO, ppm	CO, ppm	$\delta$
1	1567	57	24	0,07
2	1565	31	25	0,13
3	1565	36	25	0,12
4	1565	33	28	0,11
5	1560	33	22	0,13

Зазначимо, що одним із способів підвищення ефективності спалювання вуглеводневих палив і зменшення викидів монооксиду вуглецю CO є інтенсифікація горіння за рахунок плазмохімічних елементів [105-110].

#### **4.5 Теоретичні дослідження процесів в низькоемісійній камері згоряння, що працює одночасно на природному газі та дистилатному рідкому паливі**

Однією з вимог до сучасних двопаливних камер згоряння ГТД є забезпечення переходу з одного виду палива на інший без зупинки двигуна. Тому проведено дослідження робочого процесу двопаливної камери згоряння, що одночасно працює на газоподібному пальному (метані) і рідкому дистилатному паливі. Розрахунки виконано для низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт. При визначенні витрат різних видів палива враховано, що вони відрізняються значеннями нижчої теплотворної здатності.

При моделюванні процесів сумішоутворення крапель рідкого палива з повітрям використано спосіб впорскування палива з порожнистим конусом, що відповідає розпилюванню форсунок, які встановлено в радіально-осьові завихрювачі. Загальними для всіх випадків прийнято параметри розпилювання дизельного палива: швидкість витікання крапель 15 м/с, температура палива 313 К. Початкові діаметри крапель палива прийнято за розподілом Розіна-Раммлера і результатами підрозділу 4.4: від 5 до 75 мкм з середнім діаметром 35 мкм. Відмітимо, що 95 % рідкого палива подається в осьовому напрямку через п'ятнадцять форсунок, розташованих у зовнішньому завихрювачі, та 5 % палива – через п'ятнадцять форсунок, розташованих у внутрішньому завихрювачі.

Досліджувались режими одночасної роботи низькоемісійної камери згоряння на рідкому та газоподібному паливах при різних співвідношеннях їх масових витрат через жарову трубу. Призначимо для зручності різним режимам підведення палива відповідні номери: 100 % газоподібного палива – 1; 90 % газоподібного палива + 10 % рідкого палива – 2; 80 % газоподібного палива + 20 % рідкого палива – 3; 70 % газоподібного палива + 30 % рідкого палива – 4; 50 % газоподібного палива + 50 % рідкого палива – 5; 30 % газоподібного палива + 70 % рідкого палива – 6; 20 % газоподібного палива + 80 % рідкого палива – 7; 10 % газоподібного палива + 90 % рідкого палива – 8; 100 % рідкого палива – 9.

Вхідні данні до розрахунків представлено в табл. 4.5. Масові витрати газоподібного і рідкого палив показані в табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Вхідні параметри для розрахунку камери згоряння

Назва параметру	Значення
1. Витрата повітря через жарову трубу, кг/с	4,355
2. Тиск в камері, Па	2052300
3. Температура повітря на вході в камеру, К	770
4. Температура метану на вході в камеру, К	309.6
5. Температура дистилатного палива на вході в камеру, К	313

Таблиця 4.6 – Витрати палив через жарову для досліджуваних режимів

Режим	Витрата палива через жарову трубу, кг/с			
	Газоподібне		Рідке	
	Зовнішній завихрювач	Внутрішній завихрювач	Зовнішній завихрювач	Внутрішній завихрювач
1	0,08456710	0,00445090	0	0
2	0,07611039	0,00400581	0,00056378	0,00002967
3	0,06765368	0,00356072	0,00112756	0,00005935
4	0,05919697	0,00311563	0,00169134	0,00008902
5	0,04723875	0,00248625	0,00314925	0,00016575
6	0,02834325	0,00149175	0,00440895	0,00023205
7	0,01889550	0,00099450	0,00503880	0,00026520
8	0,00944775	0,00049725	0,00566865	0,00029835
9	0	0	0,09447750	0,00497250

На рис. 4.29 наведено треки крапель рідкого палива в поздовжньому перерізі жарової труби в залежності від режиму підведення з урахуванням особливостей взаємодії парів рідкого палива з газоподібним паливом і окиснювачем в каналах радіально-осьових завихрювачів. Через природу газоподібного палива та величину його теплотворної здатності, на режимах, при яких частка газоподібного палива більше 50 %, рідке паливо випаровується швидше.



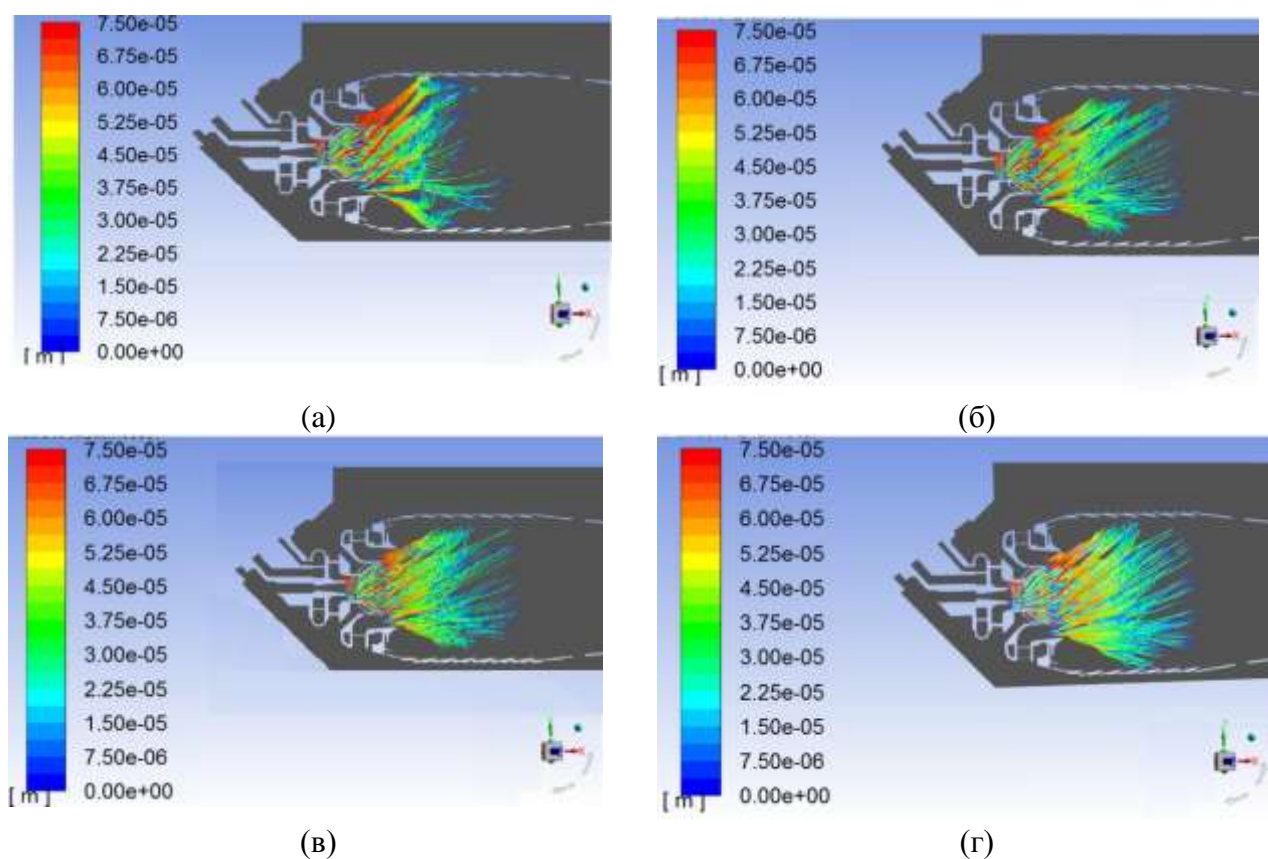


Рисунок 4.29 – Лінії треків крапель рідкого палива та зміна їх діаметрів при різних режимах підведення палива:

а – 2; б – 4; в – 6; г – 7

Параметри продуктів згоряння для вихідного перерізу жарової труби (середня температура газів  $T_{exit}$ , об'ємна концентрація оксидів азоту NO та монооксиду вуглецю CO, загальний коефіцієнт нерівномірності температурного поля  $\delta$ ) представлено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Параметри камери згоряння в вихідному перерізі

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{exit}$ , K	1564	1555	1548	1532	1610	1608	1564	1578	1565
NO, мг/м <sup>3</sup>	4,59	1,2359	2,3894	4,8785	19,226	31,332	31,824	36,219	49,823
CO, мг/м <sup>3</sup>	0,0438	5,6408	15,511	17,813	25,2	23,608	20,336	21,083	24,452
$\delta$	0,1007	0,1029	0,0904	0,1436	0,105	0,1803	0,1918	0,1267	0,13

На рис. 4.30–4.32 показано зміну температур, об'ємних концентрації монооксиду вуглецю та оксиду азоту по осі жарової труби камери згоряння для режимів підведення палива 1-9. Видно, що інтервал коливань температури по осі жарової труби для всіх випадків лежить у діапазоні від 1170 до 1750 К, причому на режимах, де газоподібного палива більше, процеси хімічного реагування протікають більш інтенсивно.

Характер зміни концентрацій монооксиду вуглецю (рис. 4.31) по осі жарової труби більш складний і визначається кінетичним механізмом (3.11)–(3.16). Сплески концентрацій монооксиду вуглецю визвано недосконалістю процесів перемішування палива з окиснювачем та турбулентними пульсаціями [111].

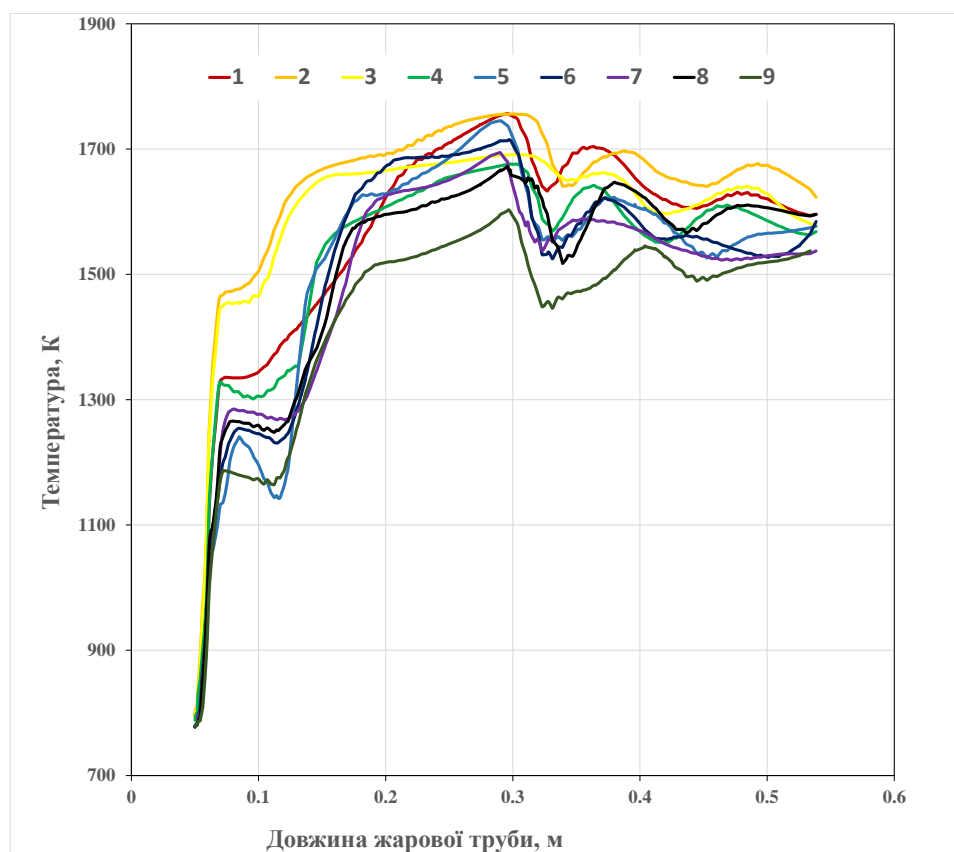


Рисунок 4.30 – Зміна температури (К) по осі низькоемісійної камери згоряння ГТД для різних режимів підведення палива

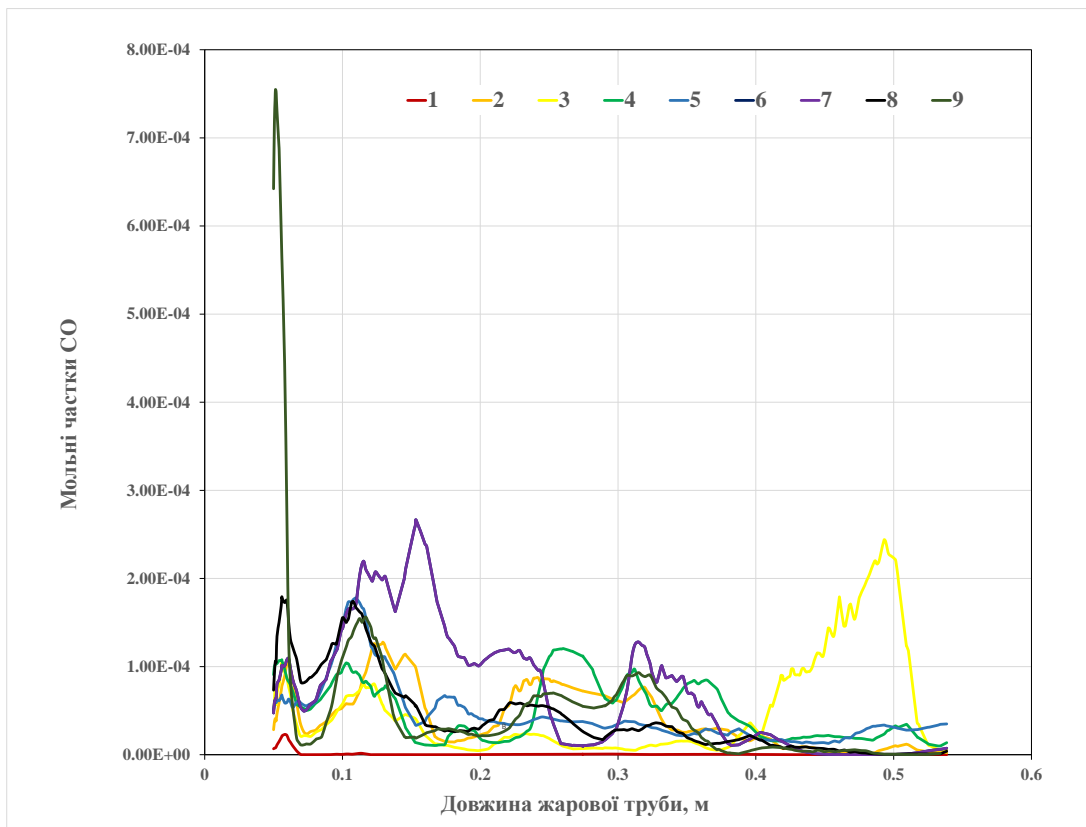


Рисунок 4.31 – Зміна об’ємних концентрації монооксиду вуглецю по осі низькоемісійної камери згоряння ГТД для різних режимів підведення палива

Розподіл концентрацій оксидів азоту по осі жарової труби камери згоряння вказує на безперервне і монотонне їх зростання для всіх досліджених режимів, що викликано збільшенням часу перебування реагентів в зонах високих температур по ходу робочого тіла. Відмітимо, що для режимів з великою кількістю газоподібного пального максимальні температури на осі камери знаходяться в межах 1900-2000 К, а для режимів з великою кількістю рідкого палива – в межах 2100-2200 К, що обумовлює більші значення концентрацій оксидів азоту на виході камери при роботі на дистилатному рідкому паливі [111].

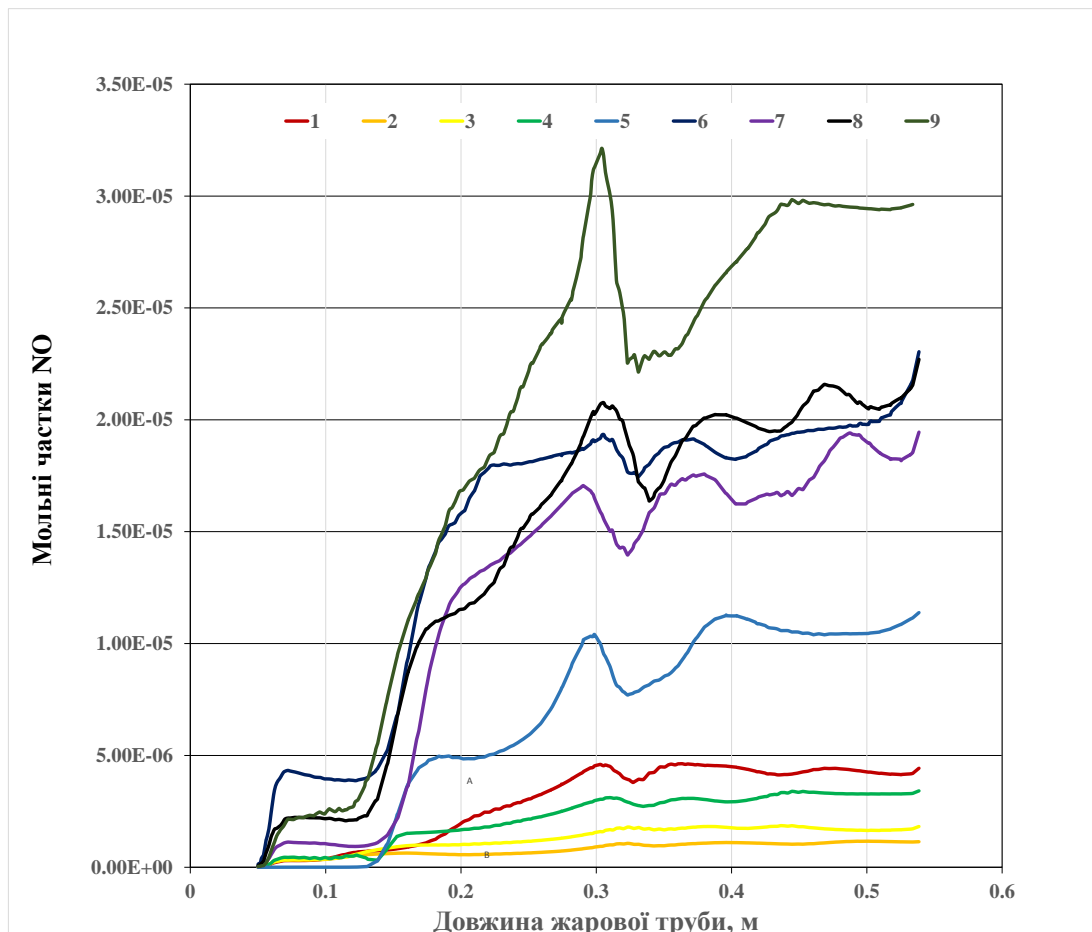


Рисунок 4.32 – Зміна об’ємних концентрації оксиду азоту NO по осі низькоемісійної камери згоряння ГТД для різних режимів підведення палива

На рис. 4.33 відображено температурні контури в поздовжньому розрізі двопаливної камери згоряння для чотирьох режимів подачі газоподібного та рідкого палив. Видно, що процеси згоряння палива у випадках подачі газоподібного палива завершуються швидше, про що свідчить більша заповнення первинної зони продуктами згоряння з високими температурами. Зі збільшенням кількості рідкого палива фронт полум’я зосереджується з зонами, що відповідають траєкторіям крапель палива, які поступово випаровуються і згоряють у потоці. Причому для режимів з переважно більшістю рідкого палива температура лежить в діапазоні 2100-2280 К, а для режимів з більшою кількістю газоподібного палива пікові температури в довготному перерізі камери згоряння знаходяться в межах 1900-2000 К. (рис. 4.28) [111].

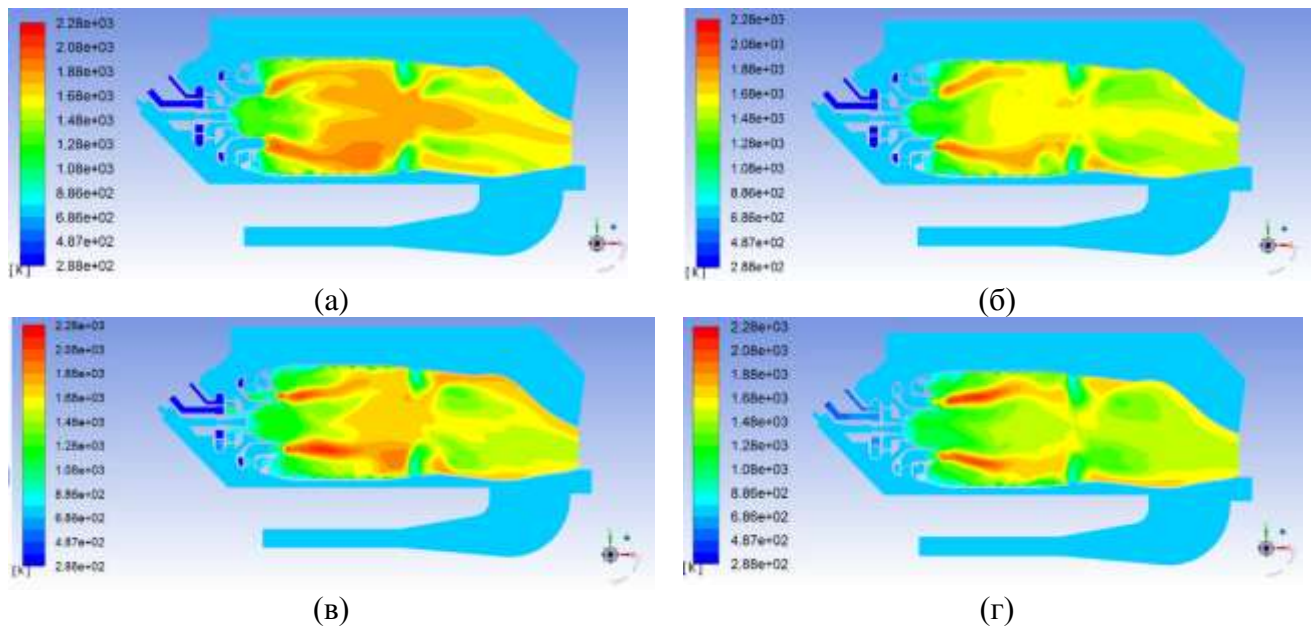
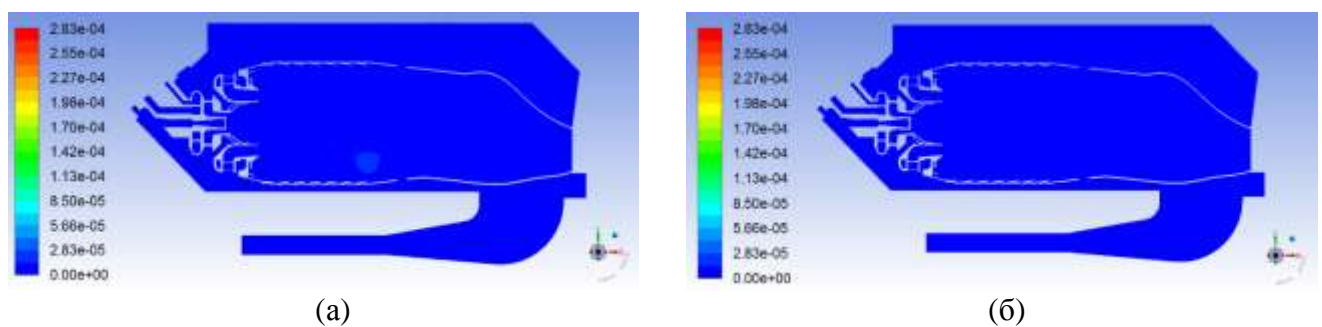


Рисунок 4.33 – Розподіл температур повздовж жарової труби камери згорання при різних режимах підведення палива:

а – 2; б – 4; в – 6; г – 7

На рис. 4.34 наведено контури масових часток оксидів азоту NO в поздовжньому розрізі жарової труби двопаливної камери згорання для чотирьох режимів підведення газоподібного та рідкого палива. Для режиму 1 підведення тільки газоподібного палива утворення оксидів азоту незначне. Зі збільшенням кількості рідкого палива збільшуються сумарна концентрації оксидів азоту, а їх максимальні значення спостерігаються в первинній зоні камери згорання в зоні фронту полум'я. Це підтверджує, що основним механізмом утворення оксидів азоту в такій двопаливній камері згорання є тепловий, який визначається максимальними температурами у фронті полум'я.



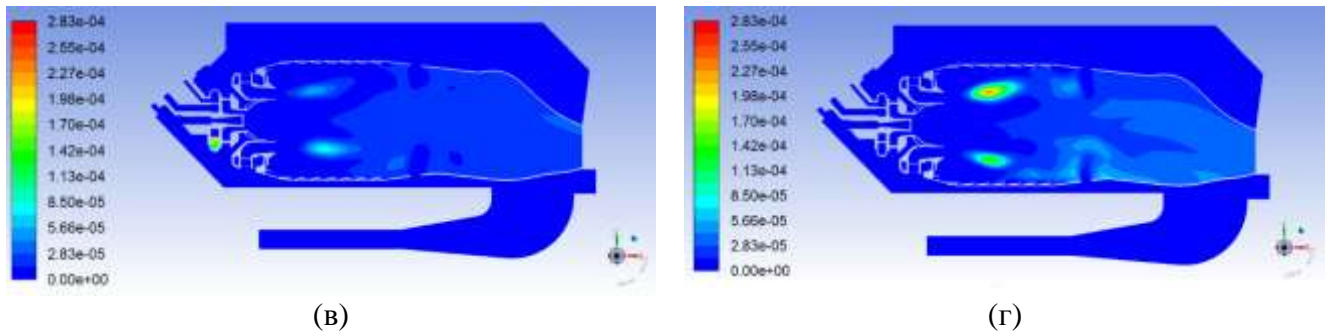


Рисунок 4.34 – Масові частки оксиду азоту NO повздовж жарової труби камери згоряння при різних режимах підведення палива:

а – 2; б – 4; в – 6; г – 7

На рис. 4.35 показано контури масових часток монооксиду вуглецю CO в поздовжньому перерізі жарової труби для тих самих режимів подачі газоподібного та рідкого палива. Видно, що із збільшенням кількості рідкого палива монооксид вуглецю здебільшого утворюється в локальних ділянках, розташованих за зовнішнім завихрювачем. Пізніше в результаті протікання активної хімічної реакції окиснення концентрації CO різко зменшуються.

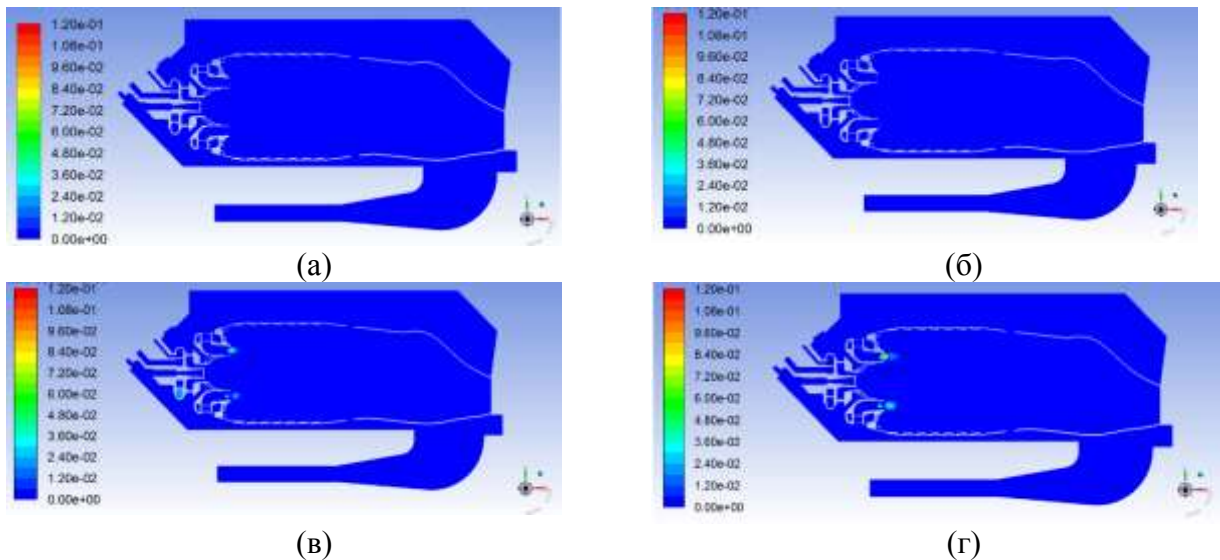


Рисунок 4.35 – Масові частки монооксиду вуглецю CO повздовж жарової труби камери згоряння при різних режимах підведення палива:

а – 2; б – 4; в – 6; г – 7

На рис. 4.36–4.38 показано розрахункові залежності загальної нерівномірності температурного поля  $\delta$ , масових концентрацій CO та NO



(перерахованих на зневоднену пробу з вмістом кисню 15 %) в вихідному перерізі жарової труби режимів підведення палива.

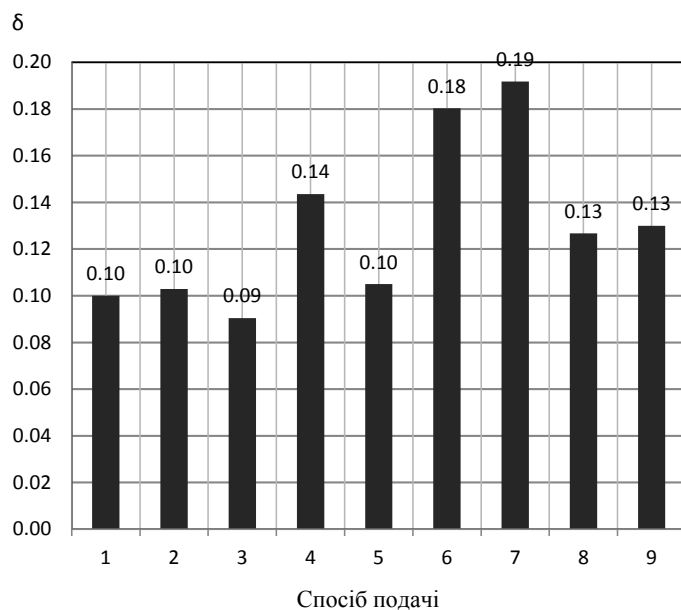


Рисунок 4.36 – Коефіцієнт загальної нерівномірності температурного поля на виході камери згоряння

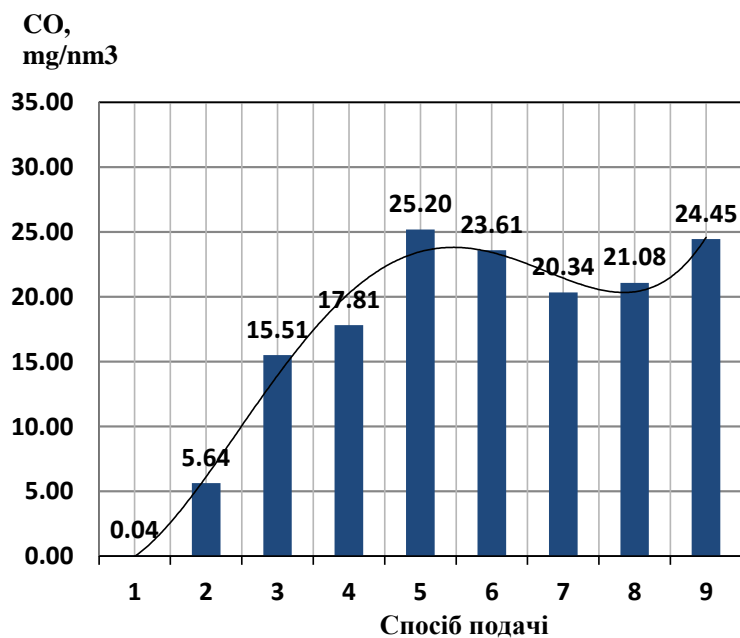


Рисунок 4.37 – Масові концентрації монооксиду вуглецю CO в вихідному перерізі жарової труби

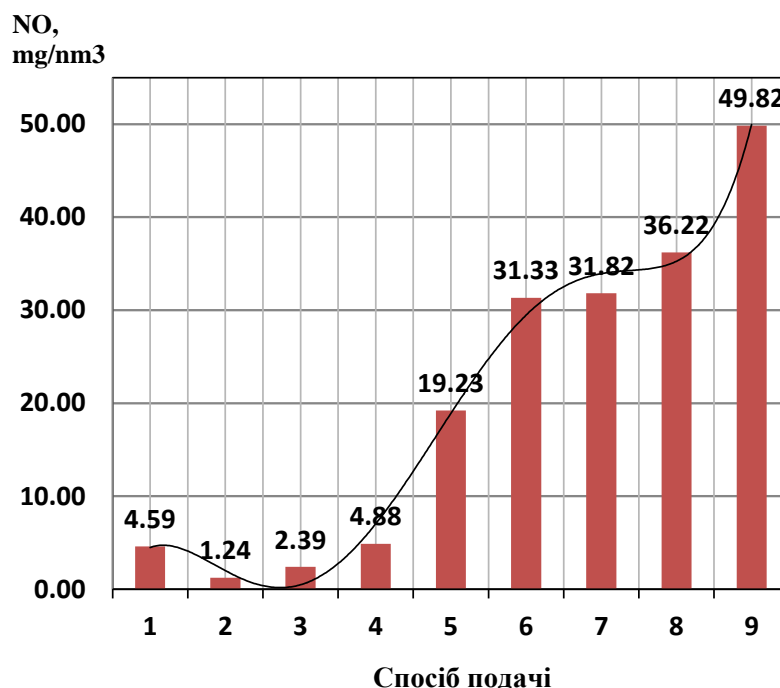


Рисунок 4.38 – Масові концентрації оксиду азоту NO в вихідному перерізі жарової труби

Видно, що перехід з газоподібного палива до рідкого дистильованого супроводжується збільшенням концентрацій токсичних компонентів на виході камери, що обумовлено збільшенням часу на випаровування крапель та сумішоутворення випару з повітрям при збільшенні кількості рідкого палива, а також зменшенням швидкості хімічних реакцій окиснення при цьому. Однак, як показали тривимірні розрахунки, емісія токсичних компонентів для досліджених режимів роботи не перевищує Європейських стандартів на викиди газотурбінними двигунами [90].

Дані на рис. 4.36–4.38 відображають суттєву залежність викидів токсичних компонентів від режиму підведення палива. Викиди оксидів азоту монотонно зростають із збільшенням вмісту рідкого палива, а викиди монооксиду вуглецю на режимах із значною кількістю рідкого дизельного палива стабілізуються. Коефіцієнт загальної нерівномірності температурного поля за камерою згоряння має тенденцію дещо збільшуватися при переході від газоподібного палива до рідкого. Ефективність двопаливної камери згоряння може бути покращена за допомогою різних активаторів горіння, в тому числі за рахунок плазмових та



плазмохімічних пристрої [112-113]. Це особливо важливо при роботі на рідкому паливі, коли виникає необхідність додаткової стабілізації фронту полум'я і збільшення швидкості згоряння палива, що випаровується

## **Висновки по четвертому розділу**

1. Проведено тривимірні розрахунки аеродинамічної структури потоку в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД при роботі на газоподібному паливі, які дозволили виявити основні особливості формуванні зон зворотних течій в жаровій трубі камери згоряння на режимах холодної продувки та при горінні пального.

2. Розрахунковим шляхом визначено, що для двопаливних камер згоряння, в яких реалізовано принцип сухого горіння попередньо перемішаної паливно-повітряної суміші в каналах радіально-осьових завихрювачів, головну роль в утворенні оксидів азоту відіграє термічний механізм.

3. Отримано нові дані з розподілу температур, концентрацій продуктів повного згоряння і токсичних компонентів по перерізах низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт при різних співвідношеннях витрат газоподібного пального через канали внутрішнього і зовнішнього радіально-осьових завихрювачів.

4. Найбільш раціональним з точки зору мінімізації викидів забруднюючих речовин є режим роботи камери згоряння при відношенні масових витрат газоподібного палива через канали внутрішнього і зовнішнього завихрювачів, меншому ніж 0.176. При цьому емісія токсичних компонентів на виході жарової труби складає  $< 5$  ppm для оксидів азоту та  $< 15$  ppm – для монооксиду вуглецю.

5. Отримані результати математичного моделювання двопаливної камери згоряння, що працює на рідкому паливі, довели необхідність використання малогабаритних форсунок, встановлених рівномірно в каналах радіально-осьових завихрювачів, які можуть забезпечити якісне розпилування крапель рідкого дистильного палива в діапазоні від 5 до 75 мкм з середнім діаметром 35 мкм і

менше.

6. Для розглянутих способів підведення рідкого палива за допомогою форсунок розрахункові значення емісії оксидів азоту NO та монооксиду вуглецю CO в вихідному перерізі жарової труби становлять 31-36 та 22-28 ppm відповідно. Якісне розпилювання рідкого палива забезпечує також менші значення коефіцієнта загальної нерівномірності поля температур в вихідному перерізі камери згоряння.

7. Використання повітряно-механічного способу розпилювання рідкого палива з підведенням його в вихідних перерізах радіально-осьових завихрювачів жарових труб забезпечує відсутність горіння рідкого палива в каналах завихрювачів, що збільшує надійність роботи і ресурс жарової труби та двигуна в цілому.

8. Розраховані концентрації токсичних речовин при одночасній роботі низькоемісійної камери згоряння на рідкому і газоподібному паливах при різних відношеннях їх витрат через канали радіально-осьових завихрювачів жарових труб свідчать про можливість створення двопаливних камер згоряння ГТД, що задовольняють сучасним європейським вимогам на викиди токсичних компонентів газотурбінними двигунами.

Результати досліджень поточного розділу опубліковано автором в [86, 92-95, 111-113].

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОПАЛИВНИХ НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕР ЗГОРЯННЯ З ПЛАЗМОХІМІЧНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

#### **5.1 Експериментальні дослідження енергетичних характеристик плазмохімічних елементів**

Метод плазмохімічної інтенсифікації горіння в енергетичних установках реалізується за допомогою спеціальних систем [5, 18, 75, 112, 113], що містять плазмохімічні елементи, а також джерела постачання їх електроенергією.

Зазначимо, що стосовно енергетики плазмохімічні елементи повинні мати ряд специфічних властивостей, що торкаються їх масогабаритних, потужнісних та експлуатаційних характеристики. Умови їх роботи у складі камер згоряння ГТД (високі температури та тиск робочого тіла, вібрація обладнання, можливість нагароутворень на елементах проточних частин генераторів плазми) вимагають створення надійних та довговічних конструкцій при мінімальних енерговитратах та забруднюючих викидах у навколишнє середовище.

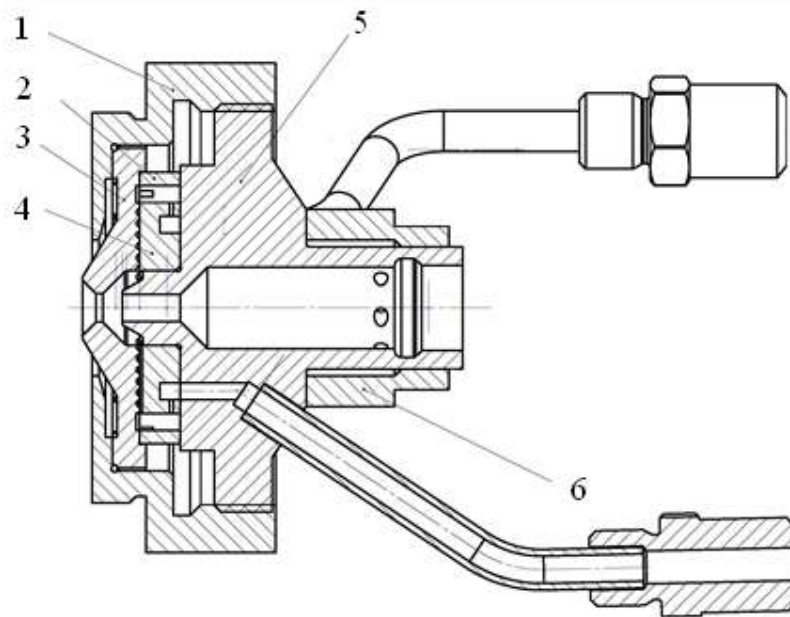
Найбільш універсальним плазмохімічним елементом для спалювання палив різного складу є плазмово-паливна форсунка (плазмохімічний стабілізатор), що дозволяє організувати взаємодію потоків низькотемпературної плазми та вуглеводневого палива (газоподібного або рідкого) у соплі або каналах форсунки.

На основі аналізу конструктивних схем плазмово-паливних форсунок, які були раніш розроблено в Національному університеті кораблебудування для інтенсифікації процесів горіння різних вуглеводневих палив [5, 18] запропоновано перспективну схему генератора низькотемпературної плазми в складі плазмохімічного елемента, що відрізняється поліпшеними енергетичними характеристиками.

Застосування слабкострумового плазмотрона як елемента двопаливної камери згоряння ГТД пред'являє до нього специфічні вимоги, основними з яких є

надійний запуск і стійка робота в широкому діапазоні зміни струму дуги і витрат плазмоутворюючого газу, високі енергетичні показники, мінімальні маси і габарити. Передбачається використання плазмового генератора не тільки як джерела займання палива (газоподібного і рідкого), але й в якості пристрою супроводу і стабілізації процесів горіння рідкого палива в низькоемісійній камері згоряння.

З огляду на це при проектуванні генератора низькотемпературної плазми і виборі конструктивної схеми запропоновано використання слабкострумowego плазмотрона постійного струму, який може забезпечити широкий діапазон зміни робочих параметрів двопаливної камери згоряння ГТД. Схема плазмового генератора в складі плазмохімічного елемента для розпилювання палив показана на рис. 5.1.



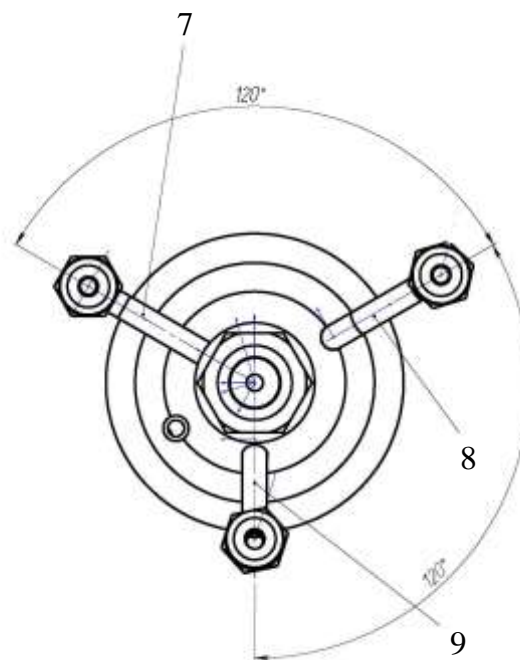


Рисунок 5.1 – Конструктивна схема плазмохімічного елемента:

1 - ковпак; 2 - завихрювач; 3 - сопло; 4 - вставка; 5 - анод; 6 - втулка; 7 - трубка підведення плазموутворюючого газу; 8 - трубка підведення повітря; 9 - трубка підведення палива

Розроблений плазмохімічний елемент з вбудованим плазмовим генератором працює наступним чином. Плазموутворююче повітря по трубці 7 підводиться до розрядної камери плазмового генератора через тангенціальні отвори. Закручене повітря сприяє переміщенню електричної дуги по внутрішній поверхні анода 5, тим самим зменшуючи час контакту дуги з електродами та підвищуючи їх ресурс. Відзначимо, що робочий струм електричної дуги вибирається в межах 100-900 мА, тому ресурс роботи такого слабкострумowego генератора буде значно більшим за ресурс плазмотронів постійного струму, що раніше використовувались в системах плазмохімічної інтенсифікації [5, 25]. Паливо (газоподібне або рідке) подається по трубці 9 в спеціальні перехресні канали, куди також по трубці 8 подається розпилювальне повітря. В перехресних каналах паливо ефективно перемішується з повітрям і на виході з сопла 3 утворюється паливно-повітряна суміш, яка з внутрішньої сторони піддається впливу низькотемпературної повітряної плазми. Низькотемпературна плазма забезпечує ефективно займання паливно-повітряної суміші, додаткове розпилювання рідкого

палива (за рахунок високої кінетичної енергії плазмової струмини), а також впливає на кінетику реакцій окиснення основного палива, прискорюючи її за рахунок наявності великої кількості активних проміжних з'єднань (атомів і радикалів).

Для досліджень впливу складу паливно-повітряної суміші на характеристики електричної дуги передбачено підведення палива (як рідкого, так в газоподібного) в канал плазмового генератора. Постійна масова витрата плазмоутворюючого повітря підтримується за допомогою регулюючого клапана ротаметра. Фото плазмохімічного елемента показано на рис. 5.2.



Рисунок 5.2 – Фото плазмохімічного елемента

Генератор повітряної плазми може застосовуватися не тільки у якості джерела займання, але і як пристрій супроводження і стабілізації процесів горіння основного палива в паливоспалюючих пристроях. Тому важливим етапом проведення експериментальних досліджень є визначення зони стійкого горіння електричної дуги плазмотрона, яка залежить від потужності джерела живлення та витрати плазмоутворюючого повітря [114, 115].

Основними задачами експериментальних досліджень генераторів повітряної плазми є визначення витратних та вольт-амперних характеристик плазмового генератора при роботі на плазмоутворюючому повітрі [113].

Генератор повітряної плазми являє собою пристрій генерації низькотемпературної плазми, який в якості плазмоутворюючого середовища використовує повітря або суміш повітря з паливом.

На першому етапі експериментальні дослідження проводились для декількох значень витрати плазмоутворюючого повітря, що регулювалася за допомогою ротаметра 11 (рис. 2.1), а тиск повітря у каналі фіксувався за допомогою манометра 10. За показниками ротаметра та манометра обчислювалася витрата плазмоутворюючого повітря. Сила струму електричної дуги генератора повітряної плазми регулювалася за показниками амперметра блока живлення БЖ у межах від 0 до 0,9 А з кроком 0,1 А. Значення напруги фіксувалися вольтметром.

В ході випробувань отримано вольт-амперні характеристики для різних витрат плазмоутворюючого повітря, що наведені на рис. 5.3.

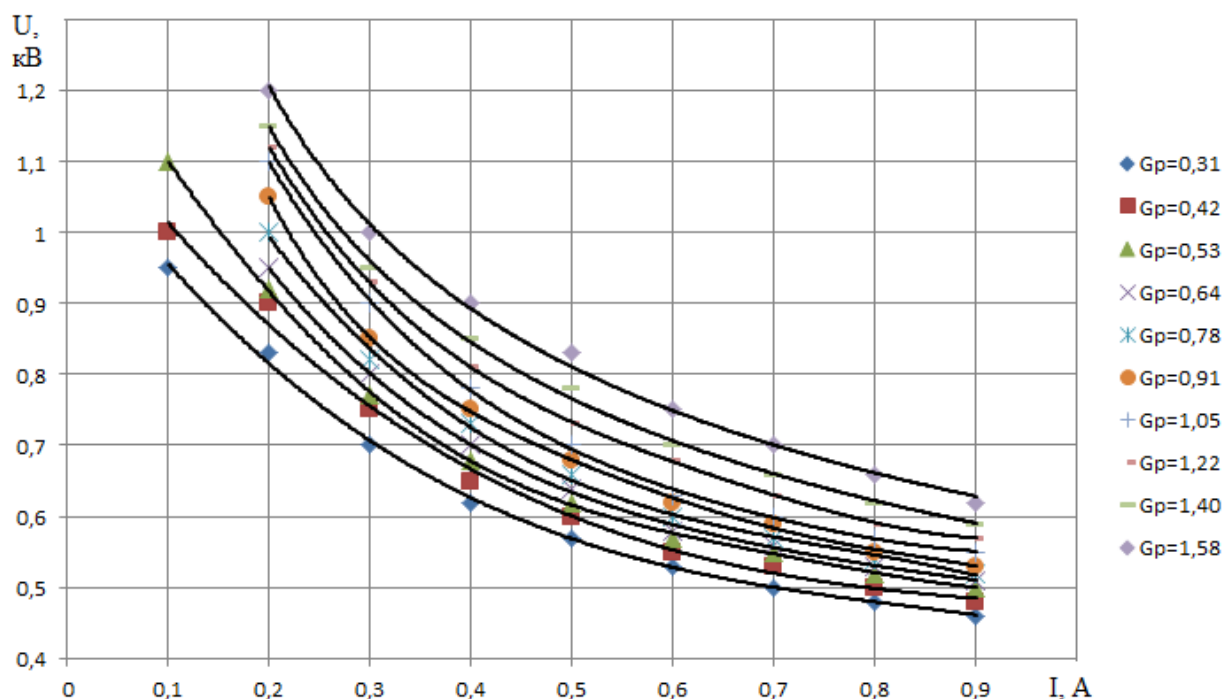


Рисунок 5.3 – Вольт-амперна характеристика плазмотрона при різних витратах плазмоутворюючого повітря  $G_p$  (г/с)

Відмітимо, що напруга пробією електричної дуги при запуску плазмохімічного елемента в атмосферних умовах перевищує 5 кВ. Робоча напруга електричної дуги при сталій роботі плазмотрона даної геометрії в інтервалі споживаної потужності 80-800 Вт складає 1,8-0,4 кВ.

Діапазон зміни сили струму для витрат плазмоутворюючого повітря  $G_p$  від 0,31 до 0,42 г/с знаходився у межах від 0,1 до 0,9 А, а для витрат плазмоутворюючого повітря від 0,64 до 1,58 г/с - у межах від 0,2 до 0,9 А. При цьому для здійснення процесу запуску плазмотрона напруга на електродах збільшувалася до 1,5-2,0 кВ.

На рис. 5.4 наведено залежність потужності електричної дуги від сили струму для різних витрат плазмоутворюючого повітря.

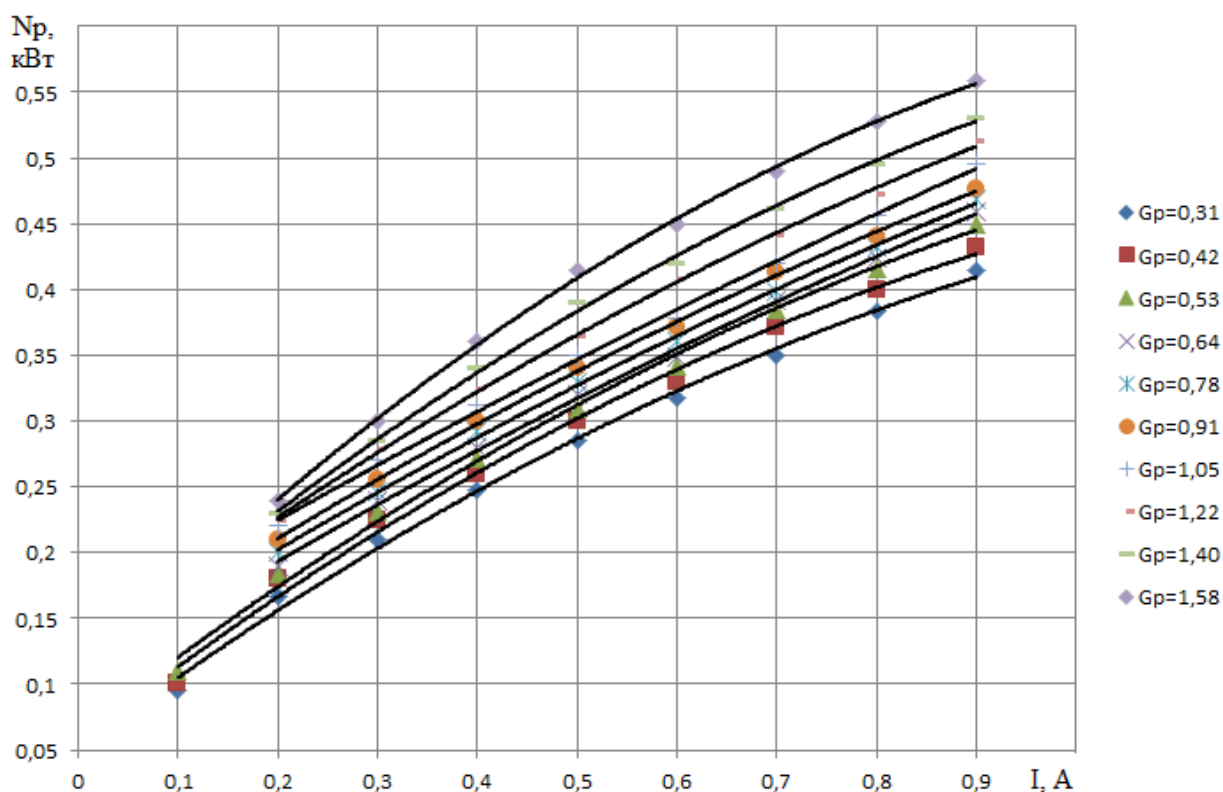


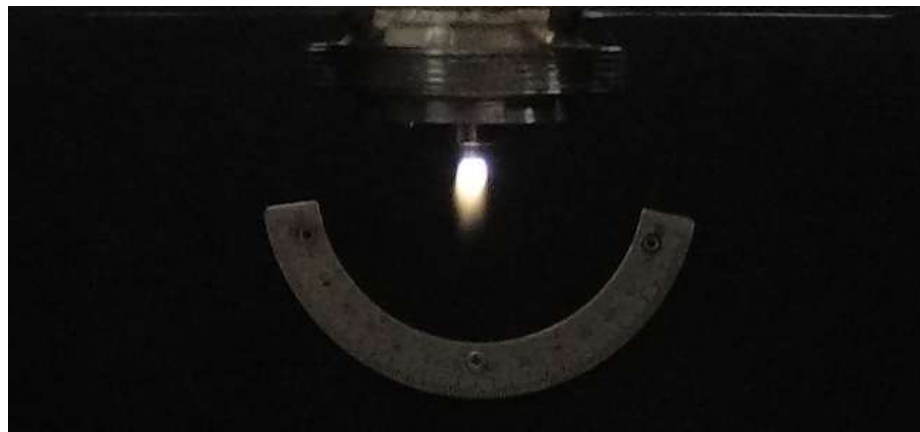
Рисунок 5.4 – Залежність потужності електричної дуги для різних витрат плазмоутворюючого повітря  $G_p$  (г/с)

Мінімальне значення сили струму при пробії електричної дуги збільшується від 0,1 до 0,2 А при зростанні витрати плазмоутворюючого повітря



більше 0,64 г/с, а максимальне значення 0,9 А обмежено потужністю блоку живлення.

На рис. 5.5 показано зміну довжини плазмового факела в залежності від потужності джерела живлення при витраті плазмоутворюючого повітря 0,57 г/с.



(а)



(б)

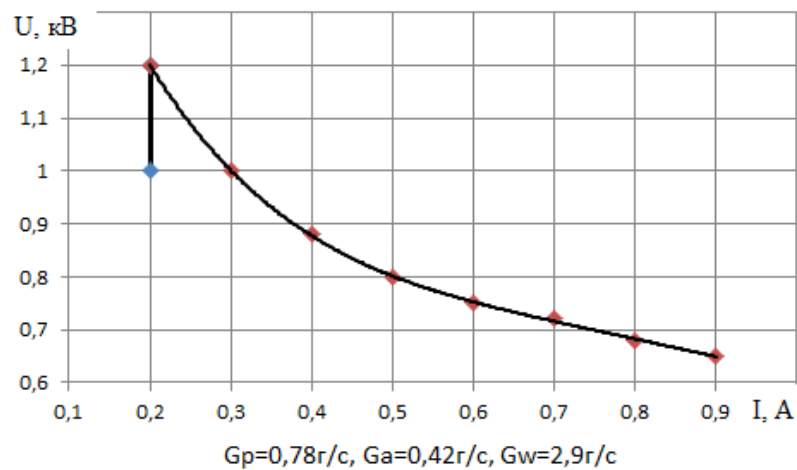


(в)

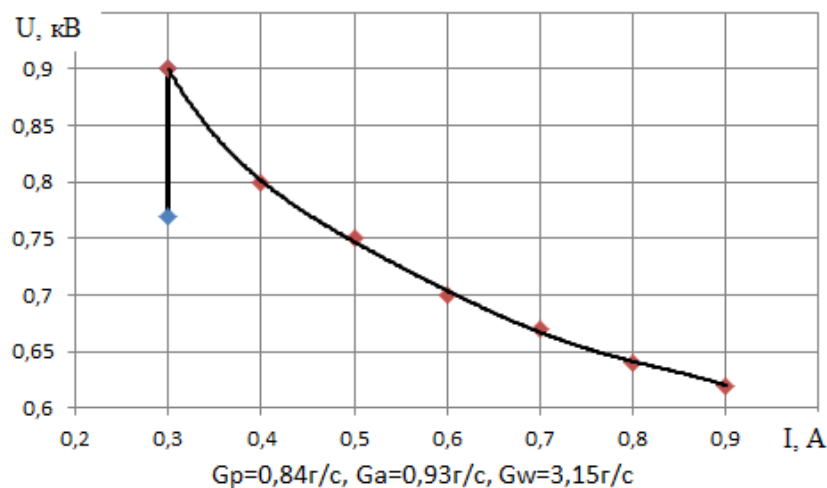
Рисунок 5.5 – Зміна довжини плазмового факелу при зростанні потужності джерела живлення від 120 до 225 Вт

На другому етапі на стійких режимах роботи плазмового генератора, що встановлені у ході випробувань на першому етапі, в канал плазмохімічного елемента подавалося додаткове (розпилююче) повітря та вода, що імітувала рідке паливо (рис. 5.6).

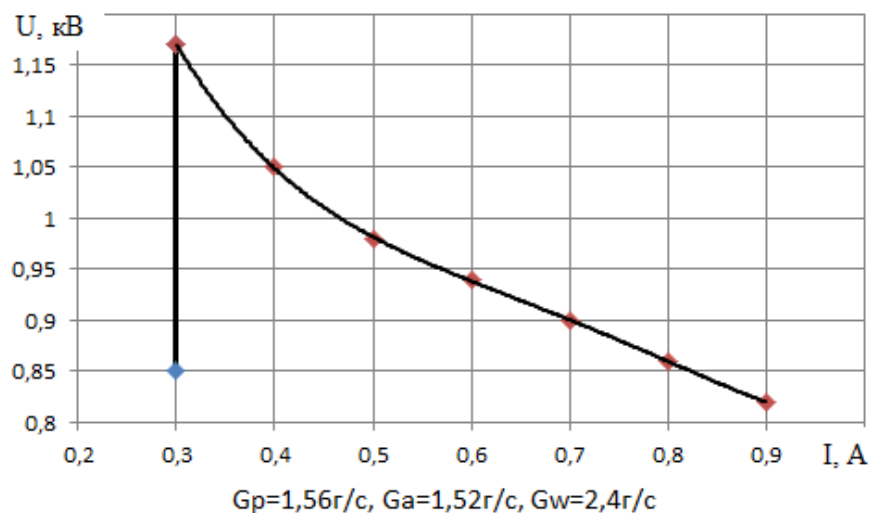
При додатковому підведенні розпилюючого повітря (витрата  $G_a = 0,42$  г/с) та води (витрата  $G_w = 2,9$  г/с) напруга пробою електричної дуги на режимі 0,2 А зростала від 1,0 до 1,2 кВ (вертикальна лінія на рис. 5.6, а). Відмітимо, що напруга пробою електричної дуги пропорційно збільшується зі зростанням витрати розпилюючого повітря і води (рис. 5.6, б, в).



(а)



(б)



(b)

Рисунок 5.6– Вольт-амперні характеристики плазмохімічного елемента при підведенні розпилюючого повітря і води:

а –  $G_p = 0,78$ ; б –  $0,84$ ; в –  $1,56$  г/с

Вольт-амперна характеристика плазмохімічного елемента з підведенням додаткового повітря і води має такий самий крутопадаючий характер, як і при роботі без подачі цих середовищ, але з більшим значенням напруги на дузі.

Така залежність характерна для усіх режимів роботи плазмотрона з подачею розпилюючого повітря і води. При цьому мінімальне значення сили струму при пробіі електричної дуги при витратах плазмоутворюючого повітря  $G_p = 0,84$  г/с та розпилюючого повітря  $G_a = 0,93$  г/с збільшується з 0,2 до 0,3 А.

Таким чином, визначено діапазон сталої роботи розробленого слабкострумowego плазмохімічного елемента. Зона сталої горіння дуги плазмотрона знаходиться у межах сили струму від 0,1 до 0,9 А, а при додатковій подачі розпилюючого повітря і води мінімальне значення сили струму зростає до 0,3 А.

## 5.2 Теоретичні дослідження впливу низькотемпературної повітряної плазми на процеси в двопаливній камері згоряння ГТД

При роботі камери згоряння на режимах з використанням плазмохімічних елементів можна очікувати збільшення стабільності горіння бідних паливно-повітряних сумішей, зменшення вірогідності погасання полум'я та більш повного вигорання вуглеводневих складових палива [116, 117].

Для підвищення ефективності спалювання вуглеводневих палив в камері згоряння ГТД можливе застосування плазмових струменів, що генеруються за допомогою плазмотронів різних типів [5, 114, 115]. Через особливості, обумовлені високим температурним рівнем процесу та наявністю високих концентрацій атомів, радикалів, заряджених часток, концентраційні межі поширення полум'я збільшуються, а стабільність процесу горіння підвищується. При цьому концентрація активних центрів залежить від багатьох факторів, у тому числі від часу і ступеня контакту палива і плазми, коефіцієнта надлишку повітря в зоні контакту, температури повітряної плазми, виду палива та ін. [5]. Реакції, що відбуваються при змішуванні низькотемпературної повітряної плазми з паливом в об'ємі плазмохімічного елемента або на поверхні закрученого плазмового струменя, при певних умовах приводять до утворення понадрівноважних концентрацій атомів і радикалів (H, CH<sub>3</sub>, O, OH та ін.) і великої кількості продуктів неповного перетворення вуглеводнів (CO, H<sub>2</sub>). Продукти реакцій із зони безпосереднього контакту плазми з частиною палива швидко дифундують в зону основної паливно-повітряної суміші і сприяють інтенсифікації її горіння. У зв'язку з цим необхідно знайти способи і конструктивні рішення найбільш ефективного використання високої хімічної активності продуктів плазмохімічного факела [5, 30].

З метою визначення впливу розробленого плазмохімічного елемента на екологічні характеристики двопаливної камери згоряння ГТД проведено розрахунки емісії основних забруднюючих речовин (NO і CO) для трьох різних режимів підведення вуглеводневих палив (5, 6 та 9 в табл. 4.6), що відповідають

наступним розподілом масових витрат палив: режим 5 - 50 % рідкого та 50 % газоподібного, режим 6 - 70 % рідкого та 30 % газоподібного, режим 9 - 100 % рідкого. Для кожного з цих варіантів проаналізовано вплив добавок продуктів плазмохімічних реакцій до первинної зони камери згоряння, що відрізняються кількістю  $\beta$  (за об'ємом): 0 (без добавок); 0,005; 0,01; 0,015; 0,02. Це відповідає зменшенню енергії активації реакції окиснення вуглеводнів на 0, 6, 9, 11 та 12 % (рис. 3.1).

Відмітимо, що плазмохімічний елемент встановлюється в районі фронтового пристрою жарової труби. Для спрощення детальні процеси хімічного реагування в плазмохімічному елементі не розраховуються, а вплив плазмохімічних продуктів на процеси горіння вуглеводнів в двопаливній камері згоряння моделюється тільки з урахуванням зменшення енергії активації реакцій окиснення (3.11) та (3.16).

З використанням розробленої раніше математичної моделі двопаливної камери згоряння ГТД з плазмовим супроводом проаналізовано вплив добавок різної кількості плазмохімічних продуктів в первинну зону камери згоряння для ряду режимів подачі газоподібного і рідкого палив.

Результати числового моделювання процесів в двопаливній низькоемісійній камері згоряння показали, що добавки термохімічних продуктів позитивно впливають на характер вигорання палива повздовж жарової труби камери згоряння. Найбільш раціональними з точки зору енерговитрат на функціонування плазмової системи є режими роботи при  $\beta = 0,01$  та  $0,015$ .

На рис. 5.7–5.8 представлено розподіл температур продуктів горіння в вихідному перерізі жарової труби відповідно для двох характерних режимів подачі палива 9 та 5. Видно, що при добавках плазмохімічних продуктів середня інтегральна температура газів на виході практично не змінюється.

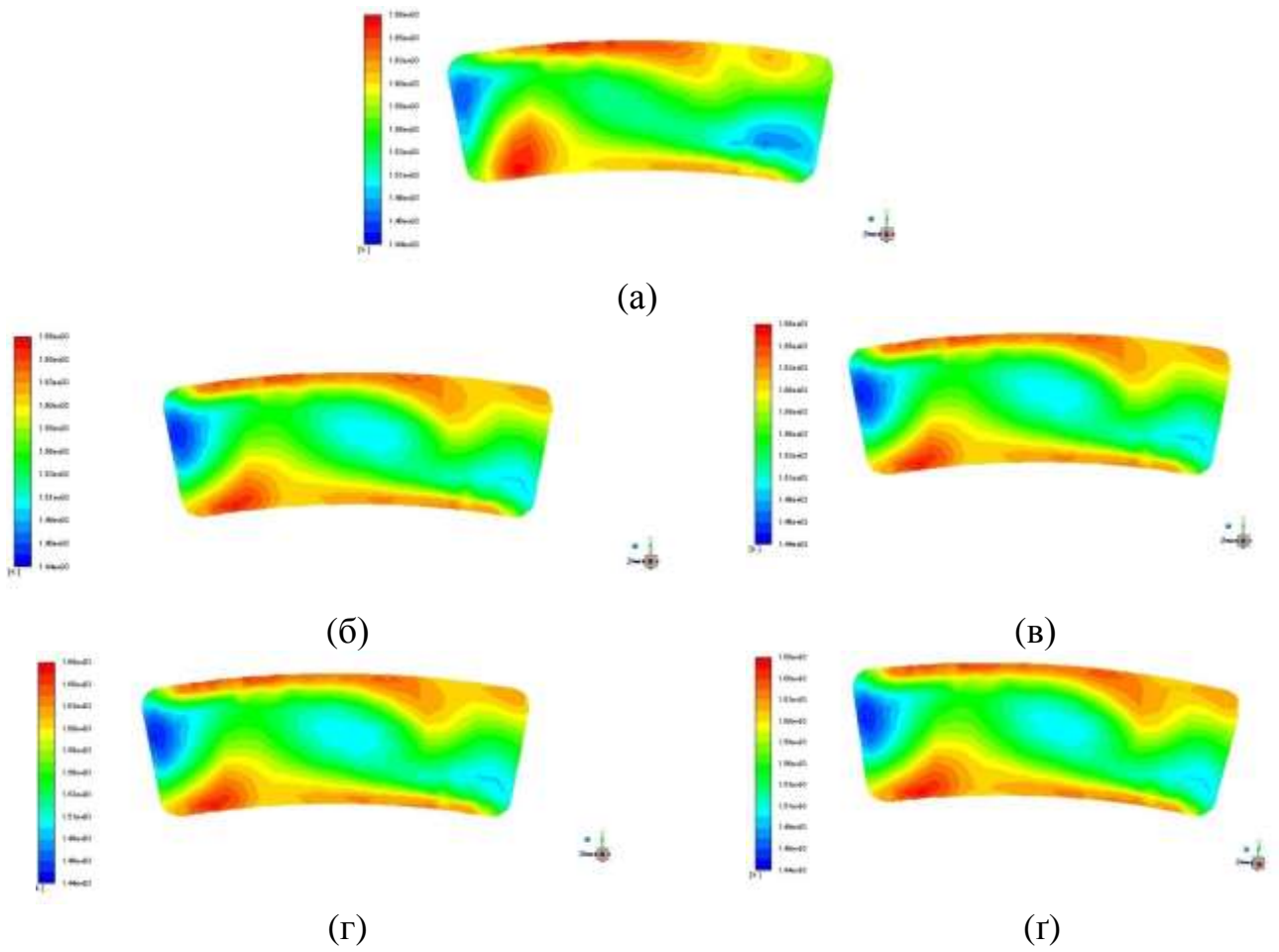
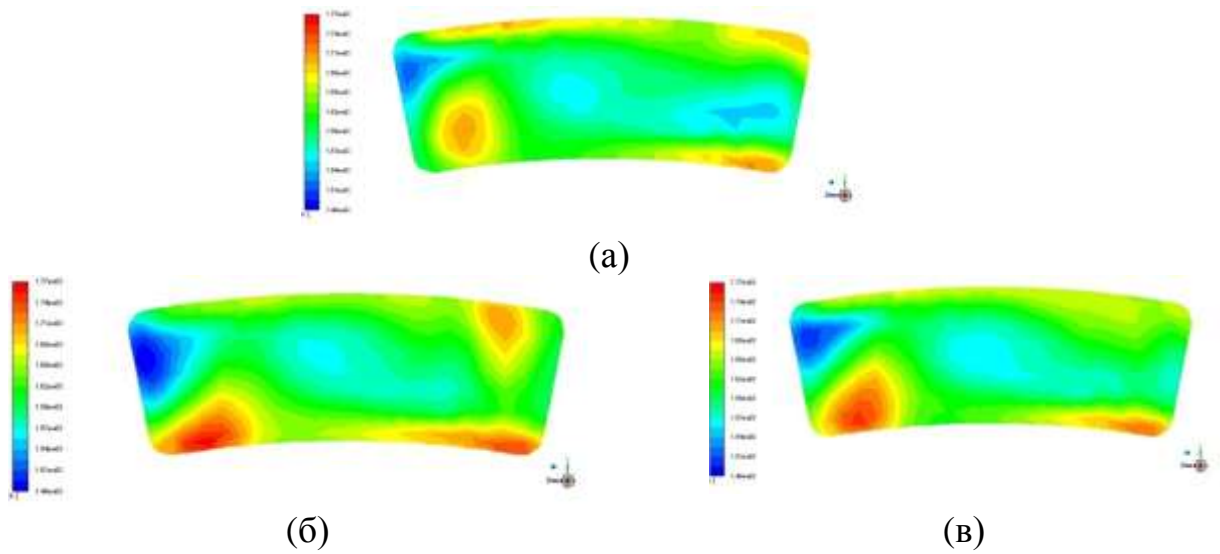


Рисунок 5.7 – Розподіл температур (К) в вихідному перерізі для режиму 9:

а – базовий варіант без добавок плазмохімічних продуктів;  
 б –  $\beta = 0,005$ ; в –  $\beta = 0,01$ ; г –  $\beta = 0,015$ ; г –  $\beta = 0,02$



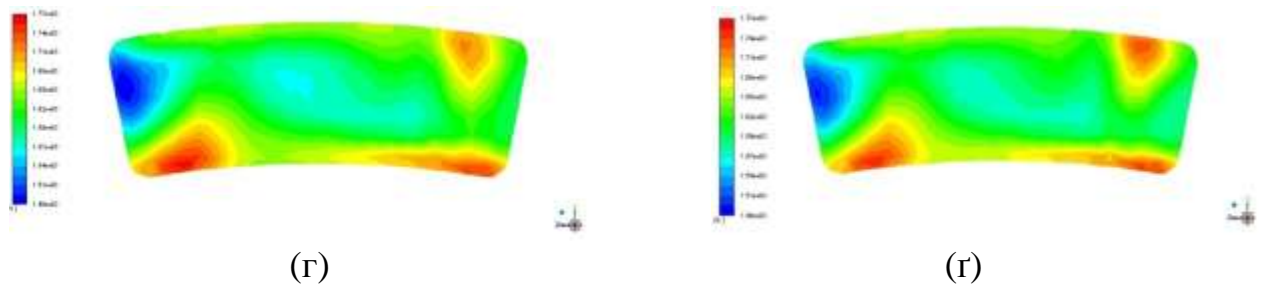


Рисунок 5.8 – Розподіл температур (К) в вихідному перерізі для режиму 5:

а – базовий варіант без добавок плазмохімічних продуктів;  
 б –  $\beta = 0,005$ ; в –  $\beta = 0,01$ ; г –  $\beta = 0,015$ ; д –  $\beta = 0,02$

На рис. 5.9–5.10 представлено розподіл концентрацій монооксиду вуглецю в вихідному перерізі жарової труби відповідно для режимів підведення палива 9 та 5. Видно, що при добавках плазмохімічних продуктів в кількості  $\beta \geq 0,005$  має місце значне зменшення емісії монооксиду вуглецю CO в результаті реакцій окиснення вуглеводнів, що активно протікають.

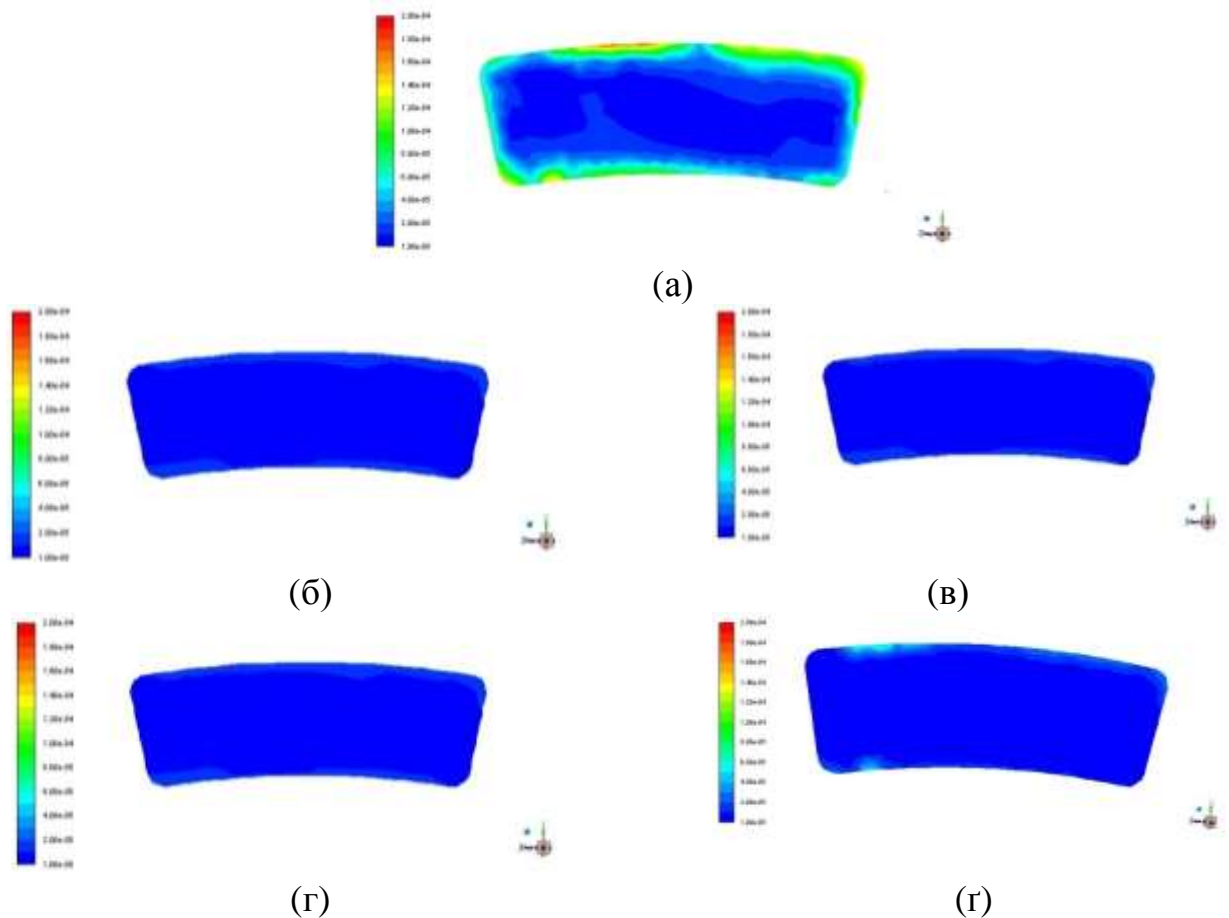


Рисунок 5.9 – Об'ємні концентрації CO в вихідному перерізі для режиму 9:

а – без добавок; б –  $\beta = 0,005$ ; в –  $\beta = 0,01$ ; г –  $\beta = 0,015$ ; д –  $\beta = 0,02$

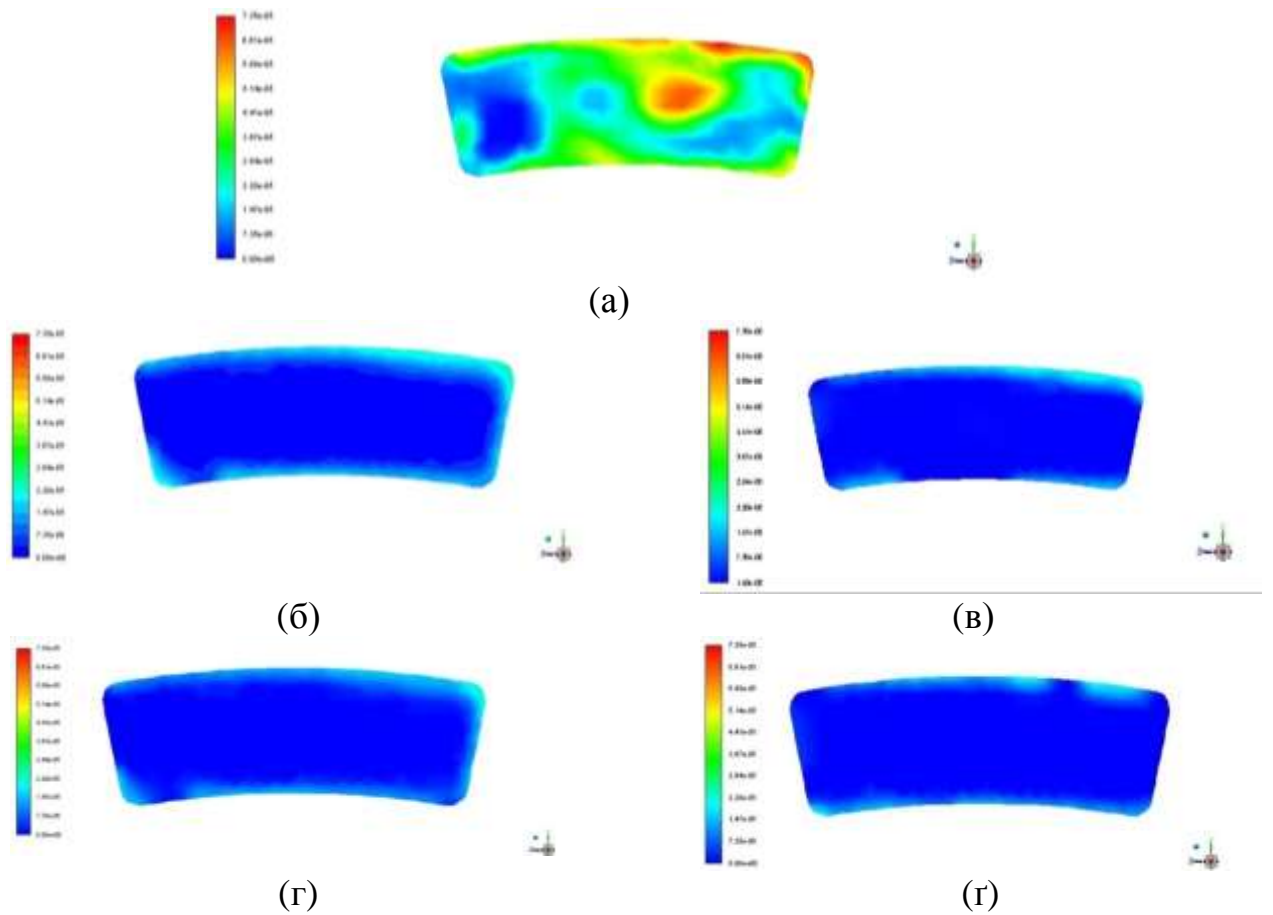
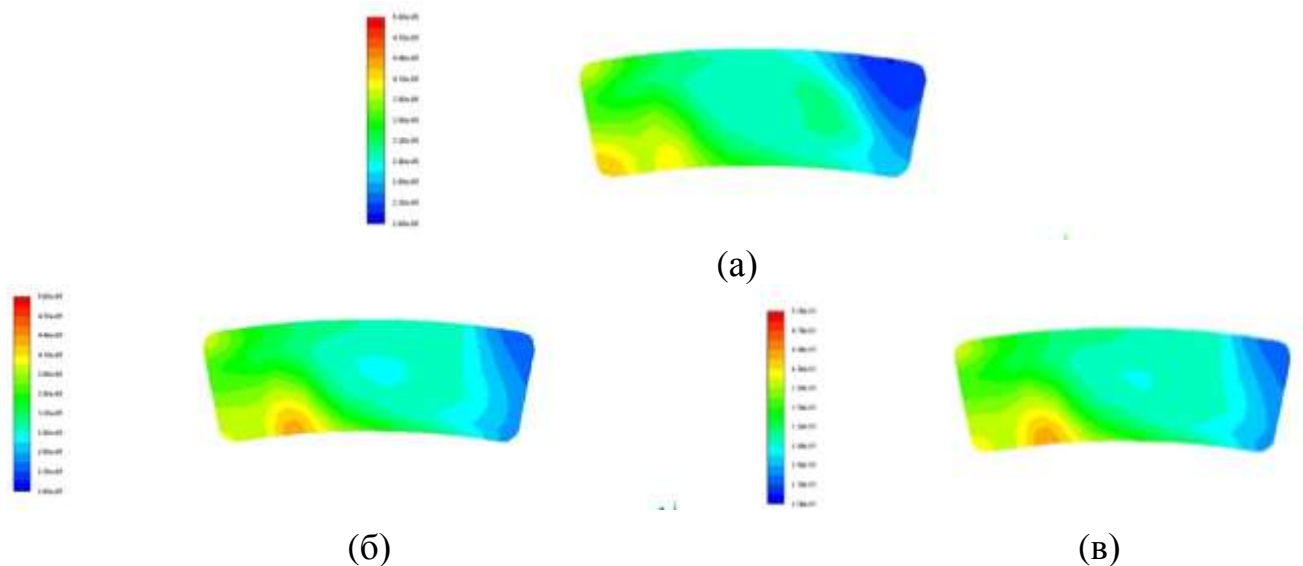


Рисунок 5.10– Об’ємні концентрації CO в вихідному перерізі для режиму 5:

а – без добавок; б –  $\beta = 0,005$ ; в –  $\beta = 0,01$ ; г –  $\beta = 0,015$ ; г –  $\beta = 0,02$

На рис. 5.11–5.12 представлено розподіл концентрацій оксиду азоту NO в вихідному перерізі жарової труби відповідно для режимів підведення палива 9 та 5. Видно, що при добавках плазмохімічних продуктів розподіл оксидів азоту на виході камери згоряння змінюється незначно.





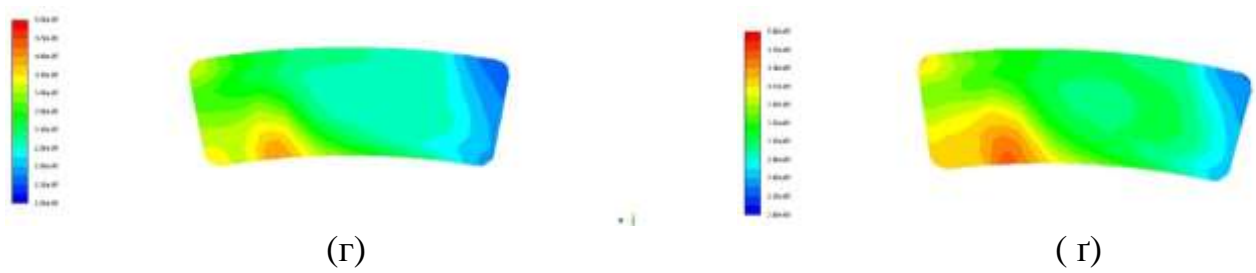


Рисунок 5.11 – Об’ємні концентрації NO в вихідному перерізі для режиму 9:  
 а – без добавок; б –  $\beta = 0,005$ ; в –  $\beta = 0,01$ ; г –  $\beta = 0,015$ ; г –  $\beta = 0,02$

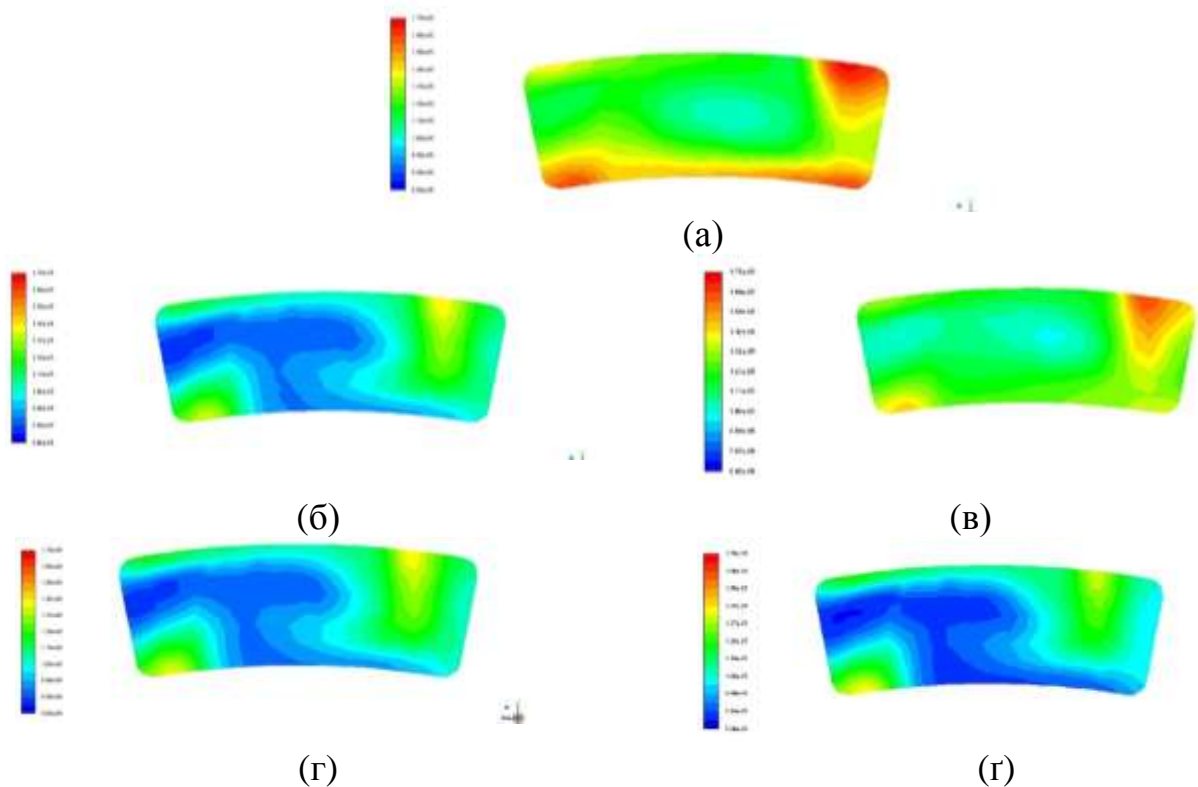


Рисунок 5.12 – Об’ємні концентрації NO в вихідному перерізі для режиму 5:  
 а – без добавок; б –  $\beta = 0,005$ ; в –  $\beta = 0,01$ ; г –  $\beta = 0,015$ ; г –  $\beta = 0,02$

#### 4.1 Основні напрямки впровадження результатів дослідження

Основні результати дисертації отримано в рамках Пріоритетних напрямків розвитку науки й техніки в Україні: напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: № ДР 119U002105 «Теоретичні основи створення двопаливних газотурбінних камер

згоряння з плазмовим супроводом», 2019-2021 рр. та № ДР 0120U105003 «Розробка передової технології SOFC-GT для суднових енергосистем», 2020 р., в яких автор приймав участь в якості виконавця. Впровадження результатів досліджень, представлених у дисертації, здійснювалося виконанням двох вищеназваних науково-дослідних робіт шляхом розробки практичних рекомендацій щодо вдосконалення характеристик двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД.

У ході виконання науково-дослідних робіт виявлено характерні недоліки, пов'язані з недостатньою ефективністю та відносно високими рівнями викидів токсичних компонентів, особливо на часткових режимах роботи двигуна ДН-80 потужністю 25 МВт виробництва ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв). З метою вдосконалення характеристик камер згоряння та двигуна в цілому, а також оцінки можливості його переведення на рідке паливо та використання ГТД у двопаливному варіанті проведено відповідні тривимірні розрахунки характеристик камери згоряння з використанням розробленої в дисертації моделі.

На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлено розподіл температур (рис. 5.13), концентрацій монооксиду вуглецю CO (рис. 5.14) та оксидів азоту NO (рис. 5.15) у вихідному перерізі двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт для різних варіантів (див. розділ 4.2) підведення палива (без та з добавками продуктів плазмохімічних реакцій в первинну зону камери).

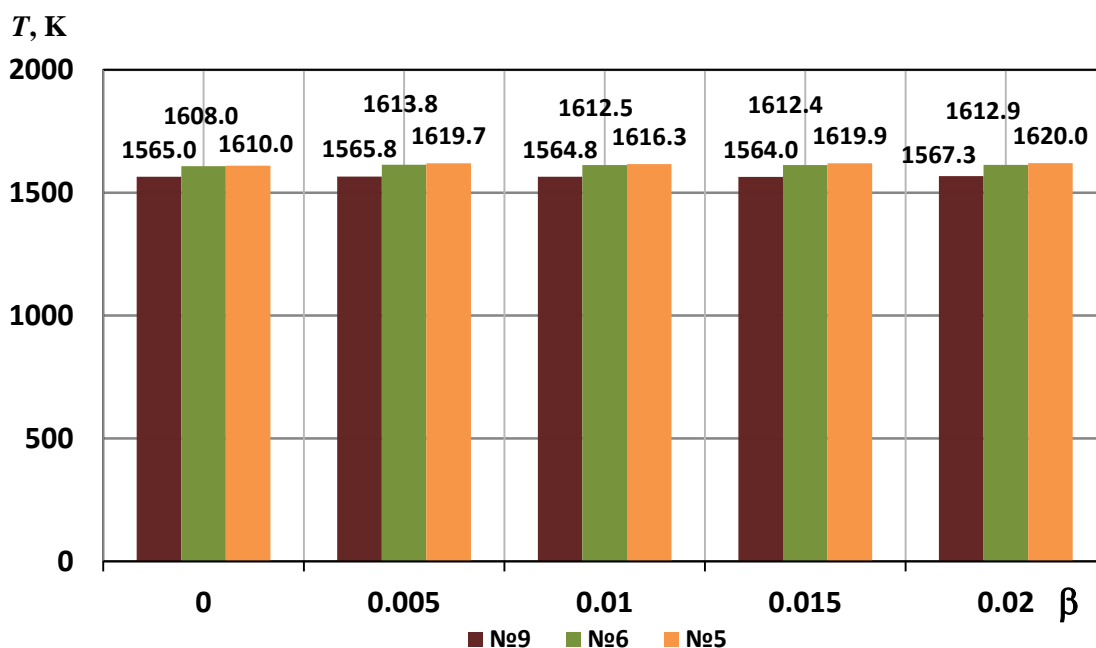


Рисунок 5.13 – Залежності температур у вихідному перерізі жарової труби від кількості добавок плазмохімічних продуктів  $\beta$  для режимів 9, 6 та 5

Аналіз приведених залежностей дозволив виявити, що при добавках продуктів плазмохімічного елемента в первинну зону двопалиної камери згорання ГТД температура на виході жарової труби має незначне підвищення (менше 1 %) у порівнянні з варіантом без добавок плазмохімічних продуктів. Для всіх трьох досліджених режимів підведення палив (9, 6 та 5) спостерігається значне зменшення вмісту монооксиду вуглецю CO (з 25-28 до 4,6-3,9 ppm) навіть при невеликій кількості плазмохімічних продуктів ( $\beta = 0,005$ ). Подальше збільшення кількості плазмохімічних продуктів до  $\beta = 0,02$  практично не впливає на викиди CO, так як вони знаходяться на мінімальному (практично нульовому) рівні.

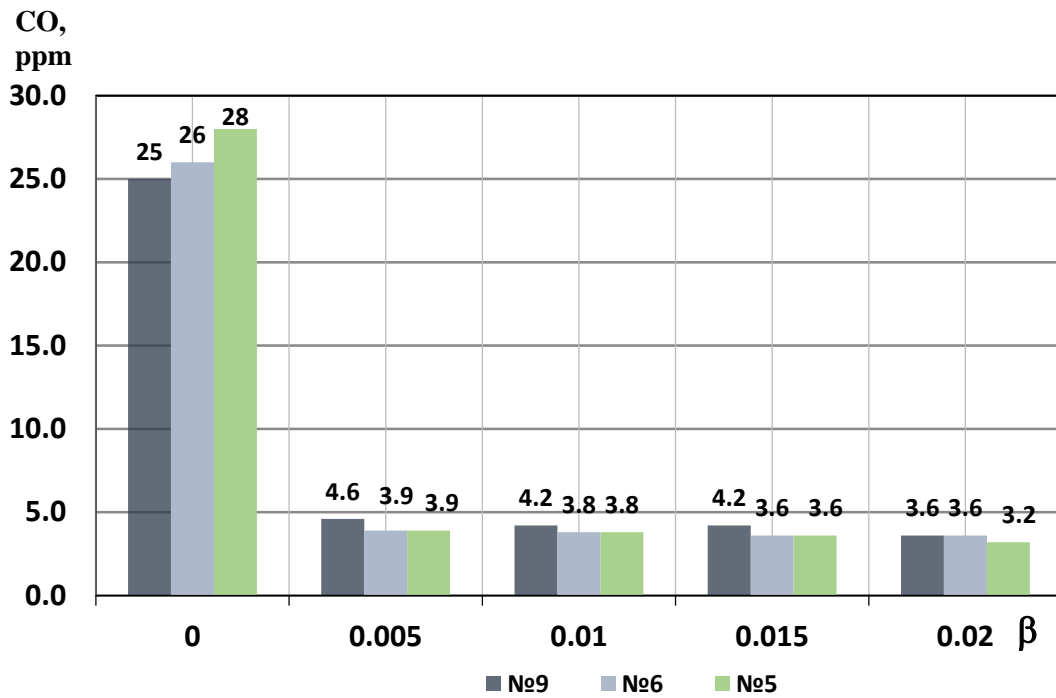


Рисунок 5.14 – Залежності об’ємних концентрацій CO в вихідному перерізі від кількості добавок плазмохімічних продуктів  $\beta$  для режимів 9, 6 та 5

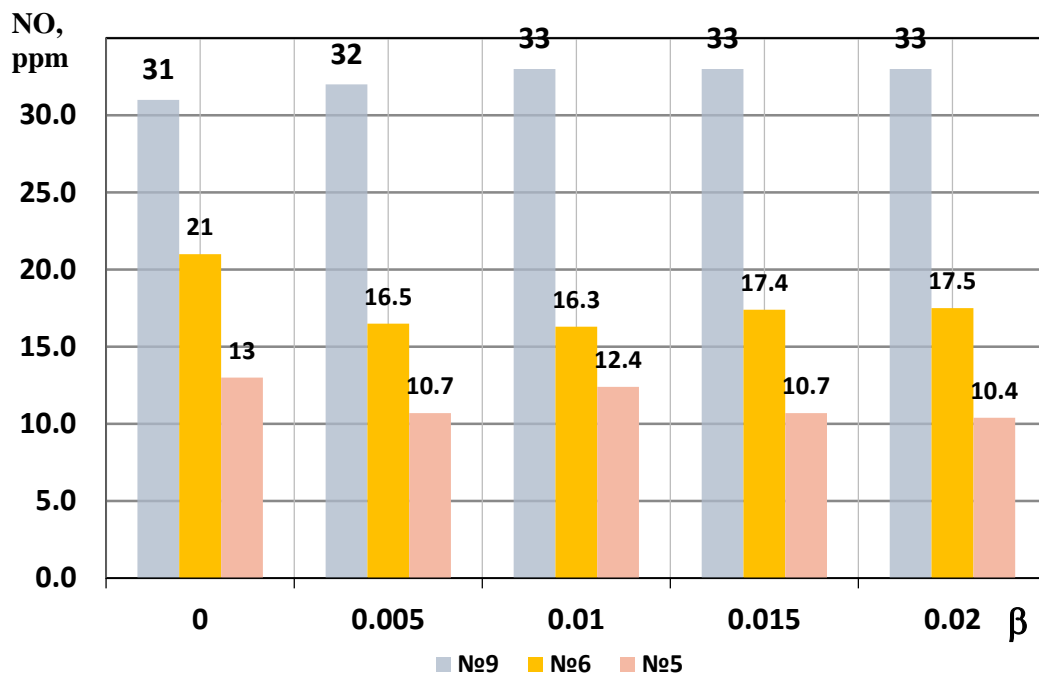


Рисунок 5.15– Залежності об’ємних концентрацій NO в вихідному перерізі від кількості добавок плазмохімічних продуктів  $\beta$  для режимів 9, 6 та 5

Виявлено, що емісія оксидів азоту для режиму 9 (100 % рідкого палива) не залежить в значній мірі від наявності термохімічних продуктів, проте для

режимів 6 та 5 (одночасне підведення рідкого та газоподібного палив) концентрації оксидів азоту у вихідному перерізі дещо зменшуються (з 21 до 17 ppm для режиму 6 та з 13 до 11 ppm для режиму 5).

Проведені в ході досліджень розрахунки двопаливної камери згоряння, яка працює на рідкому, або на суміші рідкого та газоподібного палив, показали, що наявність крапель рідкого палива в каналах радіально-осьових завихрювачів призводить до збільшення температури стінки жарової труби і в деяких випадках – до попадання крапель незгорілого рідкого палива на стінки. Напрямоком підвищення ефективності процесів горіння і зменшення температурного навантаження стінок жарової труби двопаливних камер згоряння є використання перспективного конвективного охолодження стінок жарової труби замість традиційно плавкового охолодження [118].

Практична конструктивна схема камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт виробництва ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” (м. Миколаїв) з конвективною системою охолодження та модифікованим фронтним пристроєм зі встановленим плазмохімічним елементом показана на рис. 5.16.

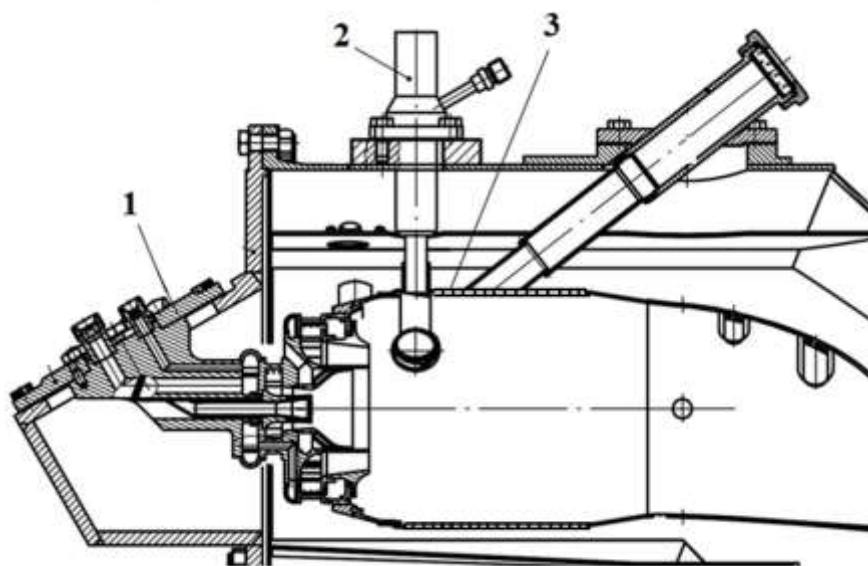


Рисунок 5.16 – Схема розташування плазмохімічного елемента в низькоемісійній камері згоряння з конвективним охолодженням:

1 – пальників пристрій; 2 – плазмохімічний елемент; 3 – жарова труба

Порівняно з серійною камерою згоряння запропоновано наступні конструктивні зміни:

1. Плазмохімічний елемент для більш зручного монтажу встановлено на зовнішньому корпусі камери згоряння, а продукти плазмохімічних перетворень подаються в первинну зону камери згоряння через отвори полум'яперекидних патрубків.

2. Підведення рідкого палива в канали зовнішнього і внутрішнього завихрювачів жарової труби здійснюється через трубки або форсунки загальною кількістю 30 штук., рівномірно розташованих в каналах завихрювачів.

3. Плівкова система охолодження серійної жарової труби замінена на конвективну, що дозволяє скоротити відносну витрату повітря на охолодження жарової труби на 1-1,5 % [118]. Конвективна система охолодження являє собою кільцевий канал товщиною 5 мм, в який через ряд отворів діаметром 0,8 мм подається повітря з міжтрубного простору. Отвори розташовані рівномірно у шаховому порядку. Розташування отворів може змінюватись залежно від необхідності більш інтенсивного охолодження окремих ділянок жарової труби.

Відмітимо, що в перерішеній час газотурбінні двигуни і установки на їх основі часто використовуються як судові енергетичні установки для суден типу Floating production storage and offloading (FPSO) [91, 111]. Використання двопаливних ГТД з огляду призначення судна є одним із можливих напрямків підвищення маневреності та надійності енергетичної установки, наприклад, при зміні основного виду палива під час експлуатації. Тому питання підвищення ефективності енергоустановок суден FPSO є актуальним для морської, газової та нафтової промисловості, а використання двопаливних низькоемісійних двигунів – необхідною умовою проектування сучасних енергетичних модулів плавучих об'єктів нафтогазовидобутку.

Отримані результати з моделювання робочих процесів у двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД, що працюють на газоподібному і рідкому паливах, становлять інтерес для науково-дослідних, проєктних та конструкторських організацій, які займаються розробкою та створенням ГТД і

установок на їх основі.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено при проектуванні конкурентоздатних вітчизняних газотурбінних установок з метою їх подальшого використання в якості мобільних засобів комплексного та швидкого забезпечення енергією об'єктів морської інфраструктури (ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», м. Миколаїв), при аналізі схемних рішень перспективних суднових ГТД та виконанні проектних розробок концептуальних суден (“Zaliv Ship Design”, м. Миколаїв), в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”, освітні програми “Турбіни” і “Газотурбінні установки і компресорні станції” в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв.

Відмітимо, що подальший розвиток наукових досліджень за тематикою дисертації може бути спрямований на:

- удосконалення кінетичних моделей хімічного реагування різних палив (газоподібних, рідких, альтернативних) в плазмохімічному елементі, які повинні містити хімічні реакції з проміжними з'єднаннями, атомами, радикалами, зарядженими частками;

- розробку більш досконалої моделі розпилювання рідкого палива, розпаду та коагуляції крапель рідкого палива в повітряному потоці;

- урахування електромагнітних явищ при генерації низькотемпературної плазми;

- проведення експериментальної перевірки працездатності запропонованих пристроїв в реальних умовах експлуатації ГТД.

## **Висновки по п'ятому розділу**

1. Розроблено конструкцію плазмохімічного елемента з покращеними енергетичними характеристиками для інтенсифікації процесів змішування

паливно-повітряних сумішей та збільшення швидкості хімічного реагування в двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД.

2. Проведено експериментальні дослідження енергетичних характеристик генератора повітряної плазми плазмохімічного елемента без підведення та з підведенням розпилюючого повітря і води, що імітує рідке паливо.

3. Отримано вольт-амперні характеристики плазмового генератора плазмохімічного елемента для різних витрат плазмоутворюючого і розпилюючого повітря та води, які у всіх випадках мають крутопадаючий характер. Встановлено, що при додатковій подачі розпилюючого повітря і води у канал плазмового генератора напруга пробою електричної дуги підвищується.

4. Визначено діапазон сталої роботи слабкострумового плазмотрону постійного струму. Зона сталого горіння дуги плазмотрона знаходиться у межах сили струму від 0,1 до 0,9 А, а при додатковій подачі розпилюючого повітря і води мінімальне значення сили струму зростає до 0,3 А.

5. Напруга пробою електричної дуги при запуску плазмового генератора в атмосферних умовах перевищує 5 кВ. Робоча напруга електричної дуги при сталій роботі плазмотрона даної геометрії в інтервалі споживаної потужності 80-800 Вт дорівнює 1,8-0,4 кВ.

6. Проведено тривимірні розрахунки характеристик двопаливної низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт, що використовує для активації процесів горіння вуглеводнів плазмохімічні елементи.

7. Отримано розподіли температур, концентрацій продуктів повного згоряння і токсичних компонентів по перерізах двопаливної камери згоряння для різних режимів підведення рідкого та газоподібного палив через канали внутрішнього і зовнішнього завихрювачів жарової труби з урахуванням різної кількості плазмохімічних продуктів, що впорскуються в первинну зону камери.

8. Виявлено інтенсифікуючий вплив плазмохімічних продуктів на ефективність процесів горіння паливно-повітряних сумішей в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД. Отримані результати математичного моделювання показали, що добавка плазмохімічних продуктів в кількості  $\beta \geq$



0,005 забезпечує значне зменшення концентрацій монооксиду вуглецю CO в вихідному перерізі жарової труби: з 25-28 до 3,9-4,6 ppm.

9. Для досліджених режимів роботи двопаливної камери згоряння ГТД наявність плазмохімічних елементів мало впливає на температурні параметри паливоспалюючого пристрою.

10. Розроблені практичні рекомендації щодо використання плазмохімічних елементів в двопаливних низькоемісійних камер згоряння стосовно до ГТД ДН-80 виробництва ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” (м. Миколаїв) дозволять підвищити ефективність спалювання вуглеводневих палив, що відрізняються фазовим станом, значно зменшити емісію моноксиду вуглецю і забезпечити екологічні параметри у відповідності з сучасними міжнародним нормам на викиди газотурбінними двигунами.

11. Визначено напрямки подальших досліджень з удосконалення робочого процесу в двопаливних камерах згоряння з плазмохімічними елементами.

Результати досліджень поточного розділу опубліковано автором в [91, 111 – 113].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі сформульовано та розв'язано актуальну науково-технічна задачу підвищення ефективності двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД за рахунок використання низькотемпературної повітряної плазми для активації паливно-повітряних сумішей. В процесі проведення дисертаційних досліджень одержані наступні результати.

1. За результатами досліджень отримано нові дані, які розширили уявлення про фізико-хімічні механізми плазмової активації горіння газоподібних і рідких палив, що є підґрунтям для створення високоефективних двопаливних українських ГТД нового покоління.

2. Обґрунтовано інтенсифікуючий вплив низькотемпературної повітряної плазми на енергетичні і екологічні показники двопаливної камери згоряння ГТД з попереднім сумішоутворенням вуглеводневих палив, що відрізняються фазовим станом, з окиснювачем в каналах радіально-осьових завихрювачів жарових труб.

3. Розроблено математичну модель двофазного горіння рідкого дистильтного палива у двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД, яка дозволяє визначити траєкторії руху окремих крапель, їх нагрів, випаровування, окиснення парів з урахуванням тепломасообміну крапель газовою фазою.

4. Для моделювання процесів у двопаливній камері згоряння ГТД з плазмохімічним елементом запропоновано використовувати шестиступінчасту кінетичну схему горіння вуглеводнів, яка моделює процеси одночасного окиснення рідкого і газоподібного палив, з урахуванням впливу кількості добавок плазмохімічних продуктів на величину енергії активації.

5. На підставі отриманих нових даних з розподілу температур, концентрацій продуктів повного згоряння і токсичних компонентів по перерізах низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт при різних співвідношеннях витрат газоподібного пального через канали внутрішнього і зовнішнього радіально-осьових завихрювачів виявлено, що найбільш раціональним з точки зору мінімізації викидів забруднюючих речовин є режим роботи камери згоряння при відношенні масових витрат палива через канали

внутрішнього і зовнішнього завихрювачів, меншому ніж 0.176.

6. На підставі результатів математичного моделювання двопаливної камери згоряння, що працює на рідкому паливі, доведена необхідність використання малогабаритних форсунок, встановлених рівномірно в каналах радіально-осьових завихрювачів, які забезпечать розрахункові значення емісії оксидів азоту NO та монооксиду вуглецю CO в вихідному перерізі жарової труби 31-36 та 22-28 ppm для камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт.

7. Розроблено конструкцію плазмохімічного елемента з метою інтенсифікації процесів хімічного реагування у двопаливних низькоемісійних камерах згоряння ГТД та проведено експериментальні дослідження енергетичних характеристик генератора повітряної плазми.

8. Визначено діапазон стійкої роботи слабкострумowego плазмового генератора плазмохімічного елемента. Зона стійкого горіння електричної дуги знаходиться у межах сили струму від 0,1 до 0,9 А і зростає до 0,3 А при додатковій подачі розпилюючого повітря, при цьому робоча напруга плазмового генератора в інтервалі споживаної потужності 80-800 Вт становить 1,8-0,4 кВ.

9. На підставі результатів математичного моделювання двопаливної камери згоряння ГТД з плазмохімічним елементом отримано нові дані з розподілу основних параметрів в об'ємі жарової труби для різних режимів підведення рідкого та газоподібного палив з урахуванням кількості плазмохімічних продуктів  $\beta$ , що подаються в первинну зону камери та встановлено, що їх добавка в кількості  $\beta \geq 0,005$  забезпечує значне зменшення викидів монооксиду вуглецю CO в вихідному перерізі жарової труби: з 25-28 до 3,9-4,6 ppm.

10. Розроблені практичні рекомендації щодо використання плазмохімічних елементів у двопаливних низькоемісійних камер згоряння дозволять підвищити ефективність використання вуглеводневих палив, що відрізняються фазовим станом, значно зменшити емісію монооксиду вуглецю і забезпечити екологічні параметри у відповідності з сучасними міжнародним нормам на викиди газотурбінними двигунами.

11. Представлено напрямки подальших досліджень з удосконалення робочого процесу у двопаливних камерах згоряння з плазмохімічними елементами, пов'язані з експериментальною перевіркою тривалої працездатності запропонованих пристроїв в реальних умовах експлуатації ГТД.

12. Результати дисертаційного дослідження впроваджено при проектуванні конкурентоздатних вітчизняних газотурбінних двигунів з метою їх використання в якості мобільних енергетичних засобів комплексного та швидкого забезпечення електроенергією і теплотою об'єктів морської інфраструктури (ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», м. Миколаїв), при аналізі схемних рішень перспективних суднових ГТД та виконанні проектних розробок концептуальних суден (“Zaliv Ship Design”, м. Миколаїв), в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування” в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fontanarosa D., Mehdi G., De Giorgi M. G., Ficarella A. Assessment of the impact of nanosecond plasma discharge on the combustion of methane air flames [Text] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 197, 10001. – P. 1-12.
2. Сербин С.И. Разработка и исследование характеристик плазменно-топливных форсунок [Текст] / С.И. Сербин, Е.Ю. Кирчук // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПИ», 2010. – № 3. - С.43-49.
3. Clements R.V. An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter [Text] / R.V. Clements, P.R. Smy, J.D. Dale // Combustion and Flame. – 1981. – Vol.42. – P. 287–295.
4. Weinberg F.J. Plasma Jets in Combustion [Text] / F.J. Weinberg // Int. Conference on Combustion in Engineering. – Oxford, 1983. – P. 65–72.
5. Романовский Г.Ф. Плазмохимические системы судовой энергетики [Текст] / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин. – Николаев : УГМТУ, 1998. – 246 с.
6. Welch M. Combustion, Fuels and Emissions for Industrial Gas Turbines [Text] / M. Welch, B.M. Igoe, D. Vilson // Asia Turbomachinery & Pump Symposium, Singapore, 2016. – 15 p.
7. Warnatz J. NO<sub>x</sub> Formation in High Temperature Processes [Text] / J. Warnatz // Proc. Europ. Appl. Res. Conf. Nat. Gas. - Trondheim, Norway, 1990. – P. 450-467.
8. Davis L.B. Dry Low NO<sub>x</sub> Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines [Text] / L.B. Davis, S.H. Black // GE Power Systems. – GER-3568G . – P. 1–22.
9. Technology update on gas turbine dual fuel, dry low emission combustion systems / P.E. Rokke, J.E. Husgand, N.A. Rokke, O.N. Svendsgaard // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2003, June 16-19, Atlanta. – Paper № GT2003-38112.

10. EV-пальник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-the-Alstom-EV-burner\\_fig1\\_227302071](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-the-Alstom-EV-burner_fig1_227302071).

11. Soares C.M. Gas turbines in simple cycle & combined cycle applications [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjyoYKcvMLhAhXOo4sKHQHbDyoQFjACegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5784679122%2FGas%2Bturbines%2Bin%2Bsimple%2Bcycle%2B%2Bcombined%2Bcycle%2Bapplications.pdf&usg=AOvVaw31Q\\_9znrsv21OZDehPtbbby](https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjyoYKcvMLhAhXOo4sKHQHbDyoQFjACegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fkimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5784679122%2FGas%2Bturbines%2Bin%2Bsimple%2Bcycle%2B%2Bcombined%2Bcycle%2Bapplications.pdf&usg=AOvVaw31Q_9znrsv21OZDehPtbbby).

12. SGT-400 industrial gas turbine. Twin-shaft engine for mechanical drive and power generation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.energy.siemens.com/ru/ru/fossil-power-generation/gas-turbines/sgt-400.htm#content=%D0%9E%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5>.

13. Сербин С.И. Низкоэмиссионные камеры сгорания ГТУ: Монография / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, Н.А. Гончарова. – Николаев: издатель Торубара В.В., 2016. – 216 с.

14. Газовая турбина STG-800 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT-800/sgt-800-pg-ru.pdf>.

15. Brown J. Power Up-rating on Alstom's Tornado Industrial Gas Turbines [Text] / J. Brown // ALSTOM Industrial Gas Turbines. – 15 p.

16. Lindman O. Development of a liquid fuel combustion system for SGT-750 [Text] / O. Lindman, M. Andersson, M. Persson, E. Munktel // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014 June 16-20, 2014, Düsseldorf, Germany. – P. 2–7.

17. Сербин С.И. Экспериментальное исследование бесфорсуночного двухрегистравого фронтального устройства камеры сгорания судового ГТД [Текст]

/ С.И. Сербин, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2004. – № 4 (397). – С. 25-33.

18. Сербин С.И. Разработка и исследование характеристик плазменно-топливных форсунок [Текст] / С.И. Сербин, Е.Ю. Кирчук // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2010. – № 3. – С.43–49.

19. Massa L., Freundb J.B. Plasma-combustion coupling in a dielectric-barrier discharge actuated fuel jet [Text] // Combustion and Flame, 2017. – 184. – P. 208–232.

20. Starikovskii A.Yu., Anikin N.B., Kosarev I.N., Mintoussov E.I., Starikovskaia S.M., Zhukov V.P. Plasma-assisted combustion // Pure Appl. Chem., 2006. – Vol. 78. – No. 6. – P. 1265–1298.

21. Harrison A.J. Flame Stabilization by Plasma Jets [Text] / A.J. Harrison, F.J. Weinberg // Proc. Roy. Soc. – London, 1971. – A321. – P. 95–103.

22. Hillard I.C. Effect of Nitrogen-Containing Plasmas on Stability., NO Formation and Sooting of Flames [Text] / I.C. Hillard, E.I. Weinberg // Nature. 1976, vol. 259. – № 5544.– P. 556–557.

23. Zhang I.X. An experimental Investigation of the Effect of a Plasma Jet on a Freely Expanding Methane–Air Flame [Text] / I.X. Zhang, R.M. Clements, P.R. Smy // Combustion and Flame. – 1983. – Vol. 50. – P. 99–106.

24. Афанасьев В.В. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок [Текст] / В.В. Афанасьев, Н.И. Кидин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с.

25. Романовский Г.Ф. Плазменные системы газоперекачивающих агрегатов [Текст] / Г.Ф. Романовский, И.Б. Матвеев, С.И. Сербин – Санкт-Петербург: Недра, 1992. – 142 с.

26. Сербин С.И. Плазменные системы судовых энергетических установок [Текст] / С.И. Сербин // Судостроение. – 1997. – № 11. – С. 51–52.

27. Сербин С.И. Распределение температур в факеле плазмохимического интенсификатора горения [Текст] / С.И. Сербин, А.Н. Маринец, Ю.Н. Шаповалов // Деп. в ЦНИИ ”Румб”. – № ДР–3232. – 1990. –11 с.

28. Лаутон Дж. Электрические аспекты горения [Текст] / Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
29. Kimura I. An Experimental Investigation an Arc-Heated –d Reactor [Text] / I. Kimura, M. Imajo // Sixteenth Symp. (Int.) on Combustion. – Pittsburgh, 1976. P. 809–815.
30. Matveev I.B., Serbin S.I. Low Power DC Plasma Torches. In: Plasma Assisted Combustion, Gasification, and Pollution Control. Volume 1. Methods of Plasma Generation for PAC: Outskirts Press, Inc., 2013. – P. 131-145.
31. Gutsol A., Rabinovich A., Fridman A.. Combustion-assisted Plasma in Fuel Conversion [Text] // J. Phys. D: Appl. Phys., 2011. – Vol. 44. – 14p.
32. Plasma Fuel Nozzle as a Prospective Way to Plasma-Assisted Combustion [Text] / I.B. Matveev, S.A. Matveeva, E.Y. Kirchuk, S.I. Serbin, V.G. Bazarov // IEEE Trans. Plasma Sci. – Vol. 38. – No. 12, 2010. – P. 3313–3318.
33. Matveev I. Investigation of a reverse-vortex plasma assisted combustion system [Text] / I. Matveev, S. Serbin // Proc. of the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conf. – Puerto Rico, USA. – HT2012–58037, 2012. – Pp. 133–140.
34. Applied Plasma Technologies [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.plasmacombustion.com>.
35. Plasma Production of Hydrogen-Enriched Gases From Ethanol [Text] / Chernyak V.Ya, Yukhymenko V.V., Solomenko E.V., Slyusarenko Yu.I., Olzhevskij S.V., Prisyazhnevich I.V, Martysh E.V. // 3rd International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEПAC). – Virginia, USA, 2007. – P. 33–36.
36. Matveev I. B. First Test Results of the Transient Arc Plasma Igniter in a Supersonic Flow [Text] / I.B. Matveev, S.B. Leonov // 3rd International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEПAC). – Virginia, USA, 2007. – P. 54–57.
37. Vincent-Randonnier A., Teixeira D. Plasma Assisted Methane Diffusion Flame : Experiments and Numerical . – Электронный ресурс [Режим доступа]: [http://www.iesj.org/content/files/pdf/IJPEST\\_Vol2\\_No2\\_09\\_pp119–127.pdf](http://www.iesj.org/content/files/pdf/IJPEST_Vol2_No2_09_pp119–127.pdf).



38. Dinh D. K., Kang H.S., Jo S., Lee D., Song Y.H. Partial oxidation of diesel fuel by plasma – Kinetic aspects of the reaction . – Электронный ресурс [Режим доступа]:

[https://www.researchgate.net/publication/319115190\\_Partial\\_oxidation\\_of\\_diesel\\_fuel\\_by\\_plasma\\_-\\_Kinetic\\_aspects\\_of\\_the\\_reaction](https://www.researchgate.net/publication/319115190_Partial_oxidation_of_diesel_fuel_by_plasma_-_Kinetic_aspects_of_the_reaction).

39. Togai, K. Kinetic Modeling and Sensitivity Analysis of Plasma–assisted Combustion. Электронный ресурс [Режим доступа]: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/27303>.

40. Сербин С.И. Исследование энергетических характеристик плазменного генератора для стабилизации термоакустических процессов в камерах сгорания [Текст] / С.И. Сербин, А. В. Козловский, С. В. Вилкул // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 17. – С.44–48.

41. Сербин С.И. Повышение экологичности камер сгорания ГТД использованием слаботочных плазмохимических стабилизаторов [Текст] / С.И. Сербин, А. В. Козловский // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2017. – № 9. – С.29–33.

42. Melte P.C. Measurement of Atomic Oxygen and Nitrogen Oxides in Jet Stirred Combustion [Text] / P.C. Melte, D.T. Pratt // Proc. 15th Symposium (International) on Combustion. - The Combustion Institute, USA, 1974. – P. 1061–1070.

43. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] / B.E. Launder, D.B. Spalding. - London: Academic Press, 1972. – 327 p.

44. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен [Текст] / Д.Б. Сполдинг; пер. с англ. Р.Н. Гизатуллина и В.И. Ягодкина; под ред. В.Е. Дорошенко. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

45. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – Москва : Наука, 1980. – 478 с.
46. Вильямс Ф.А. Теория горения [Текст] / Ф.А. Вильямс ; пер. с англ. С.С. Новикова, Ю.С. Рязанцева. – Москва : Наука, 1971. – 615 с.
47. Костюк В.Е. Математическая модель розжига камеры сгорания ГТД [Текст] / В.Е. Костюк, В.З. Кудринский // Материалы 4-й науч.-тех. конф. училища – Харьков : ХВВАИУ, 1988. – С.132-137.
48. Fu Y. Characteristics of the Swirling Flow Generated by an Axial Swirler [Text] / Y. Fu, S.-M. Jeng, R. Tacina // ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. – American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2005. – Pp. 517–526.
49. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics [Text] / G.K. Batchelor. – Cambridge : Cambridge: Univ. Press, 1967. – 615 p.
50. Сербін С.І. Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт [Текст] / С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 5. – С.59–67.
51. Matveev I. V., Serbin S. I. Modeling of the coal gasification processes in a hybrid plasma torch // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2007. – Т. 35. – №. 6. – P. 1639-1647.
52. Каретто Л.С. Математическое моделирование образования загрязняющих веществ [Текст] / Л.С. Каретто // Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1981. – С.84–137.
53. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю.

Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова; под ред. П.А. Власова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.

54. Сербин С.И. Исследование влияния параметров распыливания жидкого топлива на температурное поле и экологические характеристики камеры сгорания [Текст] / С.И. Сербин, С.В. Вилкул // Вестник двигателестроения, 2009. – № 3. – С. 93–97.

55. Сербин С.И., Му Юн. Исследование влияния режимов работы на характеристики камеры сгорания судового газотурбинного двигателя [Текст] / С.И. Сербин, Юн Му // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2009. - № 6 (429). – С. 113-120.

56. Vilag V., Vilag J., Carlanescu R., Mangra A., Florean F. CFD Application for Gas Turbine Combustion Simulations [Электронный ресурс] – Режим доступа : [https://www.researchgate.net/publication/336878170\\_CFD\\_Application\\_for\\_Gas\\_Turbine\\_Combustion\\_Simulations](https://www.researchgate.net/publication/336878170_CFD_Application_for_Gas_Turbine_Combustion_Simulations).

57. Choudhury D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling [Text] / Choudhury D. – Lebanon Fluent Inc. : Technical Memorandum TM-107. – 1993.

58. Романовський Г.Ф. Камери згоряння газотурбінних двигунів: Навчальний посібник [Текст] / Г.Ф. Романовський, С.І. Сербин – Миколаїв : УДМТУ, 2000. – 259 с.

59. Faeth G.M. Spray Combustion Models: A Review [Text] / G.M. Faeth // AIAA Paper. – 1979. – No.293. – P.1–18.

60. The Lagrangian PDF Transport Method for Simulations of Gas Turbine Combustor Flow [Text] / S. James, M.S. Anand, S.B. Pope // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. / USA. — Indianapolis : – AIAA 2002-4017, 2002. – P. 1-12.

61. Rodrigues L.O., Alencar H.S., Nascimento M. A.R., Venturini O.J. Aerodynamic Analysis Using CFD for Gas Turbine Combustion Chamber // Proceedings of POWER2007. – ASME Power 2007, 2007. – 11 p.

62. Fiveland W.A., Jamaluddin A.S. Three-dimensional spectral radiative heat transfer solutions by the discrete-ordinates method // *J. Thermophys. Heat Transf.*, 1991. – Vol. 5. – No. 3. – P. 335–339.
63. Peters N. *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems* [Text] / N. Peters, B. Rogg // *Lecture Notes in Physics.* - Springer-Verlag : Berlin, 1992. – Vol. m15. – P.3–12.
64. *Evaluated Kinetic Data for Combustion Modelling* [Text] / [D. L. Baulch et al.] // *J. Physical and Chemical Reference Data*, 1992. – Vol. 21(3). – P. 411–734.
65. Fenimore C.P. *Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames* [Text] / C.P. Fenimore // *Proc. 13th Symposium. (International) on Combustion.* – The Combustion Institute, USA, 1971. – P. 373–376.
66. Schefer R. W. *CH, OH and CH<sub>4</sub> Concentration Measurements in a Lifted Turbulent-Jet Flame* [Text] / R. W. Schefer, M. Namazian, and J. Kelly // *Proc. 13th Symposium (International) on Combustion.* - The Combustion Institute, USA, 1991. – P. 669–673.
67. Backmier F. *The Formation of Nitric Oxide and the Detection of HCN in Premixed Hydrocarbon-Air Flames at 1 Atmosphere* [Text] / F. Backmier, K.H. Eberius, Th. Just // *Combustion Science and Technology.* – 1973. – Vol. 7(2). – P. 77–84.
68. De Soete G. G. *Overall Reaction Rates of NO and N Formation from Fuel Nitrogen* [Text] / G. G. De Soete // *Proc. In 15th Symposium (International) on Combustion.* - The Combustion Institute, USA, 1975. – P.1093–1102.
69. *Reduction of NO<sub>x</sub> formation in natural gas burner flames* [Text] / V. Dupont, M. Porkashanian, A. Williams, R. Woolley // *Fuel.* – Oxford : Elsevier, 1993. – vol. 72(4). – P.497–503.
70. Melte P.C. *Measurement of Atomic Oxygen and Nitrogen Oxides in Jet Stirred Combustion* [Text] / P.C. Melte, D.T. Pratt // *Proc. 15th Symposium (International) on Combustion.* - The Combustion Institute, USA, 1974. – P. 1061–1070.

71. Correa S.M. A review of NO<sub>x</sub> formation under gas-turbine combustion conditions [Text] / S.M. Correa // *Combustion Science and Technology*. – 1993. – Vol. 87(1) – P. 329–362.
72. Lefebvre A. H, Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion. Alternative Fuels and Emissions: CRC Press; 3rd edition, 2010. – 558 p.*
73. Померанцев В.В. Основы практической теории горения [Текст] / В.В. Померанцев – Москва: Энергия, 1973. – 264 с.
74. Karl V. Meredith Automated Global Mechanism Generation for use in CFD Simulations [Text] / Karl V. Meredith, David L. Black // 44-th AIAA-Paper. – Reno, Nevada, 2006. – P. 1–13.
75. Романовский Г.Ф. Исследование параметров потока в камере сгорания с плазмотроном [Текст] / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин // Судовые энергетические установки: Сборник науч. тр. – Николаев: НКИ, 1985. – С. 8–16.
76. Сербин С.И. Исследование влияния параметров распыливания жидкого топлива на температурное поле и экологические характеристики камеры сгорания [Текст] / С.И. Сербин, С.В. Вилкул // Вестник двигателестроения, 2009. – № 3. – С. 93–97.
77. Serbin, S.I., Matveev, I.B., Mostipanenko, G.B. Investigations of the Working Process in a “Lean-Burn” Gas Turbine Combustor with Plasma Assistance // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2011. – Vol. 39. – No. 12. – P. 3331-3335.
78. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Можливості створення низькоемісійних двопаливних камер згорання ГТД // Сучасний стан та проблеми двигунобудування : Матеріали міжнар. науково-техн. конф. / Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2018. – С. 109–110.
79. Діасамідзе Б. Т. Вибір математичної моделі для прогнозування вигорання рідкого палива в двопаливній низькоемісійній камері згорання // Інновації в суднобудуванні: Матеріали X міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2019. – Т.1. – С. 354–356.
80. Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згорання ГТД при роботі на

газоподібному та рідкому паливах // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції / Миколаїв : НУК, 2020. – С. 205-210.

81. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т., Георгіу В. В. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в камері згоряння ГТД «водолій» при роботі на рідкому паливі // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченій 150-літтю від дня народження Некрасова Івана Степановича / Миколаїв : НУК, 2020. – С. 220-224.

82. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т., Крикливенко О. В. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в камері згоряння ГТД «Водолій» при роботі на супутньому нафтовому газі // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченій 150-літтю від дня народження Некрасова Івана Степановича / Миколаїв : НУК, 2020. – С. 225 –229.

83. Романовський Г. Ф. Сучасні газотурбінні агрегати: агрегати виробництва України та Росії: Навчальний посібник [Текст] / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв: НУК, 2005. - 344 с.

84. Сербін С.І., Мостіпаненко Г.Б. Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт // Вестник национального технического университета "ХПИ". - Сб. науч. тр. - Тематический выпуск "Энергетическое и теплотехническое оборудование". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – № 5. – С.59-66.

85. Буданова Н.А. Создание низкоэмиссионных камер сгорания для газотурбинных двигателей ДН70, ДН80, ДБ90 [Текст] / Н.А. Буданова, В.Г. Ванцовский, Е.В. Коротич // Судовое и энергетическое газотурбостроение. – Т.1. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки. – Николаев: НПКГ “Зоря”-”Машпроект”, 2004. – С.31-35.

86. Діасамідзе Б.Т. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів у двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД під час роботи

на газоподібному паливі / Б. Т. Діасамідзе // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК. – 2021. – № 1(484) . – С. 31–38.

87. Сербін, С. І. Дослідження впливу швидкості розпилювання рідкого палива на характеристики двопаливної газотурбінної камери згоряння = Investigations of liquid fuel spraying velocity influence on characteristics of a dual-fuel gas turbine combustor / С. І. Сербін, Б. Т. Діасамідзе // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2019. – № 1 (475). – С. 58–64.

88. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення оксидів азоту в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД // Інновації в суднобудуванні: Матеріали Х міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2019. – Т.1. – С. 330–332.

89. Сербін С. І., Вілкул С.В., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД при роботі на газоподібному паливі // Інновації в суднобудуванні: Матеріали Х міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2020. – Т.1. – С. 302–305.

90. EU, Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), 59-61.

91. Serbin S. Investigations of the working process in a dual-fuel low-emission combustion chamber for an fpso gas turbine engine [Електронний ресурс] / S. Serbin, B. Diasamidze, M. Dzida // Polish Maritime Research. – 2020. – Vol. 27. – No. 3(107) . – P. 89–99.

92. Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження двопаливної низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна / Б. Т. Діасамідзе, С. В. Вілкул, С. І. Сербін // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Power and Heat Engineering Processes and Equipment : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 1. – С. 27-33.

93. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження утворення оксидів

сірки в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД при роботі на рідкому паливі // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: 11 Міжнародна науково-практична конференція / Херсон: Херсонська державна морська академія: 08-10 вересня 2020 р. – С. 256-257.

94. Сербін С. І., Вілкул С.В., Діасамідзе Б. Т. Дослідження аеродинамічної структури потоку та впливу на розподіл температур у двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД, при роботі на газоподібному паливі за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки // Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування : Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції / Миколаїв : Іліон, 2020. – С. 12–14.

95. Сербін С.І., Діасамідзе Б. Т. Можливості застосування двопаливних газотурбінних двигунів для суден типу FPSO // Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету /Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2021. – С. 225-230.

96. Сербин С. И. Разработка математической модели образования загрязняющих веществ в камерах сгорания энергетических ГТУ [Текст] / С. И. Сербин, А. Б. Мостипаненко //Техногенна безпека: Науково-метод. журнал.– Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили. – 2006. – №. 49. – С. 36.

97. Сербин С. И. Исследование влияния параметров радиального завихрителя на температурное поле и структуру потока в камере сгорания ГТД [Текст] / Сербин С. И., Вилкул С. В., Вилкул В. В. // Вестник двигателестроения, 2010. – № 2.

98. Сербін С.І. Удосконалення характеристик камери згоряння газотурбінного двигуна з використанням методів тривимірного моделювання [Текст] / С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко // Вісник НУК. – 2010. – №. 1.

99. FT8-3 Advanced Low Emissions Combustor Design: [Text] / [Urmila S. Reddy, Barry C. Schlein, Christine E. Blanchard] // ASME, 2010. - GT2010-23792. – 7 р.



100. Numerical Simulation Of Combustion Processes And Analysis Of Temperature Field Non-Uniformity In GTE-65 Gas Turbine Combustor: [Text] / [D. Tarasov, A. Lebedev, N. Simin, V. Grinevich] // ASME, 2010. - GT2010-23798. – 9 p.

101. Experimental Investigation of the 4th Generation DLE Burner Concept: Emissions And Fuel Flexibility Performance At Atmospheric Conditions: [Text] / [A. M. Carrera, M. Andersson, H. Näsval] // ASME, 2011. - GT2010-46387. – 8 p.

102. NO<sub>x</sub> Emissions Reduction in an Innovative Industrial Gas Turbine Combustor (GE10 Machine) : A Numerical Study of the Benefits of a New Pilot System of Flame Structure and Emissions [Text] / [A. Andreini, B. Facchini, L. Mangani, et al.] // ASME, 2005. - GT2005-68364. – 13 p,

103. Сербин С. И. Исследование теплового состояния стенок жаровой трубы жидкотопливной камеры сгорания инструментами CFD и математического моделирования / С. И. Сербин, С. В. Вилкул // Авиационно-космическая техника и технология. - 2011. - № 7. - С. 157–161. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit\\_2011\\_7\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2011_7_33).

104. Lipperheide M. Long-term carbon monoxide emission behavior of heavy-duty gas turbines: An approach for model-based monitoring and diagnostics [Электронный ресурс] / Lipperheide M. et al // International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1756827718791921>.

105. Kim W., Cohen J. Plasma-Assisted Combustor Dynamics Control at Realistic Gas Turbine Conditions // Combustion Science and Technology, 2021. –Vol. 193. – No. 5.

106. Serbin S. I. Features of liquid-fuel plasma-chemical gasification for diesel engines // IEEE Transactions on plasma science. – 2006. – Т. 34. – №. 6. – С. 2488-2496.

107. Matveev I., Serbin S. Experimental and numerical definition of the reverse vortex combustor parameters // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – 2006. – С. 551.

108. Mousavi S.M., Kamali R., Sotoudeh F., Karimi N., Lee B.J. Numerical Investigation of the Plasma-Assisted MILD Combustion of a CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> Fuel Blend Under Various Working Conditions // Journal of Energy Resources Technology, 2021. – Vol. 143. – 12 p.

109. Matveev I. B., Serbin S. I., Lux S. M. Efficiency of a hybrid-type plasma-assisted fuel reformation system // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2008. – Т. 36. – №. 6. – С. 2940-2946.

110. Serbin S. I., Matveev I. B., Mostipanenko G. B. Plasma-assisted reforming of natural gas for GTL: Part II – Modeling of the methane–oxygen reformer // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – Т. 43. – №. 12. – С. 3964-3968.

111. Serbin S. Investigations of the emission characteristics of a dual-fuel gas turbine combustion chamber operating simultaneously on liquid and gaseous fuels / S. Serbin, B. Diasamidze, V. Gorbov, J. Kowalski // Polish Maritime Research. – 2021. – Vol. 28 . – No. 2(110) . – P. 85–95.

112. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Можливості створення двопаливних газотурбінних камер згоряння з плазмовим супроводом // Суднова енергетика стан і проблеми: Матеріали міжнар. науково-техн. конф. / Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2019. – С. 242–247.

113. Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т. Теоретичні дослідження впливу плазмохімічних добавок на утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згоряння ГТД при роботі на газоподібному та рідкому паливах // Інновації в суднобудуванні: Матеріали Х міжнар. науково-техн. конф у 2х томах / Миколаїв : НУК, 2021. – Т.1. – С. 263–265.

114. Сербин С. И. Исследование энергетических характеристик плазменного генератора для стабилизации термо-акустических процессов в камерах сгорания / С. И. Сербин, А. В. Козловский, С. В. Вилкул // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 17 (1126). – С. 44-48.

115. Сербин С.И. Экспериментальные исследования плазмотрона постоянного тока, предназначенного для подавления акустической неустойчивости в камерах сгорания [Текст] / С.И. Сербин, А.В. Козловский, С.В. Вилкул // III Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасний стан та проблеми двигунобудування”. - Миколаїв: НУК, 2014 р.: тези доп.2. – С.191-199.

116. Романовский Г. Ф. Плазменное воспламенение и сжигание топлив в судовых установках [Текст] / Г. Ф. Романовский. — Л. : Судостроение, 1986. – 86 с.

117. Козловский А.В. Прогнозирование термо-акустических характеристик низкоэмиссионных камер сгорания ГТД методом трехмерного математического моделирования [Текст] / А.В. Козловский // Вісник НТУУ КПІ, серія Машинобудування. – Київ, НТУУ “КПІ”, 2015. - №3 (75). – С. 25-29.

118. Serbin S., Mostipanenکو A., Serbina K, Matveev I. Development of the Convective Cooling System for the Gas Turbine Plasma Assisted Combustor [Text] // 7-th Int. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAС), 2011, Las Vegas, Nevada, USA. – P. 31-34.

**ДОДАТКИ А.** Документи про впровадження роботи

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН  
«УКРОБОРОНПРОМ»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ  
ЦЕНТР КОРАБЛЕБУДУВАННЯ»

просп. Героїв України, 1-Е, м. Миколаїв, Україна, 54025  
тел.: +38 (0512) 766 521, факс: +38 (0512) 766 520  
www.srdsc.com, e-mail: office@srdsc.com  
Код ЄДРПОУ 14307618



STATE CONCERN  
"UKROBORONPROM"

STATE RESEARCH & DESIGN  
SHIPBUILDING CENTRE

1-E Geroiv Ukrainy Ave., Mykolaiv, Ukraine, 54025  
phone: +38 (0512) 766-521, fax: +38 (0512) 766 520  
www.srdsc.com, e-mail: office@srdsc.com  
Code 14307618

15.09.2022 № 53-7/543

на № б/н \_\_\_\_\_ від 08.09.2022

Директору МННІ Національного  
університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
Сербіну С.І.  
пр. Героїв України 9, Миколаїв, 54007

Про Акт використання результатів  
дисертаційного дослідження Діасамідзе Б.Т.

На звернення МННІ НУК ім.адм. Макарова направляємо Акт про використання результатів дисертаційного дослідження Діасамідзе Б.Т. "Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів".

Додаток: Затверджений Акт у 2-х примірниках на 1 аркуші кожний.

З повагою,  
Директор – генеральний конструктор

В.Є. Борисов



**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Директор-генеральний конструктор  
ДП «Дослідно-проектний центр  
кораблебудування»



**В.Є. Борисов**

### **АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ**

результатів дисертаційного дослідження Діасамідзе Б.Т. "Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів"

За ініціативою Машинобудівного навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) та у відповідності з Договором про науково-технічне співробітництво між НУК і ДП "Дослідно-проектний центр кораблебудування" від 29.04.2020 р. Діасамідзе Б.Т. виконав дисертаційне дослідження ефективності використання плазмохімічних елементів в двопаливних камерах згоряння газотурбінних установок.

Дисертаційне дослідження присвячене розв'язанню науково-прикладного завдання створення високоефективних двопаливних низькоемісійних камер згоряння ГТД з плазмовим супроводом для різного призначення. Актуальність дослідження визначається необхідністю підвищення ефективності газотурбінних енергетичних систем, що працюють на паливах різного фазового стану, з одночасним зменшенням емісії забруднюючих речовин.

Отримані автором результати досліджень низькоемісійних двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів з плазмовим супроводом базуються на даних термодинамічного аналізу ефективності енергетичних установок, а також на результатах експериментальних досліджень плазмотронів постійного струму.

За допомогою тривимірних числових розрахунків автор довів можливість отримання викидів токсичних речовин в вихлопних газах газотурбінних двигунів (оксидів азоту і монооксиду вуглецю) менших ніж 25 ppm при роботі на рідкому і газоподібному паливах на номінальному режимі двигуна за рахунок стабілізуючого впливу продуктів плазмохімічних реакцій. Ці значення відповідають сучасним Європейським нормам на викиди забруднюючих речовин газотурбінними двигунами.

Результати досліджень використовуються при розгляді питань з обґрунтування можливостей проектування і виробництва конкурентоздатних вітчизняних газотурбінних установок (на базі двигунів виробництва ДП "Зоря"- "Машпроект") з метою їх подальшого використання в якості мобільних енергетичних засобів комплексного та швидкого забезпечення електроенергією і теплотою як об'єктів морської інфраструктури, так і енергетичного машинобудування.

Результати дисертаційного дослідження "Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів" є цінними для практики, дають поштовх розвитку наукового напрямку підвищення ефективності енерговикористання в газотурбінних установках з плазмовим супроводом.

Начальник механічного відділу,  
кандидат технічних наук

А.Ю. Волошин



**ТОВ «Залів Шіп Дизайн»**  
вул. Мала Морська 108/5,  
Миколаїв, Україна, 54001,  
тел.: +38 (0512) 765400, факс: +38 (0512) 765003

## АКТ

використання результатів дисертаційного дослідження Діасамідзе Б.Т. “Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів”

Дисертаційне дослідження Діасамідзе Б.Т. “Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів” присвячено питанню підвищення ефективності двопаливних газотурбінних камер згоряння наземного та морського призначення використанням низькотемпературної повітряної плазми для поліпшення енергетичних і екологічних параметрів установок.

Ефективність запропонованого автором метода інтенсифікації горіння газоподібних і рідких парів в двопаливних камерах згоряння ГТД доведена результатами тривимірних розрахунків характеристик двопаливної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт, отриманих на основі розробленої математичної моделі фізико-хімічних процесів двофазного турбулентного горіння в низькоемісійних паливоспалюючих пристроях, а також результатами експериментальних досліджень енергетичних параметрів плазмових генераторів.

Створення програмних і інструментальних засобів, які практично реалізують метод тривимірного розрахунку процесів в двопаливних газотурбінних камерах згоряння з плазмовим супроводом, є важливим в розвитку сучасних систем тривимірного проєктування як теплових двигунів, так і суден різного типу в цілому.

Науково-практичні результати роботи у вигляді математичних моделей і рекомендацій з вибору параметрів теплових двигунів використовуються при аналізі схемних рішень перспективних суднових енергетичних установок та виконанні проєктних розробок концептуальних суден з високоефективними та низькоемісійними енергетичними установками.

Результати дисертаційного дослідження Діасамідзе Б.Т. “Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів” представляють теоретичний і практичний інтерес та можуть бути використані при проєктуванні перспективних суднових енергетичних газотурбінних такombінованих установок з низькими викидами шкідливих компонентів.

Директор ТОВ “Залів Шіп Дизайн”

Приходько В.К.

**ТОВ «Залів Шіп Дизайн»**

вул. Мала Морська 108/5, Миколаїв, Україна, 54002, тел.: +38 (0512) 765400, факс: +38 (0512) 765003





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
 ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА**



54107, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс +38(0512) 42-42-80, e-mail: university@nuos.edu.ua

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Пректор Національного  
 університету кораблебудування  
 імені адмірала Макарова,  
 Дун., професор  
 рушляков Є.І.

08.01. 2022 р.

### АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи **Діасамідзе Бадрі Тенгізовича** «Підвищення ефективності двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних елементів» у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Даний акт свідчить про те, що отримані Діасамідзе Б.Т. результати досліджень та математична модель робочого процесу в двопаливній низькоемісійній камері згоряння газотурбінних двигунів з урахуванням впливу повітряної низькотемпературної плазми впроваджено в навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова і використовується при читанні курсів лекцій з дисциплін «Теорія робочих процесів в турбоагрегатах», «Плазмохімічні системи газотурбінних двигунів», а також при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування», освітні програми «Турбіни» і «Газотурбінні установки і компресорні станції».

Завідувач кафедри турбін  
 Національного університету кораблебудування  
 імені адмірала Макарова,  
 К.Т.Н., доцент

Патлайчук В.М.