

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Козловський Артем Вікторович



УДК. 621.43.056

**ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСІВ В НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕРАХ
ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПЛАЗМОХІМІЧНОЮ
СТАБІЛІЗАЦІЄЮ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2016

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
Сербін Сергій Іванович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, м. Миколаїв, директор Машинобудівного інституту НУК

Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор
Варбанець Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації

— кандидат технічних наук
Чобенко Володимир Миколайович,
ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»,
ДК «Укроборонпром», м. Миколаїв,
заступник генерального конструктора, начальник конструкторського відділення

Захист відбудеться «5» липня 2016 р. о 11⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
ауд. 360, просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025.

Автореферат розісланий «30» травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, професор



А. П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Створення мобільних, високоефективних і конкурентоспроможних вітчизняних газотурбінних двигунів (ГТД), що відповідають сучасним вимогам до енергетичних модулів нового покоління, є актуальним народногосподарським завданням. При розробці перспективних зразків ГТД і модернізації існуючих особливу увагу необхідно приділяти поліпшенню характеристик найбільш теплонапруженого вузла двигуна – камери згоряння (КЗ).

Сучасні тенденції в розвитку ГТД пов'язані зі значним зростанням теплових і динамічних навантажень на елементи їх конструкцій, у тому числі й на елементи КЗ. Однією з проблем при експлуатації ГТД є виникнення режимів пульсаційного (вібраційного) горіння в низькоемісійних КЗ. Значні коливання тиску робочого тіла в КЗ у ряді випадків можуть призводити до часткового або навіть повного руйнування елементів конструкції двигуна, зниження надійності їх роботи. Тому забезпечення стійкості процесу горіння вуглеводневих палив у низькоемісійних КЗ являє собою актуальне науково-прикладне завдання.

Використання числового експерименту на основі сучасних засобів обчислювальної гідродинаміки для прогнозування режимів пульсаційного горіння на етапі розробки двигуна дозволить значно скоротити витрати на проектування та доведення двигуна, а також підвищити ефективність експлуатації енергетичних систем.

Фундаментальні дослідження автоколивань газу в установках із джерелами теплоти виконали Рэлей, Б.В. Раушенбах, М.С. Натанзон, Н.Б. Налісний, В.П. Герасименко, В. М. Ларіонов, А.Д. Марголін, С.А. Аbruков, М.А. Ільгамов, В.Л. Епштейн, К.І. Артамонов, В.М. Подимов, В.І. Кондратьєв, Л. Сроссо, D.T. Harje, F.H. Reardon, H.J. Merk, A.A. Putnam, N. Rott та інші.

Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в області низькоемісійних КЗ ГТД (роботи Ю.А. Іванова, В.О. Христича, Ю.Я. Бурико, П.М. Канило, С.І. Сербіна, В.Є. Костюка, Г.Б. Мостіпаненко, В.Р. Кузнєцова, А.В. Сударева, С.В. Лукачова, А.М. Постнікова, А. Лефевра й інших), а також досліджень аеродинаміки низькоемісійних КЗ ГТД методами обчислювальної гідродинаміки (Н. Ріцк, Дж. Пітерс, А. Мелор і інші), аспекти вирішення проблеми придушення або зменшення пульсаційного горіння в низькоемісійних КЗ дотепер розроблені недостатньо. Таким чином, наукова актуальність теми зумовлена відсутністю комплексного аналізу питань стійкості горіння в низькоемісійних КЗ ГТД і науково обґрунтованих практичних рекомендацій з усунення режимів пульсаційного горіння.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано автором-аспірантом на кафедрі “Турбін” Машинобудівного інституту Національного університету кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова в рамках Пріоритетних напрямків розвитку науки й техніки в Україні, напрямок 3 «Енергетика й енергоефективність», відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт НУК за держбюджетною темою №

0111U002309 «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів з використанням плазмохімічних стабілізаторів» (2015-2018 рр.); за міжнародними контрактами: № 1891-1893/2012 «Дослідження термо-акустичних процесів в камері згоряння ГТД, що працює на газоподібному паливі», № 11-13/2013 «Моделювання малоемісійної камери згоряння ГТД, що працює на газоподібному паливі», а також відповідно до договору про творчу співдружність між НУК і Науково-виробничим комплексом газотурбобудування "Зоря"-«Машпроект» (2012-2013 рр.) за темою № 0114U001281 «Розробка методів розрахунків характеристик нестационарного робочого процесу в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів».

У цих роботах здобувач брав участь у якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

Метою наукового дослідження є підвищення стійкості процесів горіння газоподібного палива в низькоемісійних камерах згоряння ГТД за рахунок плазмохімічного впливу на процеси сумішоутворення й хімічної кінетики.

Основні задачі наукового дослідження:

- розробка об'ємної математичної моделі нестационарних хімічно реагуючих потоків в низькоемісійних КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором, що працюють на газоподібному паливі;
- обґрунтування й вибір моделі турбулентності для проведення числового аналізу пульсаційних процесів в КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором;
- розробка методики числового експерименту для дослідження нестационарних процесів в низькоемісійних КЗ ГТД;
- верифікація розробленої математичної моделі за результатами вимірів пульсацій тиску повітря в КЗ ГТД потужністю 25 МВт у стендових і натурних умовах;
- теоретичні дослідження впливу плазмохімічного стабілізатора й геометричних параметрів проточних частин на пульсаційні характеристики низькоемісійної КЗ ГТД;
- проведення експериментальних досліджень характеристик плазмохімічних стабілізаторів;
- впровадження результатів досліджень у практику проектування низькоемісійних КЗ ГТД.

Об'єкт дослідження – нестационарні процеси турбулентного горіння газоподібного палива в низькоемісійних КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором.

Предмет досліджень – фізико-хімічні характеристики процесів турбулентного горіння, аеродинамічна структура потоків в газотурбінній КЗ з попереднім утворенням паливо-повітряної суміші з урахуванням плазмохімічного впливу на процеси сумішоутворення й хімічної кінетики.

Методика і методи дослідження. Удосконалення нестационарних характеристик низькоемісійних КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором забезпечене теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. Теоретичну основу дисертаційних досліджень склали фундаментальні й прикладні роботи вітчизняних і закордонних фахівців в області

процесів горіння органічних палив. Для теоретичного аналізу нестационарних процесів в низькоемісійних КЗ із плазмохімічним стабілізатором використано підхід, заснований на числовому розв'язку системи диференціальних рівнянь, що описують основні закони збереження енергії й переносу хімічних компонентів в турбулентній хімічно реагуючій системі. Експериментальні дослідження нестационарних характеристик КЗ ГТД здійснювалися в стендових умовах ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект". Теплотехнічні виміри параметрів проводилися стандартними методами; при постановці дослідів використано загальну теорію моделювання й планування експериментів, а при обробці даних і перевірці гіпотез - статистичний аналіз.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

Вперше:

- встановлено, що підвищення стійкості процесів горіння газоподібного палива в низькоемісійних газотурбінних КЗ із попереднім утворенням паливо-повітряної суміші може бути досягнуто за рахунок плазмохімічного впливу слабкострумових плазмохімічних стабілізаторів на процеси сумішоутворення й хімічної кінетики;
- розроблено математичну модель нестационарних хімічно реагуючих потоків в низькоемісійних КЗ ГТД, яка відрізняється від відомих наявністю підмоделі, що враховує параметри плазмохімічного стабілізатора та дозволяє прогнозувати пульсаційні характеристики паливоспалюючих пристроїв;
- запропоновано підхід до моделювання впливу продуктів плазмохімічного стабілізатора на процеси поширення полум'я в низькоемісійній камері згорання, заснований на залежності енергії активації реакції часткового окиснення палива від кількості добавок плазмохімічних продуктів, яка враховується в рівняннях переносу хімічних компонентів з використанням LES-моделі турбулентності (моделі великих вихорів);
- теоретичним шляхом доведено, що в низькоемісійній КЗ із попереднім перемішуванням палива й повітря в каналах повітряних завихрювачів максимальні за амплітудою пульсації тиску робочого тіла в жаровій трубі мають місце в районі центральної зони рециркуляції, в отворах підведення вторинного повітря, а також в області виходу потоків із центрального і периферійного завихрювачів;
- встановлено основні вольт-амперні характеристики плазмохімічного стабілізатора для низькоемісійної КЗ ГТД та визначено, що зона стійкого горіння електричної дуги плазмотрона лежить в діапазоні струмів від 0,3 до 0,9 А при витратах плазмоутворюючого повітря до 3,4 г/с;
- в результаті числових досліджень встановлено, що використання плазмохімічного стабілізатора поряд з газодинамічним удосконалюванням проточної частини (змінюю прохідних перерізів жарової труби та застосуванням резонаторів Гельмгольца) приводить до зменшення пульсацій тиску всередині жарової труби низькоемісійної КЗ на 10...35 %, причому зниження пульсацій тиску найбільшою мірою проявляється в первинній зоні КЗ.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних методів і засобів, коректністю

застосованих методик досліджень, прийнятною точністю отримання експериментальних даних, задовільним узгодженням результатів теоретичних і експериментальних досліджень, математико-статистичною обробкою отриманих даних, результатами натурних випробувань нестационарних процесів в газотурбінних низькоемісійних КЗ.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- створенні методики числового експерименту з підвищення стійкості процесів горіння газоподібного палива в низькоемісійних КЗ із використання сучасних комплексів обчислювальної гідродинаміки, що дозволяє збільшити ефективність проектних і дослідно-доводочних робіт;
- розробці практичних рекомендацій з підвищення стійкості роботи КЗ із попереднім перемішуванням палива з повітрям ГТД потужністю 25 МВт виробництва ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект" (м. Миколаїв) шляхом використання слабкострумових плазмохімічних стабілізаторів і газодинамічного вдосконалення проточної частини паливоспалюючого пристрою;
- розробці нової конструктивної схеми КЗ ГТД, захищеної патентом України на корисну модель, що забезпечує зниження пульсацій тиску в жаровій трубі КЗ.

Впровадження розроблених рекомендацій у практику проектування газотурбінних двигунів дозволить поліпшити пульсаційні характеристики КЗ, зменшити вібрацію елементів, викликану пульсаційним горінням, збільшити ресурс жарових труб КЗ і двигунів в цілому.

Впровадження результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи й методики розрахунків характеристик КЗ із плазмохімічним стабілізатором використовуються в ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект" при доводці й модернізації існуючих та проектуванні перспективних зразків низькоемісійних КЗ ГТД.

Розроблена математична модель низькоемісійної КЗ із плазмохімічним стабілізатором використовується в навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні дипломних проектів і магістерських робіт зі спеціальностей 8.05060402 "Турбіни" і 8.05060406 "Газотурбінні установки та компресорні станції".

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, висновки і рекомендації, які наведені в дисертації та виносяться на захист, отримані автором самостійно та опубліковані в 25 наукових працях (3 з них самостійно). В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем розроблено та верифіковано математичні моделі нестационарних процесів у низькоемісійних КЗ, що враховують попереднє перемішування палива з повітрям, розроблені заходи щодо поліпшення пульсаційних характеристик низькоемісійних КЗ, проведено аналіз результатів експериментальних досліджень енергетичних характеристик плазмохімічного стабілізатора.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися й були позитивно оцінені на V, VI і VII Міжнародних техн. конф. «Суднова енергетика: стан і проблеми» (Миколаїв, НУК, 2011 р., 2013 р., 2015 р.); на IV Міжнародній техн. конф. «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення»

(Миколаїв, НУК, 2011 р.); на VIII Всеукраїнській техн. конф. (Харків, НТУ «ХП», 2012 р.); на Всеукраїнському форумі молодих учених, присвяченому Дню науки «Макаровські читання» (Миколаїв, НУК, 2012 р.); на VII Міжнародній техн. конф. «Проблеми екології й енергозбереження в суднобудуванні» (Миколаїв, НУК, 2012 р.); на IV і VI Міжнародних техн. конф. «Інновації в суднобудуванні й океанотехніці» (Миколаїв, НУК, 2013 р., 2015 р.); на III Міжнародній техн. конф. «Сучасний стан і проблеми двигунобудування» (Миколаїв, НУК, 2014 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 25 наукових праць, з них 9 наукових статей у спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, що входять у перелік, затверджений ДАК МОН України, 7 з яких опубліковано в виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 1 патент України на корисну модель і 15 тез міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 149 сторінок, рисунків – 109, таблиць – 2. Список використаних джерел містить 130 найменувань на 14 сторінках. У додатках наведено акти впровадження результатів досліджень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** на основі огляду вітчизняних і закордонних літературних джерел виконано аналіз механізмів виникнення пульсаційних режимів горіння в низькоемісійних КЗ ГТД і вплив цих режимів на експлуатаційні показники двигунів. Розглянуто можливості підвищення стійкості процесів в сучасних низькоемісійних КЗ, що реалізують принципи горіння бідних паливо-повітряних сумішей, за рахунок використання слабкострумових плазмохімічних стабілізаторів і аеродинамічного вдосконалювання проточних частин КЗ, а також обґрунтовано підходи до математичного моделювання нестационарних процесів в КЗ ГТД. Показана можливість використання методів обчислювальної гідродинаміки для прогнозування процесів плазмохімічної активації горіння паливо-повітряних сумішей. Аналіз розглянутих методів зменшення пульсацій тиску в паливоспалюючих пристроях дозволив сформулювати основні напрямки наукових досліджень з підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних КЗ ГТД.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження, показано його важливість і актуальність, а також відповідність спеціальності 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки», сформульовано мету й задачі роботи. Проаналізовано основні методи, що використовуються при проведенні досліджень характеристик низькоемісійних КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором: зіставлення, фізичного й математичного моделювання. Розроблена експериментальна установка для дослідження енергетичних характеристик слабкострумових плазмових генераторів, призначених для стабілізації горіння паливо-повітряних сумішей в низькоемісійних КЗ. На рис. 1 представлено схему стенда для дослідження нестационарних процесів і характеристик КЗ ГТД.

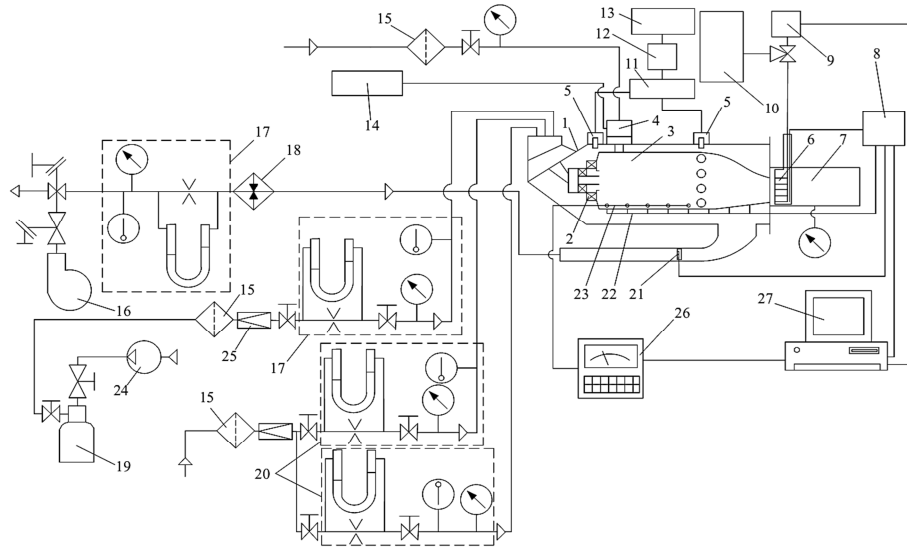


Рис. 1. Принципова схема станда для дослідження нестационарних процесів в КЗ:

1 - відсік; 2 - фронтовий пристрій; 3 - жарова труба; 4 - пусковий блок; 5 - датчик пульсацій повітряного потоку CP103; 6 - гребінка термодатчик із пробовідбірником; 7 - вихідне сопло; 8 - блок цифрових перетворювачів; 9 - лабораторний хроматограф; 10 - газоаналізатор Testo 350; 11 – підсилювач сигналу ІРС 704; 12 – блок гальванічної розв'язки GSI 124; 13 – електронний блок системи захисту устаткування VM 600; 14 - блок електроживлення пускових блоків; 15 - фільтр; 16 - повітродувка; 17 - мірна ділянка по повітрю; 18 - повітропідігрівник; 19 - балон стиснутого повітря; 20 - мірна ділянка по газу; 21-23 - термодатчики; 24 - насос; 25 - редукційний клапан; 26 - цифровий термодатчик; 27 - персональний комп'ютер

Обрано необхідні засоби вимірювання пульсацій тиску в низькоемісійних КЗ, що дозволяє забезпечити їх надійну роботу в стендових і натурних умовах, визначено похибки вимірів.

У **третьому розділі** розроблена математична модель нестационарних хімічно реагуючих потоків в низькоемісійних КЗ ГТД, яка дозволяє коректно прогнозувати аеродинамічні й хімічні особливості паливоспалюючих пристроїв з урахуванням плазмохімічного впливу на процеси сумішоутворення й кінетики. Модель базується на системі диференціальних рівнянь (1)-(5): збереження енергії, маси, кількості руху, переносу хімічних компонентів горючої суміші і оксидів азоту:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \vec{J}_q + S_h, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}, \quad (5)$$

де ρ - масова густина; E - внутрішня енергія; $\vec{v}$ - вектор локальної швидкості; p - статичний тиск; $\vec{J}_q$ - густина теплового потоку суміші, S_h – джерельний член, що описує тепловиділення в результаті хімічних реакцій, S_m – джерельний член, що визначає масу, яка вноситься до потоку, $\rho\vec{g}$ - гравітаційна сила; $\vec{F}$ - зовнішні сили; $\vec{\tau}$ - тензор тисків; Y_i , Y_{NO} - масова концентрація хімічного компонента i та оксиду азоту NO; S_i - рівень додаткового утворення i -го компонента з дисперсної фази або інших джерел; $\vec{J}_i$ - масова дифузія i -го компонента, R_i - рівень утворення i -го компонента в результаті хімічної реакції, D - коефіцієнт дифузії, S_{NO} - джерельний член утворення NO в залежності від прийнятого механізму.

Обґрунтовано вибір LES-моделі турбулентності для проведення числового аналізу пульсаційних процесів в КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором. Відфільтровані рівняння Нав'є-Стокса (6), (7) мають такий вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (7)$$

де σ_{ij} - тензор тисків від молекулярної в'язкості (8); τ_{ij} - підсітковий масштаб напружень (9):

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij}, \quad (8)$$

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j. \quad (9)$$

Для проведення числового аналізу обрано WALE-модель – різновид LES-моделі турбулентності. В даній моделі турбулентна в'язкість визначається за формулою

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{\left(S_{ij}^d S_{ij}^d \right)^{3/2}}{\left(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \right)^{5/2} + \left(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \right)^{5/4}},$$

де величини L_s й S_{ij}^d розраховуються таким чином:

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}), \quad S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(\bar{g}_{ij}^{-2} + \bar{g}_{ji}^{-2} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^{-2}, \quad \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}.$$

Запропоновано підхід до моделювання хімічного впливу продуктів плазмохімічного стабілізатора на процеси поширення полум'я в низькоемісійній камері згоряння, заснований на залежності енергії активації реакції часткового окиснення метану від кількості добавок плазмохімічних продуктів.

Проведені теоретичні дослідження пульсаційних характеристик КЗ ГТД, що працює на газоподібному паливі, дозволили встановити, що максимальні рівні середньоквадратичних пульсацій статичного тиску в жаровій трубі проявляються: в районі четвертої обичайки жарової труби – через вихроутворення в зоні зворотних течій; на стінках вхідного дифузора КЗ – в результаті відриву потоку від його стінок; у вихідному перерізі перед турбінними лопатками – через пульсацію центрального вихору в жаровій трубі; в районі отворів витікання газоподібного палива з форсунки; на лопатках завихрювача; в районі отворів вторинного повітря.

Для варіанта форсунки з 10 отворами підведення паливного газу (рис. 2,а) розрахунковий середньоквадратичний рівень пульсацій тиску в міжтрубному просторі в районі отворів вторинного повітря становить 5,2 кПа, з 5 отворами (рис. 2,б) - 3,6 кПа, з 19 отворами (рис. 2,в) - 11 кПа.

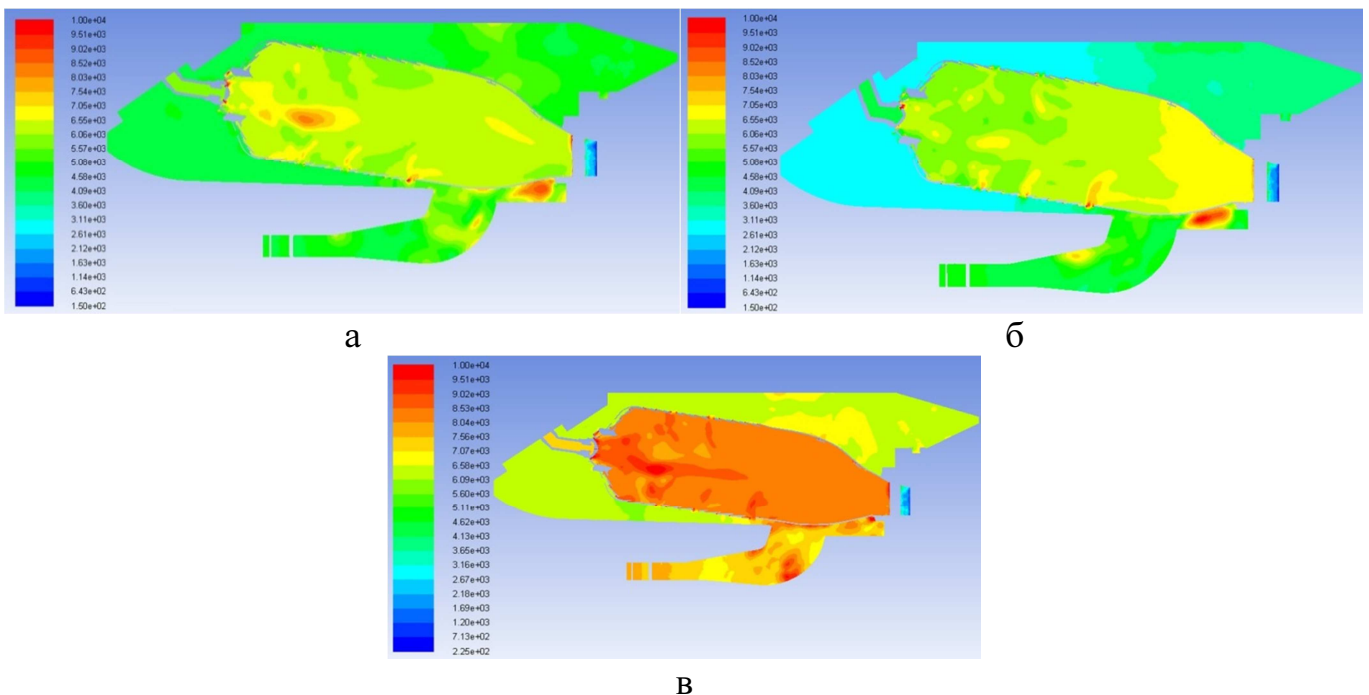


Рис. 2. Рівень середньоквадратичних пульсацій статичного тиску в камері згоряння:
а) - форсунка з 10 отворами; б) - форсунка з 5 отворами; в) - форсунка з 19 отворами

Максимальна амплітуда пульсацій статичного тиску на номінальному режимі роботи камери для всіх досліджених конструктивних схем форсунок має місце в перерізі верхнього отвору вторинного повітря: для варіанта форсунки з 10 отворами розрахунковий пік знаходиться на частоті 10 Гц з амплітудою 2,1 кПа й на частоті 140 Гц із амплітудою 1,1 кПа; для варіанта форсунки з 5 отворами пік розташовано на частоті 195 Гц з амплітудою 3,26 кПа; для варіанта форсунки з 19 отворами пік розташовано на частоті 45 Гц з амплітудою 4,4 кПа й на частоті 170 Гц з амплітудою 3,1 кПа.

Верифікація запропонованої математичної моделі проведена на базі експериментальних даних, отриманих при дослідженні пульсаційного стану камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт із різними конструктивними схемами форсунок, наданих ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект”.

За даними експериментальних досліджень рівні динамічного тиску в КЗ на номінальному режимі роботи ГТД із використанням форсунки з 10 отворами діаметром 1,85 мм не перевищують 5,4 кПа, із використанням форсунки з 5 отворами діаметром 2,6 мм не перевищують 4 кПа, а при постановці форсунки з 18 отворами діаметром 1,5 мм і одним отвором діаметром 1 мм максимальні рівні динамічного тиску в КЗ досягали значення 13 кПа.

На рис. 3 представлено порівняння експериментальних і розрахункових значень пульсацій тиску в КЗ із різним конструктивним виконанням форсунок. Різниця експериментальних і розрахункових значень при використанні форсунки з 10 отворами склала 3,7 %, з 5 отворами – 10%, з 19 отворами – 11,5 %.

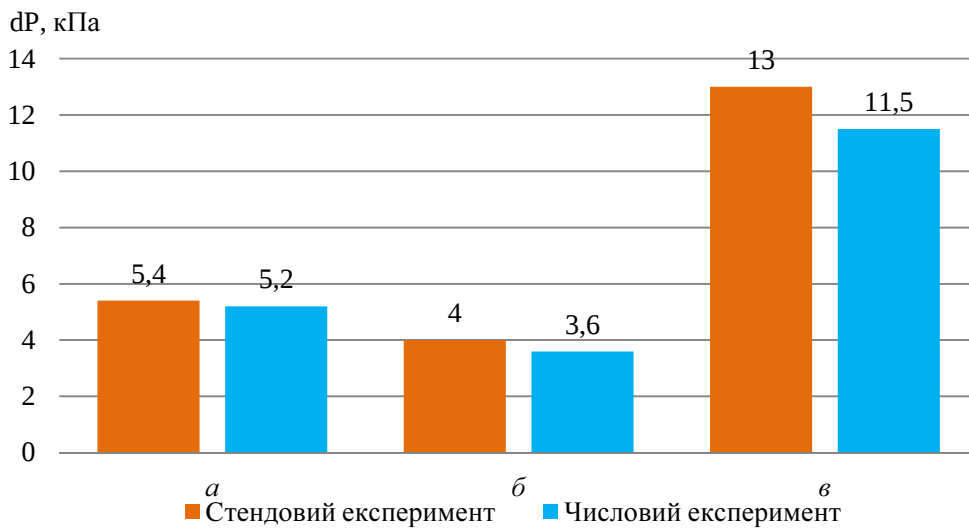


Рис. 3. Порівняння експериментальних і розрахункових значень пульсацій тиску в КЗ із різними конструктивними схемами форсунок:

а – форсунка з 10 отворами; б – форсунка з 5 отворами; в – форсунка з 19 отворами

Отримані результати свідчать про задовільну кореляцію експериментальних і теоретичних даних і можливість використання розробленої математичної моделі нестационарних процесів для вдосконалення геометричних і режимних параметрів низькоемісійних КЗ ГТД, що використовують стабілізатори різних типів. Застосування подібних математичних моделей доцільно як при створенні нових зразків низькоемісійних КЗ, що працюють на збіднених паливо-повітряних сумішах, так і при модернізації існуючих камер з метою розробки конструктивних заходів, спрямованих на зменшення ймовірності виникнення режимів пульсаційного горіння. Проведені розрахункові й експериментальні дослідження показують, що конструктивний варіант паливної форсунки камери згоряння, що має 5 отворів діаметром 2,6 мм, забезпечує рівні динамічного тиску в КЗ, що не перевищують 4 кПа, і може бути рекомендований для подальшої дослідної й промислової експлуатації в складі ГТД.

В четвертому розділі для теоретичних досліджень нестационарних процесів в низькоемісійних КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором запропонована методика числового експерименту, що складається з шести етапів.

Проведено теоретичні дослідження пульсаційних характеристик низькоемісійної КЗ ГТД потужністю 25 МВт, які дозволили визначити, що для всього розглянутого частотного діапазону в камері прослідковується яскраво виражена частота 189 Гц, яка обумовлена процесами горіння, про що свідчать спектри пульсацій температури й масової концентрації метану. Амплітуда пульсацій статичного тиску залежно від точки моніторингу варіюється від 1,0 до 2,6 кПа (рис. 4,а). Ці значення амплітуди отримані розкладанням у ряд Фур'є осередненого за масовою витратою статичного тиску в перерізах жарової труби. Розрахункові локальні середньоквадратичні пульсації статичного тиску всередині жарової труби досягають максимальних величин близько 15 кПа. При проходженні незбуреного потоку повітря через вхідний дифузор генеруються додаткові коливання із частотою 422 Гц і амплітудою 0,89 кПа, які згодом гасяться лопатками завихрювачів.

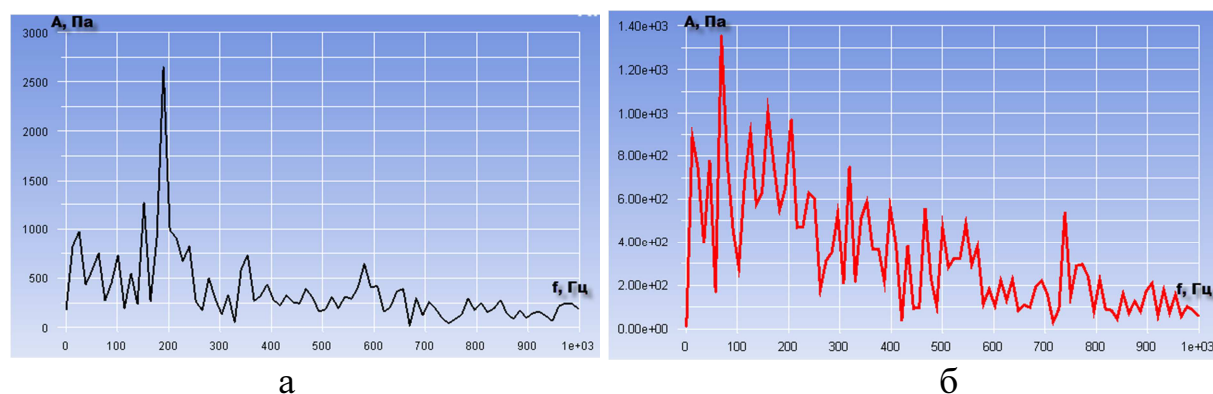


Рис. 4. Амплітуда статичного тиску в перерізі верхнього отвору підведення вторинного повітря:

а – базовий варіант; б – з урахуванням пульсації тиску повітря від компресора

На номінальному режимі низькоемісійної КЗ з урахуванням пульсації тиску повітря від компресора з амплітудою 3 кПа й частотою 133 Гц характерними частотами пульсацій є 175 і 205 Гц із амплітудами 0,8...0,4 та 1,1...0,5 кПа, що генеруються процесами горіння. На стінках вхідного дифузора генеруються коливання із частотою 510 Гц і амплітудою 0,45 кПа. При цьому пульсації з високою частотою 510 Гц гасяться лопатками завихрювачів, а більш низька частота 81 Гц з амплітудою 1,38 кПа прослідковується всередині жарової труби (рис. 4,б).

Використання плазмохімічних стабілізаторів в низькоемісійній КЗ ГТД потужністю 25 МВт дозволяє розширити діапазон стійкої роботи паливоспалюючого пристрою, зменшити амплітуду пульсації тиску паливо-повітряної суміші, отже, знизити вібрації елементів КЗ і двигуна в цілому.

В результаті проведених числових експериментів отримано значення середньоквадратичних пульсацій тиску для КЗ з різними добавками продуктів плазмохімічних реакцій (рис. 5). Спостерігається явне зниження рівня пульсацій тиску при використанні плазмохімічної активації як в жаровій трубі, так і міжтрубному просторі.

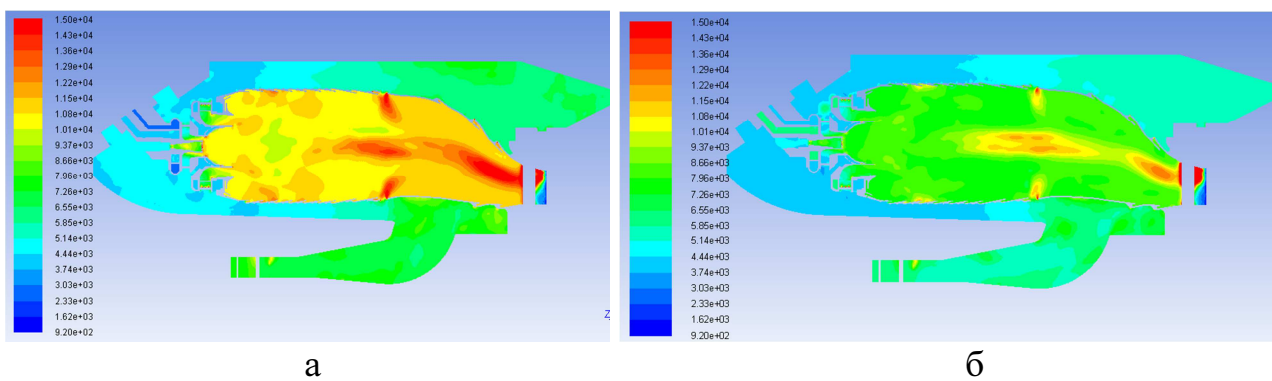


Рис. 5. Рівень середньоквадратичних пульсацій статичного тиску в жаровій трубі:
а – базовий варіант; б – з добавкою продуктів плазмохімічних реакцій $\beta = 0,0125$

рис. 6 показано пульсації статичного тиску, спектральної потужності та амплітуди сигналу за спектром частот в перерізі отвору вторинного повітря. Основний пік розташовано на частоті 180 Гц з амплітудою 1,49 кПа.

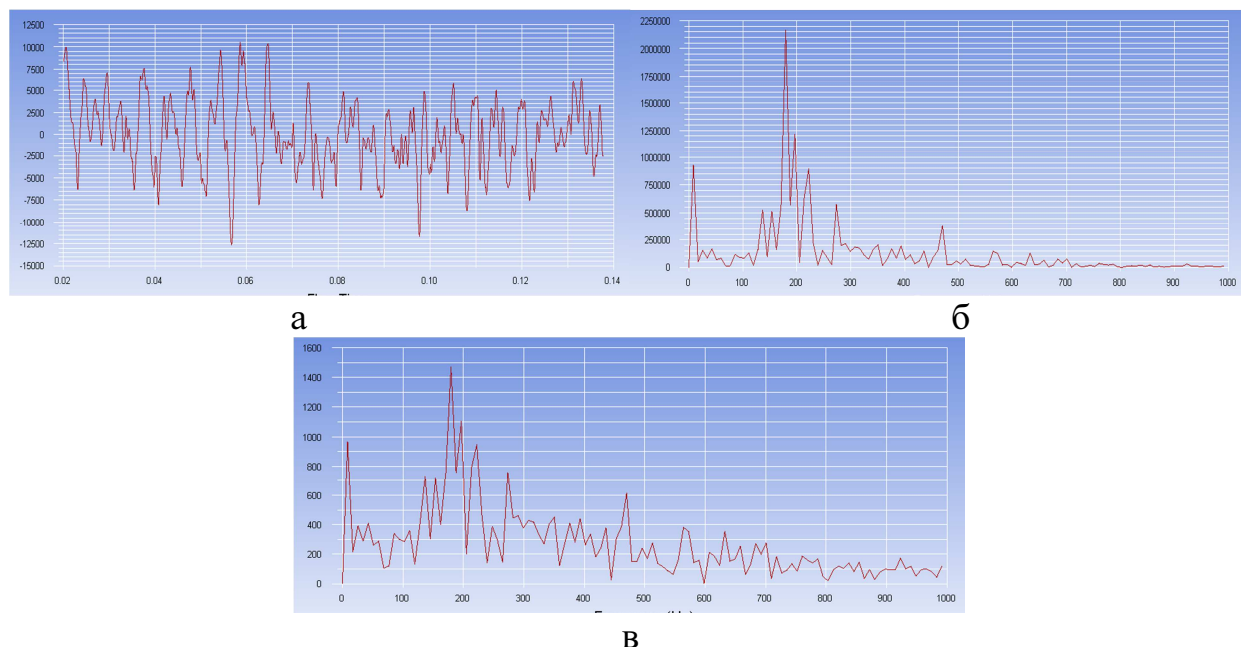


Рис. 6. Пульсації (а), спектральна потужність сигналу (б) та амплітуда статичного тиску (в) в перерізі верхнього отвору вторинного повітря для КЗ з добавкою плазмохімічних продуктів в кількості $\beta = 0,00087$

При підведенні продуктів плазмохімічних реакцій в кількості $\beta = 0,00087 \dots 0,0125$ (в частках від об'єму основної суміші) розрахункова спектральна потужність статичного тиску в перерізах жарової труби зменшилась в $1,5 \dots 2,0$ рази (рис. 7).

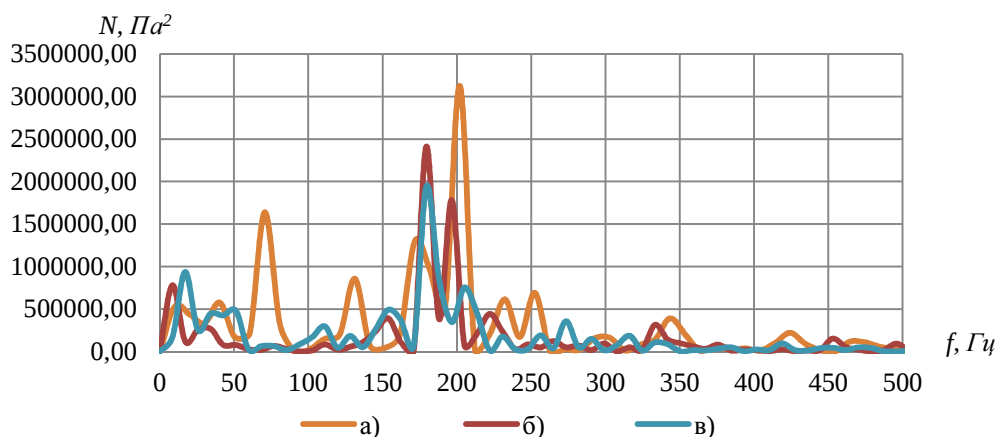


Рис. 7. Спектральна потужність статичного тиску в перерізі жарової труби в районі третьої обичайки:
а – базовий варіант; б – $\beta = 0,00087$; в – $\beta = 0,0125$

Використання активних продуктів плазмохімічних реакцій дозволяє зменшити емісію токсичних компонентів (рис. 8). Так, при добавках плазмохімічних продуктів в кількості $\beta = 0,00087$ розрахункові викиди оксидів азоту склали 65,7 ppm, а при добавках плазмохімічних продуктів в кількості $\beta = 0,0125$ – 33,6 ppm, у той час як розрахункова емісія оксидів азоту для базового варіанту низькоемісійної КЗ – 82,6 ppm.

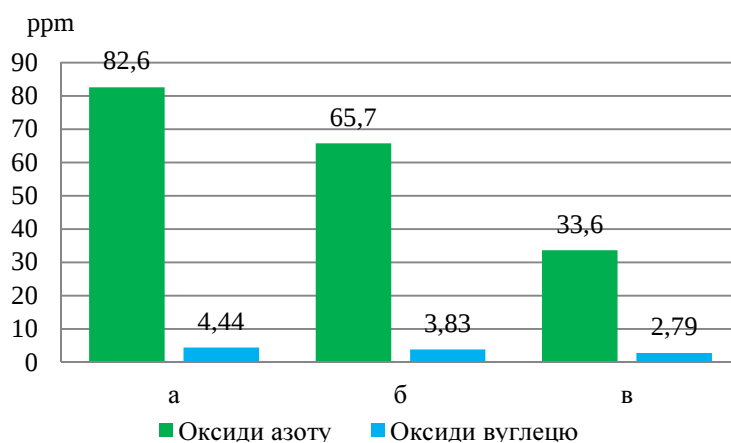


Рис. 8. Викиди оксидів азоту й вуглецю в низькоемісійній камері згоряння:
а – базовий варіант; б – з добавкою продуктів плазмохімічних реакцій $\beta = 0,00087$; в – з добавкою продуктів плазмохімічних реакцій $\beta = 0,00125$

В п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень енергетичних характеристик плазмохімічного стабілізатора, призначеного для підвищення стійкості процесів горіння в низькоемісійній КЗ ГТД, що працює на газоподібному паливі. Отримано вольт-амперні характеристики плазмового генератора для різних витрат плазмоутворюючого повітря (рис. 9). У всьому діапазоні режимних параметрів вони мають крутопадаючий характер.

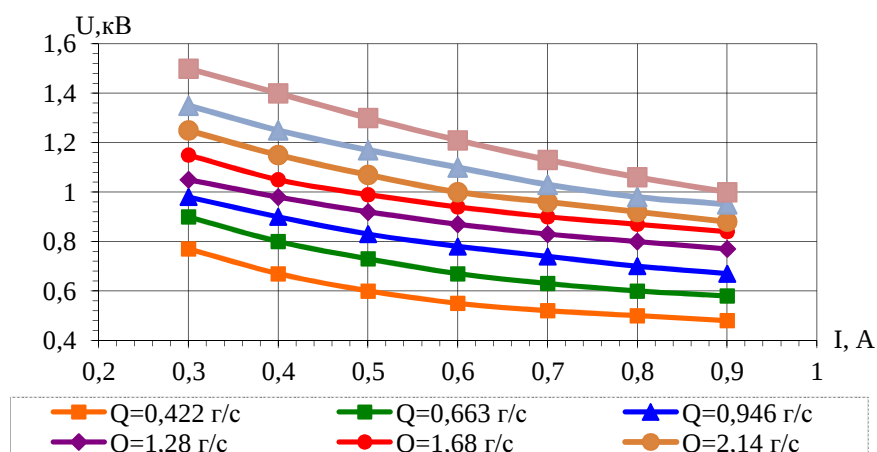
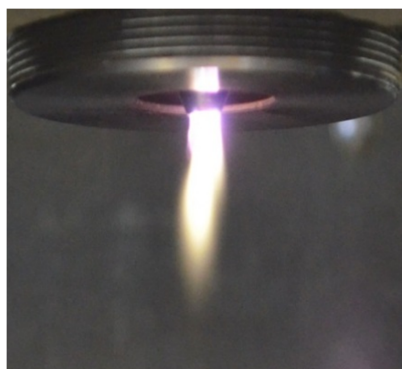


Рис. 9. Вольт-амперна характеристика плазмотрона при різних витратах плазмоутворюючого повітря

Фотографії факела низькотемпературної плазми при зміні потужності джерела живлення від 290 до 600 Вт наведено на рис. 10.

Визначено діапазон стійкої роботи плазмотрона постійного струму, призначеного для стабілізації процесів в КЗ. Зона стійкого горіння дуги плазмотрона забезпечується регулюванням сили струму від 0,3 до 0,9 А при витратах плазмоутворюючого повітря до 3,4 г/с. Експериментальні дослідження довели ефективність плазмохімічних стабілізаторів з низьким енергоспоживанням (150-300 Вт).



а



б

Рис. 10. Факел повітряної плазми при потужності 290 (а) та 600 (б) Вт

Розрахунковим шляхом встановлено, що за рахунок підвищення швидкості витікання повітря з периферійного завихрювача перекриттям отворів вторинного повітря (рис. 11) можливо зменшити пульсації тиску в первинній зоні низькоемісійної КЗ відповідно на 10...15 і 30...35 % для жарової труби із двома й одним отвором підведення вторинного повітря.

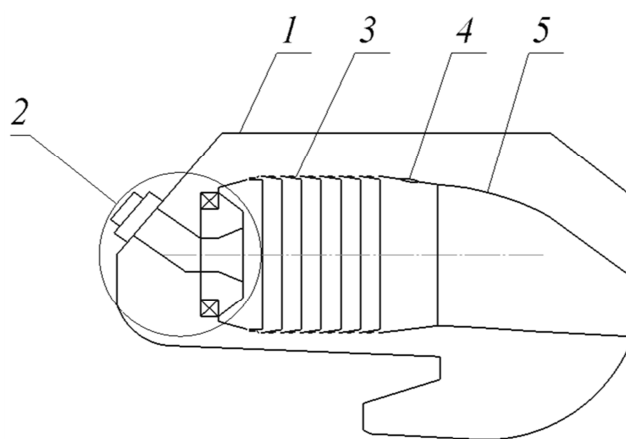


Рис. 11. Зміна геометрії жарової труби шляхом перекриття отворів підведення вторинного повітря:

1 – кожух; 2 – фронтовий пристрій; 3 – жарова труба; 4 – отвір вторинного повітря;
5 – змішувач

Збільшення прохідного перерізу жарової труби на 13,5 % приводить до зменшення пульсацій тиску в первинній зоні камери на 10...20 % у порівнянні з базовим варіантом низькоемісійної КЗ. Установка в КЗ ГТД резонатора Гельмгольца дозволяє зменшити пульсації тиску в головній частині жарової труби до 20 %.

В шостому розділі розглянуто питання використання запропонованих технічних рішень у практиці проектування та доводки сучасних газотурбінних двигунів.

Розроблено пропозиції щодо підвищення стійкості процесів горіння в низькоемісійних камерах згоряння. На підставі отриманих теоретичних і експериментальних даних розроблені практичні рекомендації з підвищення стійкості горіння в низькоемісійній КЗ ГТД UGT25000 потужністю 25 МВт виробництва НВКГ “Зоря”-”Машпроект”. Запропоновано встановлення в центральний канал внутрішнього завихрювача паликового пристрою плазмохімічного стабілізатора (рис. 12) з метою зниження пульсацій тиску в зоні основного горіння й промотуючого впливу на процеси поширення полум'я.

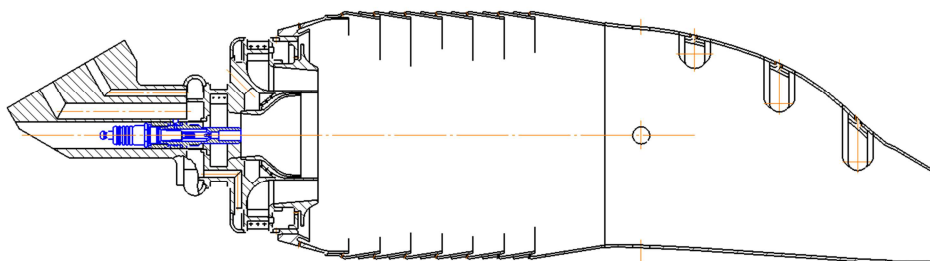


Рис. 12. Конструктивна схема жарової труби з плазмохімічним стабілізатором камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт

Впровадження рекомендацій з використання слабкострумових плазмохімічних стабілізаторів та вибору раціональних геометричних співвідношень

повітропідвідних каналів жарових труб у практику проектування газотурбінних двигунів дозволить зменшити пульсації тиску всередині камери згоряння та емісію токсичних речовин, знизити вібрацію елементів, викликану пульсаційним горінням, збільшити ресурс жарових труб КЗ і двигунів в цілому. Очікуваний річний економічний ефект за рахунок зменшення викидів токсичних компонентів дорівнює біля 1600 доларів США на один ГТД потужністю 25 МВт, що працює в складі компресорної станції.

Розроблена математична модель низькоемісійної камери згоряння ГТД використовується в навчальному процесі Машинобудівного інституту НУК при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт за спеціальностями 8.05060402 “Турбіни” і 8.05060406 “Газотурбінні установки і компресорні станції”.

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні представлено нове розв'язання завдання підвищення стійкості горіння в низькоемісійних камерах згоряння ГТД за рахунок використання плазмохімічних стабілізаторів. На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу й узагальнення літературних даних проведено аналіз механізмів виникнення пульсаційних режимів горіння в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, а також встановлено найбільш перспективні способи керування цими режимами за рахунок використання слабкострумових плазмохімічних стабілізаторів та аеродинамічного вдосконалювання проточних частин камер згоряння.

2. Розроблена експериментальна установка для дослідження енергетичних характеристик слабкострумових плазмових генераторів, призначених для стабілізації горіння паливо-повітряних сумішей у низькоемісійних камерах згоряння ГТД.

3. На основі LES-моделі турбулентності розроблена математична модель нестационарних хімічно реагуючих потоків в низькоемісійних КЗ ГТД, яка дозволяє коректно прогнозувати основні характеристики паливоспалюючих пристроїв з урахуванням плазмохімічного впливу на процеси сумішоутворення й кінетики. Порівняння експериментальних і розрахункових даних за максимальною амплітудою статичного тиску в камері свідчить про їх задовільне узгодження.

4. Проведені розрахункові й експериментальні дослідження показали, що конструктивна схема паливної форсунки, яка має 5 симетрично розташованих отворів діаметром 2,6 мм, забезпечує рівні динамічного тиску в камері згоряння, що не перевищують 4 кПа, і може бути рекомендована для подальшої дослідної й промислової експлуатації у складі ГТД.

5. Проведено теоретичні дослідження пульсаційних характеристик низькоемісійної камери згоряння з попереднім перемішуванням паливо-повітряної суміші ГТД потужністю 25 МВт, які дозволили визначити, що максимальні за амплітудою пульсації тиску спостерігаються: у приосьовій зоні рециркуляції; в районі отворів підведення вторинного повітря; всередині жарової труби в районі 4-ї обичайки; на стінках вхідного дифузора; у вихідному перерізі жарової труби перед

турбінними лопатками; на лопатках периферійного завихрювача; в районі отворів витікання палива в каналах завихрювачів.

6. Для зменшення спектральної потужності статичного тиску в перерізах жарової труби в 1,5...2,0 рази рекомендовано підведення продуктів плазмохімічних реакцій у кількості $\beta = 0,00087...0,0125$ (за об'ємом).

7. Використання плазмохімічних стабілізаторів дозволяє зменшити викиди токсичних речовин. При добавках плазмохімічних продуктів у кількості $\beta = 0,00087...0,0125$ розрахункова емісія оксидів азоту склала 65,7...33,6 ppm, у той час як викиди оксидів азоту для базового варіанта низькоемісійної камери згоряння рівнялися 82,6 ppm.

8. Проведено експериментальні дослідження енергетичних характеристик плазмохімічного стабілізатора. Визначено діапазон стійкої роботи плазмотрона постійного струму, призначеного для стабілізації нестационарних процесів в камері згоряння. Зона стійкого горіння дуги забезпечується регулюванням сили струму від 0,3 до 0,9 А при витратах плазмоутворюючого повітря до 3,4 г/с.

9. Встановлено, що за рахунок підвищення швидкості витікання повітря з периферійного завихрювача перекриттям отворів вторинного повітря можливо зменшити пульсації тиску в первинній зоні низькоемісійної камери згоряння на 10...35 %.

10. Основні результати дисертаційної роботи використовуються в ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект" при доводці й модернізації існуючих і проектуванні перспективних зразків низькоемісійних камер згоряння ГТД, а також у навчальному процесі Національного університету кораблебудування при виконанні дипломних проектів і магістерських робіт зі спеціальностей "Турбіни" і «Газотурбінні установки й компресорні станції».

Основні результати дисертації опубліковано в наукових **спеціалізованих виданнях**:

1. Сербін С.І. Дослідження процесів нестационарного горіння в камері згоряння ГТД/ С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко, А.В. Козловський [Текст] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 11-16.

2. Сербін С.І. Моделювання процесів нестационарного горіння в низькоемісійній камері згоряння газотурбінного двигуна [Текст] / С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко, А.В. Козловський // Вісник НУК. - Миколаїв: НУК, 2012. - №1. – С. 24-32.

3. Разработка методов расчета характеристик нестационарного рабочего процесса в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 11. – С.90-94.

4. S.I. Serbin Investigation of the thermo-acoustic processes in low emission combustion chamber of gas turbine engine capacity of 25 MW / S.I. Serbin, A.B. Mostipanenko, A.V. Kozlovskiy // Международный журнал об инновациях в судостроении «Shipbuilding & marine infrastructure». - Николаев: НУК, 2014. – №1(1). – С.127-134.

5. Методы снижения интенсивности пульсационного горения в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский, В.В. Вилкул // Научно-технический журнал: «Авиационно-космическая техника и технология». Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Харьков «ХАИ», 2014. – № 8 (115). – С. 84-88.

6. Сербин С.И. Исследование энергетических характеристик плазменного генератора для стабилизации термо-акустических процессов в камерах сгорания [Текст] / С.И. Сербин, А.В. Козловский, С.В. Вилкул // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 17(1126). – С. 44-48.

7. Сербин С.И. Снижение интенсивности пульсационного горения в камере сгорания ГТД использованием плазменных стабилизаторов [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery Motrol. - Lublin-Rzeszow, 2015. – Vol.17. – №2. – С. 71-75.

8. 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.

9. Козловский А.В. Экспериментальные исследования характеристик плазменного стабилизатора для низкоэмиссионной камеры сгорания ГТД [Текст] / А.В. Козловский, Е.Ю. Кирчук // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2015. – № 3. – С.28-32.

10. Декл. пат. на кор. мод. України 106386 Камера згоряння; F23C 3/00 / С. І. Сербін, А.В. Козловський, О. К. Чередніченко, Г.Б. Мостіпаненко – № u 201510299; Заявл. 21.10.2015 ; Опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8– 4 с. : іл.

Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

11. Сербін С.І. Дослідження характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 32 МВт [Текст] / С.І. Сербін, А.В. Козловський // III Суднова енергетика: стан та проблеми: міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011 р.: тези доп. 2011. – С.173-174.

12. Сербін С.І. Дослідження характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 32 МВт [Текст] / С.І. Сербін, А.В. Козловський //Муніципальна енергетика: проблеми, рішення: IV міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011 р.: тези доп. 2011. – С.153-156.

13. Сербін С.І. Дослідження процесів нестаціонарного горіння в камері згоряння ГТД [Текст] / С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко, А.В. Козловський // Проблемы энергоснабжения Украины и пути их решения: VIII всеукр. науч.-техн. конф. - Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012 г.: тезисы докл. 2012. – С. 11-16.

14. Сербін С.І. Дослідження характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 32 МВт [Текст] / С.І. Сербін, А.В. Козловський //Макаровські читання, Всеукраїнський форум молодих науковців, присвячений Дню науки. - Миколаїв: НУК, 2012 р.: тези доп. 2012. – С.37-38.

15. Сербін С.І. Дослідження характеристик низькоемісійної камери згоряння ГТД потужністю 32 МВт [Текст] / С.І. Сербін, А.В. Козловський // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: VII Міжнародна науково-технічна конференція. - Миколаїв: НУК, 2012 р.: тези доп. 2012. – С.37-40.

16. Сербин С.И. Численный анализ пульсационных процессов в камере сгорания с частичным предварительным смешением для ГТД мощностью 25 МВт [Текст] / С.И. Сербин, А.Б.

Мостипаненко, А.В. Козловский // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв: НУК, 2013 р.: тези доп. 2013. – С.190-192.

17. Сербин С.И. Исследование термо-акустических характеристик диффузионной камеры сгорания ГТД с разными конструкциями форсунок [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв: НУК, 2013 р.: тези доп. 2013. – С.194-196.

18. Козловский А.В. Моделирование акустических процессов в диффузионной камере сгорания ГТД [Текст] / А.В. Козловский // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв: НУК, 2013 р.: тези доп. 2013. – С.192-194.

19. Сербин С.И. Выбор модели турбулентности по результатам численного анализа нестационарных процессов в камере сгорания ГТД мощностью 25 МВт [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский, // Суднова енергетика: стан та проблеми: міжнарод. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2013 р.: тези доп. 2013. – С.152-155.

20. Сербин С.И. Прогнозирование режимов вибрационного горения в камере сгорания ГТД методом численного эксперимента [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский, Р.О. Пенязь // Суднова енергетика: стан та проблеми: міжнарод. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2013 р.: тези доп. 2013. – С.203-205.

21. 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. 2014. – С.191-199.

22. Козловский А.В. Основные направления исследований повышения стабильности процессов в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД [Текст] / А.В. Козловский, С.М. Дудатий // III Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасний стан та проблеми двигунобудування". - Миколаїв: НУК, 2014 р.: тези доп. 2014. – С.253-256.

23. Мостипаненко А.Б. Повышение стабильности низкоэмиссионной камеры сгорания ГТД использованием плазменных стабилизаторов [Текст] / А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский, С.В. Котко, Э.В. Мартынюк, // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв: НУК, 2015 р.: тези доп. 2015. – С.174-177.

24. Козловский А.В. Анализ основных дефектов камер сгорания и элементов ГТД, вызываемых неустойчивостью горения [Текст] / А.В. Козловский // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв: НУК, 2015 р.: тези доп. 2015. – С.178-180.

25. Сербин С.И. Повышение устойчивости процессов горения топлив в газотурбинных камерах сгорания газодинамическим совершенствованием проточных частей [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский // Суднова енергетика: стан та проблеми: міжнарод. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2015 р.: тези доп. 2015. – С.4-8.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві: [1, 11-15] - результати аналізу нестационарних процесів горіння з урахуванням складних геометричних форм сучасних камер згоряння; [2, 16-18] - результати аналізу нестационарних процесів в низькоемісійній камері згоряння ГТД з використанням різних моделей турбулентності; [3, 19] - розробка методики розрахунків характеристик робочого процесу в низькоемісійних камерах згоряння ГТД; [4, 20] - розробка універсальної об'ємної математичної моделі п процесів; [5, 22, 25] - результати підвищення стійкості процесів горіння в камері згоряння ГТД удосконалюванням

проточної частини; [6, 21] - результати експериментальних досліджень плазмотрона постійного струму; [7, 23] - розробка математичної моделі нестационарних процесів в низькоемісійних камерах згоряння ГТД із плазмохімічними стабілізаторами; [8] - результати числового моделювання процесів нестационарного горіння; [9] - результати експериментальних досліджень енергетичних характеристик джерела живлення й генератора низькотемпературної плазми; [10] - розробка конструктивних модифікацій камери згоряння ГТД для підвищення стійкості процесу горіння; [24] - аналіз основних дефектів камер згоряння й елементів ГТД, спричинених нестійкістю горіння.

АНОТАЦІЯ

Козловський А. В. Підвищення стійкості процесів в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів плазмохімічною стабілізацією – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2016.

Дисертація присвячена підвищенню стійкості процесів горіння газоподібного палива в низькоемісійних камерах згоряння стаціонарних ГТД за рахунок плазмохімічного впливу на процеси сумішоутворення й хімічної кінетики.

Розроблено математичну модель нестационарних процесів в низькоемісійних КЗ ГТД із плазмохімічним стабілізатором, яка дозволяє враховувати вплив низькотемпературної повітряної плазми на аеродинаміку течії в КЗ та характеристики тепловиділення. Створено методику числового експерименту з вдосконалення стійкості процесів горіння газоподібного палива в низькоемісійних КЗ із використання сучасних комплексів обчислювальної гідродинаміки, що дозволяє підвищити ефективність проектних і дослідно-доводочних робіт.

Розроблено практичні рекомендації з підвищення стійкості роботи КЗ із попереднім перемішуванням палива з повітрям для ГТД, що працюють на газоподібному паливі, що дозволяє знизити пульсації тиску всередині жарової труби низькоемісійної КЗ на 10–35 %, зменшити спектральну потужність статичного тиску в перерізах жарової труби в 1,5–2,0 рази. Викиди оксидів азоту у вихідному перерізі камери згоряння можуть бути знижені до 33,6 ppm при збереженні рівня емісії оксидів вуглецю, що відповідає сучасним міжнародним екологічним вимогам.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згоряння, пульсаційне горіння, стабілізація горіння, плазмохімічний стабілізатор, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Козловский А. В. Повышение устойчивости процессов в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей плазмохимической стабилизацией – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. - Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2016.

Диссертация посвящена повышению устойчивости процессов горения газообразного топлива в низкоэмиссионных камерах сгорания стационарных ГТД за счет плазмохимического влияния на процессы смесеобразования и химической кинетики.

Разработана и создана экспериментальная установка для исследования энергетических характеристик слаботочных плазменных генераторов, предназначенных для стабилизации горения топливо-воздушных смесей в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД. На основе LES-модели турбулентности разработана математическая модель нестационарных химически реагирующих потоков в низкоэмиссионных КС ГТД, позволяющая корректно прогнозировать аэродинамические и химические особенности топливосжигающих устройств с учетом плазмохимического воздействия на процессы смесеобразования и кинетики. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по максимальной амплитуде статического давления в камере свидетельствует о

их удовлетворительном согласовании. Предложен подход к моделированию химического воздействия продуктов плазмохимического стабилизатора на процессы распространения пламени в низкоэмиссионной камере сгорания, основанный на зависимости энергии активации реакции частичного окисления метана от количества добавок плазмохимических продуктов.

Определено, что конструктивная схема топливной форсунки, имеющей 5 симметрично расположенных отверстий диаметром 2,6 мм, обеспечивает уровни динамического давления в камере сгорания, не превышающие 4 кПа, и может быть рекомендована для дальнейшей опытной и промышленной эксплуатации в составе ГТД.

Определено, что максимальные по амплитуде пульсации давления наблюдаются: в приосевой зоне рециркуляции; в районе отверстий подвода вторичного воздуха; внутри жаровой трубы в районе 3-4-й обечаяек; на стенках входного диффузора; в выходном сечении жаровой трубы перед турбинными лопатками; на лопатках периферийного завихрителя; в районе отверстий истечения топлива в каналах завихрителя.

При подводе продуктов плазмохимических реакций в количестве $\beta = 0,00087-0,0125$ расчетная спектральная мощность статического давления в сечениях жаровой трубы уменьшается в 1,5–2,0 раза, что свидетельствует о положительном влиянии плазмохимических стабилизаторов на устойчивость горения в камерах сгорания ГТД. При добавках плазмохимических продуктов в количестве $\beta = 0,00087-0,0125$ расчетная эмиссия оксидов азота составила 65,7–33,6 ppm, в то время как выбросы оксидов азота для базового варианта низкоэмиссионной камеры сгорания равнялись 82,6 ppm.

Определен диапазон устойчивой работы плазмотрона постоянного тока, предназначенного для стабилизации нестационарных процессов в камере сгорания. Зона устойчивого горения дуги обеспечивается регулированием силы тока от 0,3 до 0,9 А при расходах плазмообразующего воздуха до 3,4 г/с.

Установлено, что за счет повышения скорости истечения воздуха из периферийного завихрителя перекрытием отверстий вторичного воздуха возможно уменьшить пульсации давления в первичной зоне низкоэмиссионной камеры сгорания на 10–35 %.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, пульсационное горение, стабилизация горения, плазмохимический стабилизатор, математическая модель.

SUMMARY

Kozlovskiy A. V. Increasing of stability processes in GTE low-emission combustor with plasma-chemical stabilization - Manuscript.

The thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.05.03 – Engines and power plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, 2016.

The thesis is devoted to increasing of stability of gaseous fuel combustion in low-emission combustion chambers of stationary GTE by plasma-chemical impact on processes of mixing and chemical kinetics. The mathematical model of unsteady processes in GTE low-emission combustor with plasma chemical stabilizer that takes into account the impact of low-temperature plasma on aerodynamics air flow in the combustor and the characteristics of heat release are developed. A methodology of numerical experiment concerning stability of gaseous fuel combustion in low-emission combustor with using modern complex of computational fluid dynamics, which improves the efficiency of design and refinement works, are developed.

Practical recommendations for improvement of stability of the GTE combustor with partially premixed lean fuel-air mixtures, working on gaseous fuels, are developed. They allow to reduce pressure fluctuations inside flame tube of the low-emission combustor at 10–35%, to reduce spectral power of static pressure in flame tube in 1,5–2.0 times, to reduce NOx emission up to 33,6 ppm in the exit section, while retaining a carbon monoxide emission level, that corresponds modern international ecological standards.

Keywords: gas turbine engine, combustor, pulsating combustion, stabilization of combustion, plasma-chemical stabilizer, mathematical model.

