

Ю. І. ТОРБА¹, Д. В. ПАВЛЕНКО^{1,2}, В. В. МАНЖОС¹¹ ДП «Івченко - Прогрес», Запоріжжя, Україна² Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЯКІСНОГО СКЛАДУ ПАЛИВНО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ У ФАКЕЛЬНОМУ ЗАПАЛЬНИКУ КАМЕР ЗГОРЯННЯ ГТД

Якісний склад паливно-повітряної суміші, яка формується у факельному запальнику камер згоряння ГТД, визначає ефективність та надійність їх роботи. Головним завданням дослідження є визначення якісного складу паливно-повітряної суміші біля електричної свічі запалення факельного запальника ГТД в залежності від його геометричних особливостей та режиму експлуатації двигуна. Виконано оцінку складу суміші аналітичним, експериментальним та чисельним методами. Встановлено значне перебагачення паливно-повітряної суміші в корпусі запальника за аналітичною моделлю, що підтверджено експериментально. Для визначення полів масової концентрації часток палива в паливно-повітряної суміші в корпусі факельного запальника з урахуванням особливостей течії повітря та подачі палива для різних поєднань конструктивних особливостей та режимів роботи ГТД, використано чисельну модель. З використанням чисельної моделі стаціонарного горіння паливно-повітряної суміші, яку підготовлено у корпусі факельного запальника камери згоряння газотурбінного двигуна шляхом випару і розпилення частинок авіаційного газу у повітряному потоці, досліджували вплив геометричних параметрів корпусу і зовнішніх факторів на коефіцієнт надлишку повітря біля електричної свічі розпалення. Реалізація дрібнофакторного експерименту дозволила встановити ступінь впливу кожного із факторів, що досліджували, та їх взаємодії на коефіцієнт надлишку повітря. Встановлено коефіцієнт кореляції між коефіцієнтом надлишку повітря біля свічі та середньою температурою полум'я. Враховуючи відсутність у серійних конструкціях факельних запальників регулюючих приладів запропоновано для управління якісним складом паливно-повітряної суміші використовувати імпульсну подачу палива. Окреслені подальші шляхи дослідження для підвищення надійності розпалу як факельного запальника від електричної свічі так і камери згоряння ГТД від факелу полум'я.

Ключові слова: факельний запальник; паливно-повітряна суміш; коефіцієнт надлишку повітря; модель; горіння; розпал.

Вступ

Ефективність роботи системи розпалу камер згоряння газотурбінних двигунів (ГТД) в різних умовах експлуатації багато в чому визначає надійність ГТД в цілому. У зв'язку із цим на сьогодні активно досліджуються і застосовуються як вітчизняними, так і провідними закордонними авіадвигунобудівними компаніями системи розпалу, що засновані на різних фізичних процесах. Їх аналіз дозволяє виявити найбільш перспективні напрями дослідження для вдосконалення систем розпалу та їх конструкцій і визначити основні завдання, що повинні бути для цього вирішені.

На сьогодні використовуються різні способи розпалу камер згоряння. Одним з ефективних способів розпалу основного палива в камері згоряння ГТД є використання пускових запальників факельного типу. Він являє собою найпростішу малогабаритну камеру згоряння, у яку подають пускове паливо та

повітря. Паливно-повітряна суміш, утворена в камері, запалюється пусковою свічею. Факел полум'я, що виходить з вихідного патрубка запальника, підпалює робоче паливо в жаровій трубі камери згоряння.

Запальник повинен забезпечувати надійний розпал робочого палива в широкому діапазоні температур, тисків повітря та пускового палива і мати високу надійність роботи. Забезпечення відзначених умов роботи запальника вимагає розробки моделі формування паливно-повітряної суміші із метою управління режимом його роботи залежно від зовнішніх факторів і забезпечення максимальної ефективності в широкому діапазоні експлуатаційних параметрів ГТД.

При цьому відомо, що моделювання та керування якісним складом паливно-повітряної суміші є складним, та на даний час до кінця не вирішеним завданням. Головною причиною складності моделювання є дія багатьох факторів, що впливають на якість паливно-повітряної суміші. При цьому основною

складністю управління складом суміші є відсутність систем регулювання, що викликане необхідністю максимального спрощення конструкції факельних запальників.

Практика проектування сучасних камер згоряння показує, що використання чисельного моделювання є неефективнішим способом досягнення її оптимальної конструкції.

Огляд літератури

Багаторічний досвід проектування та розрахунків камер згоряння ГТД на ДП "Івченко-Прогрес" показав, що теоретична оцінка коефіцієнта надлишку повітря пов'язана з багатьма складнощами та не може бути виконана з високою точністю [1]. Основними з них є: зміна умов роботи (температура, тиск), осадження частини палива на внутрішніх поверхнях корпусу запальника, видалення більшої частини (від 20 % до 80 % залежно від режиму роботи двигуна) палива через вихідний патрубок.

В попередніх дослідженнях ефективності роботи факельних запальників ГТД [2] основна увага приділялась температурі факелу полум'я, що є важливим показником для надійності розпалу камери згоряння ГТД. При цьому питання надійності розпалу самого факельного запальника, яка залежить від якості паливно-повітряної суміші біля свічі запалення, не розглядалась.

Складність процесів, що відбуваються у запальнику, ускладнюють як його дослідження, так і оптимізацію. В роботі [3] наведені результати досліджень та теоретичне обґрунтування процесів, що відбуваються під час утворення паливно-повітряної суміші та її згоряння. Автори вказують на багатогранність та складність процесів горіння, що значно ускладнює питання їх вивчення із застосуванням теоретичних підходів. Це зумовлює актуальність застосування підходу, що засновано на чисельному моделюванні.

Питанням моделювання процесу горіння паливної суміші в камерах згоряння ГТД присвячена досить велика кількість досліджень [4, 5] Більшість з них присвячена дослідженню процесів сумішоутворення, ініціалізації горіння, безпосередньо горіння та оптимізації конструкції елементів основної камери згоряння ГТД [6, 7] але не факельних запальників. Відомо, що характерним недоліком запальників такого типу є незадовільні пускові характеристики, що погіршуються у висотних умовах запуску двигуна через розрідження атмосфери і виникає при цьому перебагачення паливно-повітряної суміші в запальнику. Низька надійність займання палива при різних умовах запуску пов'язана з тим, що якісний склад паливно-повітряної суміші залежить не тільки від конструктивних параметрів запальника (кут нахилу осі

розпилювача, конус розпиленого палива), але й від мінливих неконструктивних параметрів (наприклад, температура і швидкість циркуляційного повітря, температура корпусу запальника і т.д.).

Так, при запуску гарячого двигуна частина дрібнорозпиленого палива, що потрапляє на гарячу стінку корпусу запальника, який має значну масу, випаровується і бере участь в процесі сумішоутворення, змінюючи концентрацію паливно-повітряної суміші в бік збагачення і тим самим погіршуючи запуск двигуна [8, 9]. Незважаючи на складність процесу організації стійкого горіння в факельних запальниках камери згоряння у всьому діапазоні режимів роботи ГТД, дослідження, присвячені оптимізації їх конструкції і умов роботи, досить обмежені.

Таким чином, враховуючи високу ефективність застосування факельних запальників камер згоряння в конструкції ГТД, а також обмежену кількість досліджень за цим напрямом, оптимізація їх конструкції і умов роботи на даний час є актуальним завданням.

Метою дослідження було встановлення впливу конструктивних параметрів корпусу факельного запальника на якісний склад та поля масової концентрації часток палива в паливно-повітряної суміші. Для її досягнення вирішені завдання пов'язані із чисельним моделюванням розподілу масової концентрації часток палива при різних поєднаннях конструктивних елементів запальника.

Матеріали та методи досліджень

Для вирішення поставленого завдання необхідно було розробити модель за допомогою якою можливо оцінити величину коефіцієнта надлишку повітря поблизу електричної свічі запалювання факельного запальника камери згоряння ГТД залежно від таких факторів, як температура повітря, витрата повітря (перепад тиску повітря) та конструктивних особливостей корпусу запальника.

Для моделювання горіння складу та горіння паливно-повітряної суміші чисельним методом використовували Partially Premixed Combustion модель горіння [10], C-Equation модель змішання газу та повітря та Discrete Phase модель для моделювання інжекції рідкого газу [11]. Вплив турбулентності повітряного потоку враховували шляхом використання моделі турбулентності $k-\omega$ SST [12].

Використана модель дискретної фази має наступні особливості:

- траєкторії часток/крапель обчислюються в лагранжових координатах (обмін енергією, масою та кількістю руху з ейлеровою газовою фазою);
- об'ємна частка дискретної фази не більш 10% (масова частка може бути великою, не враховується взаємодія між частками);

- турбулентне розсіювання моделюється стохастичним трасуванням і моделлю хмари часток;
- частки обмінюються масою, кількістю руху та енергією із суцільною фазою.

Модель враховує випаровування часток гасу.

Для моделювання процесів усередині камери згоряння на даний час успішно застосовують пакети обчислювальної газодинаміки. Використання 3D-моделей дає можливість точніше визначити вплив конструкції і режиму роботи камери згоряння на температурні поля. Однак при цьому потрібна попередня трудомістка довготривала підготовка зі створення геометричної моделі і генерації розрахункової сітки, а також проведення низки натурних експериментів з визначення початкових умов моделювання.

Планування експерименту і обробка його результатів, а також розрахунки коефіцієнтів парних кореляцій, дисперсійний і регресійний аналіз виконувались в програмному середовищі STATISTICA. Для побудови плану чисельного експерименту використовується модуль DOE. Багатофакторні плани експериментів генеровано відповідно до рекомендацій [13], що дозволило отримати незміщені оцінки головних ефектів і взаємодії другого порядку з використанням найменшого числа спостережень та виконати аналіз дисперсій від факторів.

Моделювання утворення паливно-повітряної суміші та горіння виконано при атмосферному тиску, початкова температура компонентів суміші становила 30°C. Рідкий гас із витратою 0,00142 кг/с у вигляді крапель діаметром 0,92 мкм подавали у факельний запальник. Розмір крапель гасу відповідав медіанному значенню. Кут конуса розпилу гасу становив 30°, що відповідало умовам роботи форсунці на експериментальному стенді. Після цього він змішувався з повітрям при надлишковому тиску 2,5 кПа та надходив у факельний запальник. Моделювано вихід з розрахункової області патрубку факельного запальника у відкритий простір камери згоряння. У зв'язку із цим на виході патрубка задавали нульовий надлишковий тиск.

Результати дослідження та їх аналіз

Найпростіша модель утворення паливно-повітряної суміші містить припущення, що все паливо та повітря, що подаються в запальник, перемішуються з утворенням паливно-повітряної суміші. При цьому передбачається, що перемішування відбувається за короткий проміжок часу, що обумовлює можливість оцінки коефіцієнта надлишку повітря за секундною витратою повітря та палива. Витрату палива визначали для найбільш ефективного перепаду тиску на пусковій форсунці з точки зору диспергування палива. Витрату повітря визначали для перепаду тиску

повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою камери згоряння відповідного режиму запуску в земних умовах на рівні моря. Діаметр повітропідвідного отвору корпусу запальника відповідав величині серійного запальника ГТД.

Коефіцієнт надлишку повітря визначали як масове відношення кількості повітря в паливно-повітряній суміші до кількості повітря, теоретично необхідного для повного згоряння палива, що утримується в цій суміші.

$$\alpha_{\text{аналітична}} = \frac{m_{\text{пов}}}{m_{\text{пал}} \cdot L_0}, \quad (1)$$

де $m_{\text{пал}}$, $m_{\text{пов}}$ – масова витрата повітря та палива через запальник, кг/с, L_0 – стехіометричний коефіцієнт відношення повітря до палива.

Витрату палива через пускову форсунку визначали експериментально, на спеціальному стенді. При перепаді тиску на форсунці 0,25 МПа вона становила 0,0018 кг/с.

Витрата повітря через факельний запальник визначається діаметром повітропідвідного отвору та перепадом тиску і, припускаючи, що повітря являє собою ідеальний газ, може бути розрахована за формулою:

$$m_{\text{пов}} = C \cdot A \cdot P \cdot \sqrt{\left(\frac{k \cdot M}{z \cdot R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}}, \quad (2)$$

де $m_{\text{пов}}$ – масова витрата повітря, кг/с; C – поправочний коефіцієнт з пропускної здатності сопла; A – площа перетину сопла, м²; P – абсолютний тиск газу перед отвором, Па; M – молекулярна маса, кг/кмоль; z – коефіцієнт стискуваності при певних значеннях тиску та температури; R – константа ідеального газу; T – температура повітря, К, k – показник адіабати.

При перепаді тиску повітря 2,5 кПа та діаметрі отвору 7 мм масове значення витрати повітря, розраховане за формулою (1), становить 0,022 кг/с.

Розрахункове значення коефіцієнту надлишку повітря, при даних масових витратах палива та повітря, що розраховані за аналітичною моделлю, становить 0,83.

Враховуючи, що теоретична оцінка витрати повітря через корпус запальника з урахуванням особливостей його плинності, пов'язаного з малими розмірами повітропідвідного каналу та виникненням турбулентних потоків, є складним завданням, для його вирішення були проведені експериментальні дослідження з визначення витрати повітря через корпус запальника залежно від перепаду тиску повітря.

Експериментальна оцінка витрати повітря через факельний запальник і палива через пускову форсунок дозволила оцінити якісний склад паливно-повітряної суміші. Дросельна характеристика запальника може бути представлена залежністю:

$$\bar{G} = \frac{G \cdot \sqrt{T}}{B_0} = f\left(\pi = \frac{B_0}{P_1}\right), \quad (3)$$

де \bar{G} – наведена витрата повітря через запальник, $\text{кг} \cdot \text{К}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$; G – секундна витрата повітря через запальник, кг/с ; T – абсолютна температура повітря, К ; B_0 і P_1 – абсолютні тиски, Па : атмосферний (B_0), і статичний (P_1), вимірюваний на стінці технологічного патрубка із внутрішнім діаметром $d = 19,5$ мм (внутрішній діаметр на виході з запальника також рівний $d = 19,5$ мм) 3-ма дренажними отворами (виведеними в один колектор) на відстані 15 мм від виходу з запальника.

Експериментальне значення витрати повітря становить 6,572 г/с. Розрахункове значення коефіцієнта надлишку повітря для значень витрат, отриманих експериментально, становить:

$$\alpha_{\text{експериментальна}} = \frac{6,572 \cdot 10^{-3}}{0,0018 \cdot 14,75} = 0,25. \quad (4)$$

Отримане значення коефіцієнта надлишку повітря вказує на значне перебагачення паливно-повітряної суміші паливом.

Результати теоретичної та експериментальної оцінки складу паливно-повітряної суміші у факельному запальнику показали, що склад суміші сильно перебагачений паливом. Беручи до уваги досить значні допущення, використані при моделюванні складу паливно-повітряної суміші, можна припускати, що отримане розрахункове значення коефіцієнта надлишку повітря суттєво відрізняється від реального. При цьому на співвідношення повітря-гас виявляє вплив як перепад тиску повітря і його температура, так і геометричні особливості корпусу запальника. Для виділення найбільш значимих факторів і оцінки ступені їх впливу необхідне проведення моделювання якісного складу ППС із використанням моделі, що враховує особливості конструкції запальника.

Враховуючи складність розв'язання завдання оцінки якості паливно-повітряної суміші у факельному запальнику ГТД аналітичним методом з точністю, прийнятною для оптимізації конструкції та режиму подачі палива, у роботі [1] запропонований підхід, заснований на чисельному моделюванні. Для реалізації моделі течії та тепломасообміну багатокомпонентного двофазного реагуючого середовища, необхідна реалізація ряду субмоделей, що включають

модель газової фази, міжкомпонентної взаємодії, модель дисперсної фази та міжфазної взаємодії.

Досвід розробки та реалізації субмоделей течії та тепломасообміну багатокомпонентного двофазного середовища, наведений у роботі [1], показує, що незважаючи на вірогідність оцінки досліджуваних параметрів методами обчислювальної аерогідродинаміки оцінити склад паливно-повітряної суміші, що формується в корпусі факельного запальника біля свічі запалення, з урахуванням особливостей його геометрії за допомогою наведеної в роботі [1] математичної моделі, є трудомістким завданням.

Для вирішення даного завдання перспективним є застосування чисельних методів моделювання сумішоутворення та горіння з використанням комерційних програмних продуктів, наприклад, ANSYS Fluent. Такий підхід дозволяє, по-перше, використовувати вбудовані моделі сумішоутворення та горіння двофазного середовища (паливно-повітряної суміші гасу та повітря), що забезпечує високий рівень вірогідності результатів моделювання, а, по-друге, розглядати процеси сумішоутворення з урахуванням особливостей конструкції корпусу запальника, що дозволяє виконати їхню оптимізацію.

Моделювання виконано для корпусів факельних запальників, що мали різні геометричні розміри. Варіювання геометрією корпусу факельного запальника згідно з розробленою матрицею планування експерименту (табл. 1, 2, рис. 1) дозволило оцінити вплив особливостей геометрії корпусу факельного запальника на масову концентрацію часток гасу в паливно-повітряній суміші (рис. 2).

Таблиця 1
Фактори та діапазони їх варіювання

№ з/п	Фактор	Діапазон варіювання
1	Перепад тиску повітря $\Delta P_{\text{ккж}}$, кПа	1,0...2,5
2	Температура повітря $t_{\text{п}}$, °C	-50...50
3	Діаметр повітропідвідного отвору $d_{\text{вх}}$, мм	3...7
4	Діаметр вихідного отвору (патрубка) $D_{\text{вих}}$, мм	6...10
5	Висота корпусу h , мм	60...80
6	Ширина повітропідвідного каналу b , мм	5...13

Коефіцієнт кореляції між значеннями коефіцієнту надлишку повітря біля свічі запалення та температурою факелу полум'я запальника [2] складає 0,27. Низьке значення коефіцієнту кореляції свідчить про складність процесів, які відбуваються у корпусі запальника та впливом внутрішнього об'єму запальника на якість ППС на зрізі вихідного патрубка.

Також необхідно відзначити, що в ряді робіт [14] вказується на те, що забезпечення максимальної ефективності горіння паливно-повітряної суміші, досягається при деякому ступені її збідніння. Найбільш оптимальне значення коефіцієнта надлишку повітря за критерієм максимальної потужності полум'я становить 0,86 [15].

Таблиця 2

Значення факторів і функції відгуків

№ з/п	$\Delta P_{\text{кск}}$, кПа	$t_{\text{пов}}$, °C	$d_{\text{вх}}$, мм	$D_{\text{вих}}$, мм	h , мм	b , мм	Масова доля палива	Коефіцієнт надлишку повітря, α
1	1,0	-50	3	6	60	5	0,95	0,001
2	1,0	-50	3	10	60	13	0,65	0,04
3	1,0	-50	7	6	80	13	0,11	0,55
4	1,0	-50	7	10	80	5	0,29	0,17
5	1,0	50	3	6	80	13	0,80	0,02
6	1,0	50	3	10	80	5	0,64	0,04
7	1,0	50	7	6	60	5	0,94	0,001
8	1,0	50	7	10	60	13	0,08	0,78
9	2,5	-50	3	6	80	5	0,86	0,01
10	2,5	-50	3	10	80	13	0,59	0,05
11	2,5	-50	7	6	60	13	0,81	0,02
12	2,5	-50	7	10	60	5	0,47	0,08
13	2,5	50	3	6	60	13	0,89	0,01
14	2,5	50	3	10	60	5	0,66	0,04
15	2,5	50	7	6	80	5	0,77	0,02
16	2,5	50	7	10	80	13	0,16	0,36

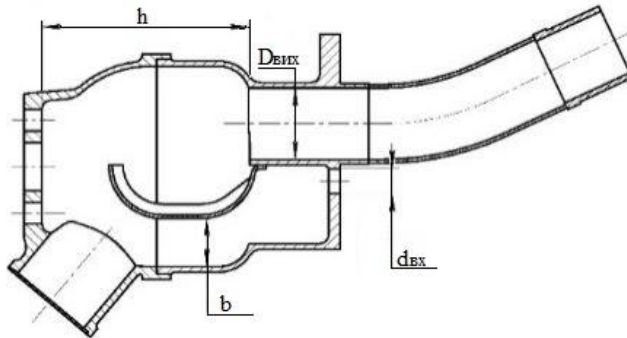


Рис. 1. Геометричні фактори факельного запальника, що впливають на склад паливно-повітряної суміші

Результати моделювання показують (табл. 2), що незалежно від геометрії корпусу факельного запальника склад паливно-повітряної суміші значно відрізняється від стехіометричного убік збагачення. При цьому необхідно відзначити, що найбільш близьке до раціонального співвідношення повітря до палива (0,78) досягається при мінімальному перепаді тиску повітря, максимальній температурі, діаметрів повітропідвідного та вихідного отворів та ширині повітропідвідного каналу.

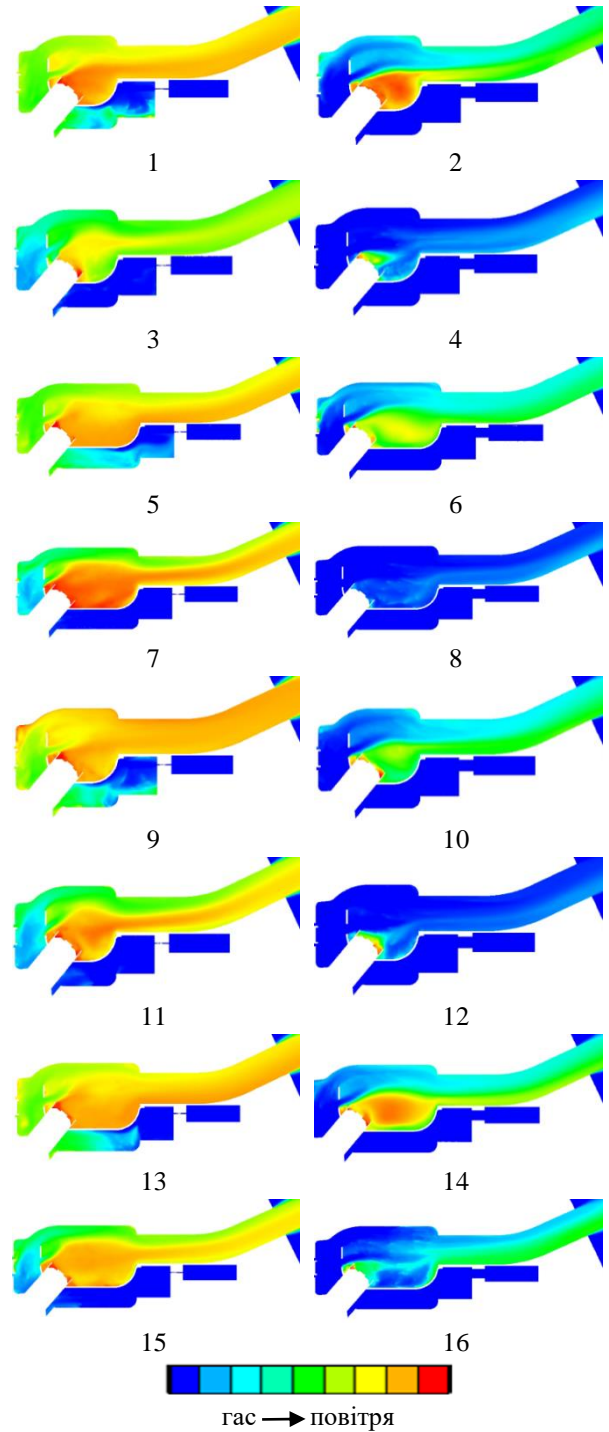


Рис. 2. Поля масової концентрації часток палива в паливно-повітряній суміші (комбінація факторів згідно табл. 1)

В умовах, коли можливість зменшення кількості палива обмежена мінімальним перепадом його тиском на пусковій форсунці, що пов'язано зі зниженням якості розпилу [15], єдиним шляхом є збільшення кількості повітря. Але, як показали результати

попередніх експериментальних досліджень [16] збільшення кількості повітря негативно впливає на температуру факелу полум'я в області низьких температур повітря.

На підставі дисперсійного аналізу встановлено, що максимально на коефіцієнт надлишку повітря біля свічі запалення впливають такі фактори як діаметр повітропідвідного отвору, перепад тиску повітря та поєднання температури перепаду з діаметром вихідного отвору (патрубка). Враховуючи, що температура та перепад тиску повітря на запальнику є фактором нерегульованим та залежними від оточуючої температури повітря та частоти обертів ротора двигуна, відсутність можливості регулювання діаметрів повітропідвідного та вихідного отворів роблять неможливим пряме управління якісним складом паливно-повітряної суміші.

Враховуючи, що пряме управління складом паливно-повітряної суміші при існуючій конструкції факельного запальника є економічно не обґрунтованим і не може бути реалізоване без істотної зміни конструкції, раціональним управлінням складом паливно-повітряної суміші є застосування пульсуючої подачі палива (рис. 3).

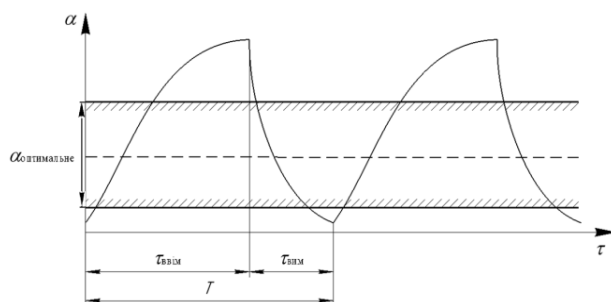


Рис. 3. Схема управління якісним складом паливно-повітряної суміші при пульсуючому режимі подачі палива

Відкриття паливного клапана забезпечує збагачення ППС (рис. 3). Паливо випарюється та осідає на внутрішніх поверхнях корпусу запальника. При цьому, завдяки високому тиску палива, коефіцієнт надлишку повітря ППС швидко перевищує оптимальну величину. При закритті клапана ППС збагачується завдяки випаруванням з внутрішніх поверхонь запальника. Короткочасні ввімкнення та вимкнення подачі палива за допомогою штатного електромагнітного клапана при раціональних значеннях часу дозволяють забезпечувати середнє значення коефіцієнту збагачення паливно-повітряної суміші біля оптимального без внесення змін в конструкцію факельних запальників та системи їх живлення. Це забезпечить підвищення надійності роботи запальника.

Практична реалізація зазначеного способу подачі палива для управління якістю паливно-повітряної суміші на виході з патрубка з метою підвищення температури факелу полум'я та ефективності розпалення камери згоряння розглянута в роботі [17].

Подальшим розвитком дослідження є встановлення закономірностей часу ввімкнутого та вимкнутого стану електромагнітного клапана подачі палива в залежності від температури палива та повітря, а також перепаду повітря на запальнику на коефіцієнт надлишку повітря паливно-повітряної суміші. На підставі чого може бути знайдено оптимальні значення вказаних параметрах які можуть бути закладені в систему автоматичного керування ГТД. Враховуючи, що пульсуюча подача палива у факельний запальник реалізується також з метою забезпечення максимальної температури факелу полум'я та низький коефіцієнт кореляції між коефіцієнтом надлишку повітря біля свічі запалення та температурою факела, необхідно виконати узгодження режиму живлення для досягнення як надійного розпалу запальника так і камери згоряння.

Висновки

1. На підставі теоретичної та експериментальної оцінки якісного складу паливно-повітряної суміші, що сформовано в факельному запальнику камери згоряння ГТД встановлено значне її Perezбагачення паливом незалежно від конструкції корпусу запальника. Встановлено, що розрахункове максимальне значення коефіцієнта надлишку повітря в паливно-повітряної суміші запальника серійної конструкції становить 0,78 за аналітичною моделлю та 0,25 за експериментальною.

2. На підставі чисельного моделювання якісного складу паливно-повітряної суміші для факельного запальника з різною геометрією встановлено, що варіювання початкових умов і геометрії корпусу приводить до зміни коефіцієнта надлишку повітря біля електричної свічі запалення в діапазоні від 0,001 до 0,78.

3. Враховуючи, що пряме управління якістю паливно-повітряної суміші за допомогою зміни масової витрати повітря та палива для існуючої конструкції факельного запальника та паливної системи ГТД технічно не реалізоване, раціональним способом управління якісним складом паливно-повітряної суміші є застосування пульсуючої подачі палива.

4. Для досягнення надійної роботи як факельного запальника так і камери згоряння, що розпалюється від факелу його полум'я, потрібне узгодження режимів пульсуючої подачі палива за

критеріями оптимального складу паливно-повітряної суміші біля свічі розпалення та максимальної температури факелу полум'я.

Література

1. Кравченко, И. Ф. Обеспечение надежного запуска малоэмиссионных камер сгорания авиационных ГТД [Текст]. Дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Национальный аэрокосмический университет. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Харьков, ХАИ, 2006. – 208 с.

2. Торба, Ю. И. Оптимізація конструкції факельного запальника ГТД чисельним методом [Текст] / Ю. И. Торба, Д. В. Павленко, Я. В. Двірник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2020. – №5(165). – С. 83-95. DOI: 10.32620/akt.2020.5.11.

3. Вершинин, Н. Н. Теория горения и взрыва [Текст] : учеб. пособие / Н. Н. Вершинин, Г. В. Козлов, Ю. А. Григорьев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 156 с.

4. Yevsieiev, S. Increasing Accuracy of the Gas Temperatures Pattern Calculation for GTE Combustor Using CFD [Text] / S. Yevsieiev, D. Kozel, I. Kravchenko // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2021. – vol. 188. – P. 440-450. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_37.

5. Nguen, T. D. Experimental and numerical investigation of the mixing ratio for various vane swirlers of the combustion chamber of a gas turbine engine [Text] / T. D. Nguen, Y. B. Aleksandrov, A. I. Sulaiman, B. G. Mingazov // *Russian Aeronautics*. – 2020. – Vol. 63, Iss. 4. – P. 669-676. DOI:10.3103/S1068799820040145.

6. Adarshgouda, G. Design and Optimization of Annular Combustion Chamber for Turbine Engine [Text] / G. Adarshgouda, B. N. Ravikummar // *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2021. – Vol. 8, Iss. 1. – P. 344-352.

7. Serbin, S. Investigations of the working process in a dual-fuel low-emission combustion chamber for an fpso gas turbine engine [Text] / S. Serbin, B. Diasamidze, M. Dzida // *Polish Maritime Research*. – 2020. – Vol. 27, Iss. 3. – P. 89-99. DOI: 10.2478/pomr-2020-0050.

8. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели [Текст] / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь : «Авиадвигатель», 2006. – 1202 с.

9. Пат. 2083858 РФ, МПК F02C7/26. Воспламенитель камеры сгорания газотурбинного двигателя [Текст] / В. В. Владимиров, С. Ф. Летуновский ; заявитель и патентообладатель Омск. моторостроит. констр. бюро. – № 93011293/06 ; заявл. 02.03.1993; опубл. 10.07.1997.

10. ANSYS Fluent manual. Chapter 16. Modeling Partially Premixed Combustion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp16.pdf>. – 20.09.2020.

11. ANSYS Fluent manual. Chapter 19. Discrete Phase Models [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp19.pdf>. – 20.09.2020.

12. ANSYS Fluent manual. Chapter 10. Modeling Turbulence. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp10.pdf>. – 20.09.2020.

13. George, E. P. Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery [Text] / E. P. George, J. Stuart Box, G. William. – 2nd Edition by George E. P. Box Hardcover, 2005. – 655 p.

14. Соотношение воздух-топливо – Air-fuel ratio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.qwe.wiki/wiki/Air%E2%80%9393fuel_ratio. – 20.09.2020.

15. Торба, Ю. И. Зависимость качества распыла пусковой форсунки воспламенителя ГТД от перепада давления топлива [Текст] / Ю. И. Торба, Д. В. Павленко // *Вестник двигателестроения*. – 2019. – № 1. – С. 46–53.

16. Торба, Ю. И. Исследование методов повышения эффективности работы факельных воспламенителей камер сгорания ГТД / Ю. И. Торба, Д. В. Павленко, Д. В. Ткач // *Технологические системы*. – 2020. – № 4. – С. 63-73.

17. Патент № 141741 України, МПК F02C 7/26 (2006.01) Спосіб подачі палива в запальні пристрої газотурбінних двигунів [Текст] / І. Ф. Кравченко, Ю. І. Торба, Д. В. Павленко, В. М. Гусев, А. С. Харченко, Д. В. Козел ; ДП "Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро "Прогрес" ім. академіка О.Г. Івченка" № u201910148 ; заявл. 01.10.2019 ; опубл. 27.04.2020. бюл. № 8.

References

1. Kravchenko, I. F. Obespechenie nadezhnogo zapuska malojemissionnyh kamer sgoranija aviacionnyh GTD [Ensuring reliable start-up of low-emission combustion chambers for aircraft gas turbine engines]. Dis. kand. tehn. nauk: 05.07.05. Nacional'nyj ajerokosmicheskij universitet N.E. Zhukovskogo «Har'kovskij aviacionnyj institut». Kharkov, KHAI Publ., 2006. 208 p.

2. Torba, Ju. I., Pavlenko, D. V., Dvirnik, Ja. V. Optimizacija konstrukcii fakel'nogo zapal'nika GTD chisel'nim metodom [Optimization of the design of the gas turbine engine flare igniter by the numerical method]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 5(165), pp. 83-95. DOI: 10.32620/akt.2020.5.11.

3. Vershinin, N. N., Kozlov, G. V., Grigor'ev, Ju. A. *Teorija gorenija i vzryva: ucheb, posobie* [The theory of combustion and explosion: textbook, manual]. Penza, Izd-vo PGU, 2014. 156 p.

4. Yevsieiev, S., Kozel, D., Kravchenko, I. Increasing Accuracy of the Gas Temperatures Pattern Calculation for GTE Combustor Using CFD. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering -*

2020. *ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 188, pp. 440-450. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_37.

5. Nguen, T. D., Aleksandrov, Y. B., Sulaiman, A. I., Mingazov, B. G. Experimental and numerical investigation of the mixing ratio for various vane swirlers of the combustion chamber of a gas turbine engine. *Russian Aeronautics*, 2020, vol. 63, iss. 4, pp. 669-676. DOI: 10.3103/S1068799820040145.

6. Adarshgouda, G., Ravikumar, B. N. Design and Optimization of Annular Combustion Chamber for Turbine Engine. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2021, vol. 8, iss. 1, pp. 344-352.

7. Serbin, S., Diasamidze, B., Dzida, M. Investigations of the working process in a dual-fuel low-emission combustion chamber for an fpso gas turbine engine. *Polish Maritime Research*, 2020, vol. 27, iss. 3, pp. 89-99. DOI: 10.2478/pomr-2020-0050.

8. Inozemcev, A. A., Sandrackij, V. L. *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm', «Aviadvigatel'» Publ., 2006. 1202 p.

9. Vladimirov, V. V., Letunovskij, S. F. *Vosplamenitel' kamery sgoranija gazoturbinnogo dvigatelja* [Combustion chamber igniter of a gas turbine engine]. Patent RF, no. 2083858, 1993.

10. *ANSYS Fluent manual. Chapter 16. Modeling Partially Premixed Combustion*. Available at: <https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp16.pdf>. (accessed 20.09.2020).

11. *ANSYS Fluent manual. Chapter 19. Discrete Phase Models*. Available at: [https://www.afs.](https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp19.pdf)

[enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp19.pdf](https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp19.pdf). (accessed 20.09.2020).

12. *ANSYS Fluent manual. Chapter 10. Modeling Turbulence*. Available at: <https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp10.pdf>. (accessed 20.09.2020).

13. George, E. P., Box, Stuart J., William, G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, Box Hardcover Publ., 2005. 655 p.

14. *Air-fuel ratio*. Available at: https://ru.qwe.wiki/wiki/Air%E2%80%9393fuel_ratio. (accessed 20.09.2020).

15. Torba, Ju. I., Pavlenko, D. V. *Zavisimost' kachestva raspyla puskovoj forsunki vosplamenitelja GTD ot perepada davlenija topliva* [Dependence of the spray quality of the starting nozzle of the GTE igniter on the fuel pressure drop]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2019, no. 1, pp. 46-53.

16. Torba, Ju. I., Pavlenko, D. V., Tkach, D. V. *Issledovanie metodov povyshenija jeffektivnosti raboty fakel'nyh vosplamenitelej kamer sgoranija GTD* [Investigation of the methods for increasing the efficiency of gas-turbine engine combustion chamber flare igniters]. *Tehnologicheskie sistemy*, 2020, no. 4, pp. 63-73.

17. Kravchenko, I. F., Torba, Ju. I., Pavlenko, D. V. et al. *Sposib podachi paliva v zapal'ni pristroji gazoturbinnih dviguniv* [The method for feeding firing in the ignition annexe of gas turbine engines]. Patent Ukraine, no. 141741, 2020.

Надійшла до редакції 15.08.2021, розглянута на редколегії 23.09.2021

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ФАКЕЛЬНОМ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Ю. И. Торба, Д. В. Павленко, В. В. Манжос

Качественный состав топливно-воздушной смеси, которая формируется в факельном запальнике камеры сгорания ГТД, определяет эффективность и надежность их работы. Основной задачей исследования являются определения качественного состава топливно-воздушной смеси возле электрической свечи розжига факельного запальника ГТД в зависимости от его геометрических особенностей и режима эксплуатации двигателя. Выполнена оценка состава смеси аналитическим, экспериментальным и численным методами. Установлено значительное переобогащение топливно-воздушной смеси в корпусе запальника аналитической модели, которое подтверждено экспериментально. Для определения полей массовой концентрации частиц топлива в топливно-воздушной смеси в корпусе факельного запальника с учетом особенностей течения воздуха и подачи топлива для различных сочетаний конструктивных особенностей и режимов работы ГТД, использована численная модель. С использованием численной модели стационарного горения топливно-воздушной смеси, которая подготовлена в корпусе факельного запальника камеры сгорания газотурбинного двигателя путем испарения и распыления частичек авиационного керосина в воздушном потоке, исследовали влияние геометрических параметров корпуса и внешних факторов на коэффициент избытка воздуха возле электрической свечи розжига. Реализация дробно-факторного эксперимента разрешила установить степень влияния каждого из факторов, которые исследовали, и их взаимодействия на коэффициент избытка воздуха. Установлен коэффициент корреляции между коэффициентом избытка воздуха возле свечи и средней температурой пламени. Учитывая отсутствие у серийных конструкций факельных запальников регулирующих устройств, предложено для управления качественным составом топливно-воздушной смеси использовать импульсную подачу топлива. Очерченные дальнейшие пути исследования для повышения надежности розжига как факельного

запальника от электрической свечи, так и камеры сгорания ГТД от факела пламени.

Ключевые слова: факельный запальник; топливно-воздушная смесь; коэффициент избытка воздуха; модель; горение; розжиг.

MODELING THE QUALITATIVE COMPOSITION OF A FUEL-AIR MIXTURE IN A PANEL IGNITER OF A GTE COMBUSTION CHAMBER

Yu. Torba, D. Pavlenko, V. Manzhos

The qualitative composition of the fuel-air mixture, which is formed in the torch igniter of the combustion chamber of the gas turbine engine (GTE), determines the efficiency and reliability of their work. The main task of the study is to determine the qualitative composition of the fuel-air mixture near the electric spark plug of the GTE torch igniter depending on its geometric features and engine operation condition. The composition of the mixture was evaluated using analytical, experimental, and numerical methods. According to the analytical model, a significant over-enrichment of the fuel-air mixture in the igniter housing was established and confirmed experimentally. A numerical model was used to determine the fields of mass concentration of fuel particles in the fuel-air mixture in the torch igniter housing, considering the peculiarities of airflow and fuel supply for different combinations of GTE design features and operating conditions. The influence of geometric parameters of the housing and external factors was investigated using the numerical model of stationary combustion of fuel-air mixture, which was prepared in the torch igniter housing of GTE combustion chamber by evaporation and spraying of aviation kerosene particles in the air stream. The implementation of a small-factor experiment allowed to establish the degree of influence of each factor under study and their interaction on the excess air coefficient. The correlation coefficient between the coefficient of excess air near the spark plug and the average flame temperature is set. Given the absence of serial designs of controller torch ignites, it is proposed to use a pulsed fuel supply to control the quality of the fuel-air mixture. Further ways of research to increase the reliability of ignition of both the torch igniter from the electric spark plug and the combustion chamber of GTE from the flame is outlined.

Keywords: torch igniter; fuel-air mixture; excess air coefficient; model; combustion; ignition.

Торба Юрій Іванович – канд. техн. наук, начальник експериментально-випробувального комплексу, ДП «Івченко-Прогрес», Дніпро, Україна.

Павленко Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, проф. каф. технології авіаційних двигунів, Національний університет «Запорізька політехніка»; провідний інженер експериментально-випробувального комплексу, ДП «Івченко-Прогрес», Дніпро, Україна.

Манжос Віталій Вікторович – провідний інженер-дослідник експериментально-випробувального комплексу, ДП «Івченко-Прогрес», Дніпро, Україна.

Torba Yuri – Ph.D., Head of Experimental Research Complex SE "Ivchenko-Progress",
e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049.

Pavlenko Dmytro – Ph.D., professor of Aircraft engines technologies department, National University "Zaporizhzhia polytechnic"; leading engineer of Experimental Research Complex SE "Ivchenko-Progress",
e-mail: dvp1977dvp@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6376-2879.

Manzhos Vitaliy – Leading Research Engineer of Experimental Research Complex SE "Ivchenko-Progress",
Dnipro, Ukraine,
e-mail: vmangosv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4168-3947.