

УДК 621.452.3.034-048.34:517.962.1

doi: 10.32620/aktt.2020.5.11

Ю. І. ТОРБА¹, Д. В. ПАВЛЕНКО^{2,1}, Я. В. ДВІРНИК^{2,3}¹ ДП ЗМКБ «Івченко- Прогрес», Запоріжжя, Україна² Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна³ АО «МОТОР СИЧ», Запоріжжя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ФАКЕЛЬНОГО ЗАПАЛЬНИКА ГТД ЧИСЕЛЬНИМ МЕТОДОМ

Вирішували завдання підвищення ефективності роботи факельного запальника камери згоряння газотурбінного двигуна шляхом підвищення температури факела полум'я за рахунок оптимізації конструкції корпусу. Для визначення впливу різних геометричних параметрів корпусу запальника, які впливають на утворення та горіння паливоповітряної суміші, розроблено параметричну модель, що в сукупності з розробленим проектом в програмному комплексі ANSYS Workbench дозволило автоматизувати процес моделювання. З використанням чисельної моделі стаціонарного горіння паливоповітряної суміші, яку підготовлено у корпусі факельного запальника камери згоряння газотурбінного двигуна шляхом випару і розпилення частинок авіаційного гасу у повітряному потоці, досліджували вплив геометричних параметрів корпусу і зовнішніх факторів на середню температуру факела полум'я. Адекватність результатів чисельного моделювання підтверджували шляхом реалізації серії додаткових натурних експериментів за критерієм Фішера. З використанням кореляційного аналізу результатів вимірів температури у різних точках факела полум'я встановлена його однорідність і правомірність оцінки середньої температури. Для визначення ступеня і характеристики їх впливу послідовно реалізовували дрібнофакторний (що відсіває фактори) та повнофакторний експерименти з варіюванням факторами на двох і трьох рівнях. За результатами дисперсійного аналізу обрані найбільш статистично значимі фактори. Встановлена регресійна залежність, що пов'язує діаметр повітровідвідного отвору і перепаду тиску повітря з температурою факела полум'я. Виконана якісна і кількісна оцінка впливу розглянутих факторів на процес формування паливоповітряної суміші і її горіння. Визначені оптимальні величини геометричних параметрів корпусу факельного запальника і умов його роботи, при яких забезпечується максимальна температура факела полум'я на етапі стаціонарного горіння. Встановлені залежності, що пов'язують конструктивні особливості та режим роботи запальника з температурою факела полум'я дозволяють розширити діапазон стійкого розпалення камер згоряння газотурбінних двигунів в залежності від конструкцій запальника, режиму подачі пускового палива та перепаду тиску повітря.

Ключові слова: факельний запальник; газотурбінний двигун; форсунка; факел; полум'я; паливо; температура; метод скінчених елементів; моделювання; оптимізація.

Вступ

Ефективність роботи факельних запальників камери згоряння є важливою ланкою забезпечення надійності ГТД. Незважаючи на те, що факельні запальники досить довгий час успішно застосовуються на серійних ГТД, доведення їх конструкцій для нових двигунів є тривалим і дорогим процесом. Цьому сприяє різноманітність режимів роботи, складність процесів, що протікають у запальнику, а також відсутність можливості ефективного регулювання їх параметрів у процесі експлуатації. Це унеможливує створення запальників нової конструкції шляхом простого масштабування існуючих. Однак, використання сучасних програмних комплексів чисельного моделювання процесу горіння у комбінації з методами планування експериментів і оптимізації є ефективним способом скорочення витрат

на проектування і доведення запальників нових ГТД із урахуванням режимів їх роботи на стадії розпалу камери згоряння.

Аналіз публікацій, постановка цілей і завдань дослідження

Питанням проектування і вдосконалення різних систем запуску камер згоряння ГТД у літературі приділяється досить велика увага. Однак, незважаючи на досить велику кількість досліджень, присвячених моделюванню процесів горіння із застосуванням сучасних інструментів обчислювальної газодинаміки, майже всі з них присвячені дослідженню камер згоряння (КЗ) ГТД різних конструкцій. Питання організації процесу горіння у факельних запальниках, що принципово відрізняються за умовами утворення паливоповітряної суміші і її горіння,

залишається маловивченим. Так, у роботі [2] із застосуванням CFX-аналізу досліджували термоакустичні процеси у камерах згоряння низькоемісійної КЗ. У роботах [3 – 6] вивчаються питання, пов'язані з математичним моделюванням, методологіями розрахунків, прогнозуванням пускових і зривних характеристик КЗ, а також верифікації моделей горіння, розроблених з використанням чисельних методів. Однак отримані в цих і аналогічних дослідженнях результати не можуть бути застосовані для оптимізації конструкції факельних запальників, зона змішування і горіння в яких значно відрізняється за габаритами і режимом роботи від КЗ. Наявні численні дослідження з горіння в КЗ поршневих двигунів, умови подачі палива і геометрія КЗ яких є аналогічними до тих, що у факельних запальниках, також не дозволяють виконати оптимізацію їх конструкції. Так, відомі дослідження в області сумішоутворення у камерах згоряння стосовно до двигунів внутрішнього згоряння [7 – 9]. У тому числі відомі роботи з математичного моделювання цих процесів, наприклад [10]. Однак процеси сумішоутворення у факельних запальниках КЗ ГТД суттєво відрізняються від аналогічних процесів у ДВЗ. Це, зокрема, викликано наявністю деталей складної форми, що впливають на картину течії газів у запальнику, а також відсутністю циклу стиску. Досить добре вивчені і описані питання сумішоутворення і горіння у термоімпульсних машинах, працюючих на газоподібному паливі, наприклад у роботах [11, 12]. Однак великий об'єм КЗ у таких пристроях робить малоефективним поширення отриманих результатів на факельні запальники ГТД. У зв'язку із цим процеси сумішоутворення і горіння у запальниках потребують спеціального вивчення. Результати роботи [13] показали, що застосування чисельного моделювання дозволяє оцінювати температуру факела полум'я запальника і ряд інших параметрів залежно від геометрії і умов роботи. У такий спосіб чисельне моделювання може бути надійним інструментом для оптимізації конструкції запальників ГТД і підвищення ефективності їх роботи у різних умовах.

Метою даної роботи було визначення оптимальних геометричних параметрів корпусу запальника, що забезпечують максимальну температуру факела полум'я на етапі горіння з урахуванням величини перепаду тиску повітря і його температури. Для її досягнення були вирішені завдання з оцінки адекватності чисельної моделі горіння, реалізації дрібнофакторних і повнофакторних експериментів, оцінки найбільш значимих факторів, побудови регресійної моделі, оцінюючої температуру факела полум'я, і визначення оптимальної комбінації геометричних параметрів корпусу запальника.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження виконували для конструкції серійного факельного запальника гвинтовентиляторного двигуна Д-27 (рис. 1).

Параметром, що характеризує ефективність роботи запальника при моделюванні горіння чисельним методом, є усереднена температура факела полум'я, що розраховується по дев'яти точкам (рис. 1, в).

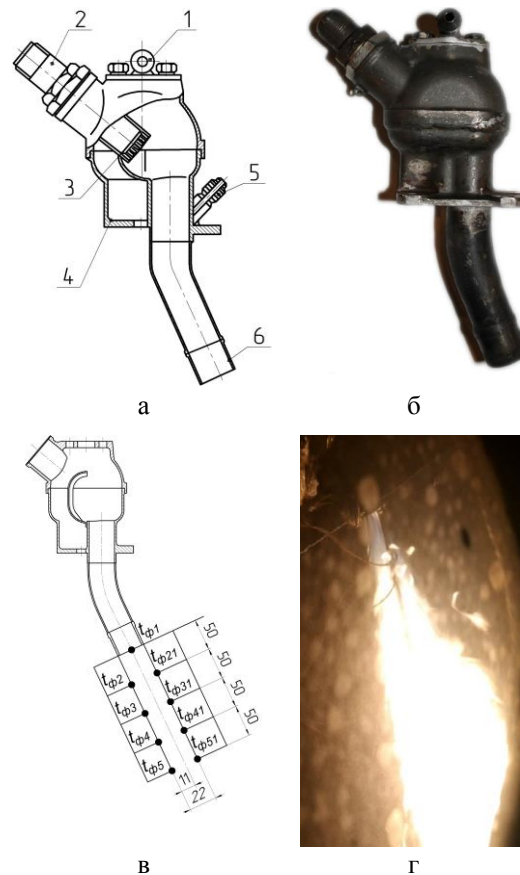


Рис. 1. Поздовжній розріз (а) і загальний вид досліджуваного факельного запальника (б), схема установки термодпар на гребінці для вимірювання температури (в) та факел полум'я (г): 1 –пускова форсунка; 2 – свіча електрична; 3 – екран свічі; 4 – корпус запальника; 5 – штуцер для виміру тиску повітря на вході у запальник; 6 – вихідної патрубков

Вибір середньої температури факела полум'я як функції відгуку і критерію оптимізації якості роботи факельного запальника пояснюється надійністю даного параметра і простотою його вимірювання. Попередні експерименти, пов'язані зі спробами оцінити додатково до температури об'єм факела полум'я, показали, що даний параметр не є інформативним. При проведенні випробувань у спеціальному відсіку термобарокамери факел полум'я може змінювати свій напрямок або відбиватися від стінки

камери. Це унеможливило оцінку об'єму факела на деяких з режимів роботи запальника. Середню температуру факела розраховували за формулою:

$$T_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (1)$$

де T_i – температура, що визначається i -ою термопарою, °C;

n – кількість термопар у гребінці.

Для вибору і коректування параметрів чисельної моделі горіння виконували натурний експеримент по дослідженню температури полум'я для запальника існуючої конструкції. Конструкція експериментального стенда докладно описана у роботі [14], методика проведення експериментального дослідження температури факела полум'я – у роботі [13]. Дослідження проводили при перепаді тиску повітря на вході 2,5 кПа, температурі палива 50°C, тиску палива 0,25 МПа, температурі повітря 50°C та 0°C. Геометрія корпусу запальника відповідала серійному запальнику ГТД Д-27 ($D_{\text{вых}} = 12$ мм; $d_{\text{вх}} = 7$ мм; $H = 60$ мм; $h = 8$ мм).

Планування експерименту і обробку його результатів, а також розрахунки коефіцієнтів парних кореляцій, дисперсійний і регресійний аналіз виконували в програмному комплексі STATISTICA. Для побудови плану чисельного експерименту використовували модуль DOE. Багатофакторні плани експериментів генерували відповідно до рекомендацій Box. Hunter. & Hunter [15], що дозволило отримати незміщені оцінки головних ефектів і взаємодію другого порядку з використанням найменшого числа спостережень.

Моделювання процесу горіння паливоповітряної суміші у запальнику виконували у програмному комплексі ANSYS Workbench 2019 R3. Використовували скінченно-елементну модель стаціонарного горіння Partially Premixed Combustion, докладно описану в роботі [13]. Використовувалася модель турбулентності потоку SST, модель матеріалу – Ideal gas, модель інжекції рідкого гасу – Discrete Phase. Ініціацію горіння виконували за допомогою джерела енергії у зоні розташування свічі. Критерій збіжності становив $1 \cdot 10^{-5}$. Середня кількість ітерацій становила близько 1500 шт. Використовували структуровану сітку кубічних скінчених елементів HEX, побудову якої виконували з використанням генератора Fluent meshing. Це дозволило отримати високу якість сітки скінчених елементів для всіх конструктивних елементів. Загальна кількість елементів становила 8–10 млн. шт. Розмір скінчених елементів у зоні горіння не перевищував 0,5 мм. Розмір скінчених елементів за межами зони змішування і горіння становив 5 мм (рис. 2).

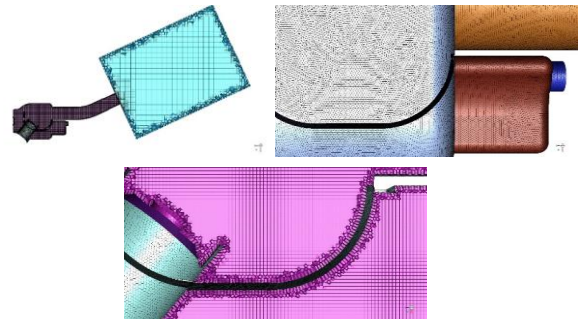


Рис. 2. Фрагменти скінченно-елементної моделі газового потоку у корпусі запальника

Для отримання рівномірної епюри швидкості потоку на зрізі повітропідвідного отвору запальника (рис. 3) (1) швидкість задавали на зрізі вхідного циліндра (2), що має більший діаметр. Робочу зону відсіку камери згоряння моделювали циліндром великого діаметра (3). Його досить великий розмір дозволив виключити крайові ефекти і їх вплив на температуру факела. Перепад тиску повітря між повітропідвідним отвором і вихідним патрубком задавали шляхом зміни тисків у циліндрах (2) і (3), що дозволило мінімізувати вплив граничних ефектів. Рух крапель палива, що розпорошується відцентровою форсункою, вивчали за допомогою високошвидкісної камери моделі FASTCAM Novos S12. Кадрова частота зйомки становила 1·10⁴ кадрів у секунду. Обробку зображень виконували у програмі GOM Player.

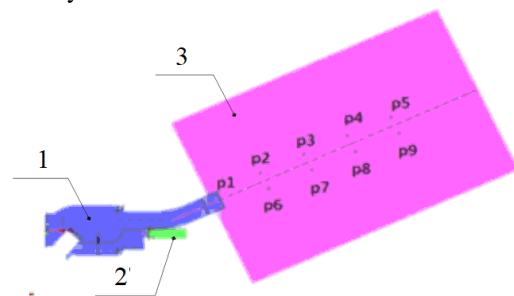


Рис. 3. Точки визначення середньої температури факела полум'я: 1 – корпус запальника; 2 – вхідний циліндр; 3 – вихідний циліндр

Результати дослідження та їх аналіз

Оптимізація конструкції запальника вимагала наявності залежності, що пов'язує параметри його геометрії, перепад тиску повітря і його температуру з температурою факела полум'я. Враховуючи, що отримати таку залежність в аналітичному вигляді є складним завданням, для оптимізації використовували регресійну модель, отриману на підставі реалізації повнофакторних чисельних експериментів. Чисельні експерименти були засновані на моделі горіння, що адекватно описує температуру факела

полум'я в досліджуваних діапазонах зміни параметрів. При цьому для використання моделі взаємодії частинок палива з повітрям *interaction with continuous phase* необхідно було визначити, як середній розмір крапель при використовуваному типі форсунки і перепаді тиску палива на ній, так і швидкість їх поширення. Розмір крапель палива приймали відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [16]. Для оцінки швидкості поширення крапель і вивчення особливостей його будови виконували високошвидкісну зйомку при перепаді тиску палива 0,35 МПа. Положення крапель у факелі розпилю фіксували до 0,1 секунди з дискретністю $1 \cdot 10^{-3}$ с. У результаті досліджень встановлено, що у початковий момент подачі палива на виході з форсунки формується хмара великих крапель (рис. 4, а). Протягом $1 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ с фронт хмари крапель стабілізується (рис. 4, б) і на ділянці, що встановилася, рухається із середньою швидкістю 2 ... 2,5 м/с (рис. 4, в).

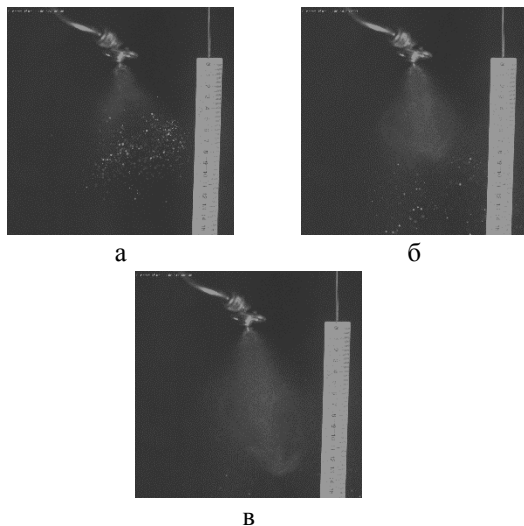


Рис. 4. Поширення хмари крапель палива у початковий момент (а), на етапі стабілізації (б) і ділянці, що установилася, (в) упорскування

Для визначення ряду параметрів чисельної моделі горіння і наступної оцінки її адекватності виконували натурний експеримент по дослідженню температури факела полум'я для запальника існуючої (серійної) конструкції двигуна Д-27. Дослідження проводили при перепаді тиску повітря на вході 2,5 кПа і температурі палива 50 °С, тиску палива 0,35 МПа, температурі повітря 0 °С і 50 °С. Температуру факела вимірювали на десятій секунді після початку розпалу паливоповітряної суміші. Аналіз середніх значень експериментально встановлених температур на гребінці термопар і розрахункових температур показав задовільну відповідність чисельної моделі експериментальним значенням. Спос-

тережувані відмінності значень можуть пояснюватися як недосконалістю моделі, так і виникненням рідкої фази на спаї термопар.

Беручи до уваги можливість відбиття факела від задньої стінки іспитового відсіку і, таким чином, впливу на температуру в області, досить віддаленій від зрізу вихідного патрубку запальника, проводили дослідження тісноти зв'язку показів термопар у гребінці для різних режимів роботи запальника. Дослідження значень коефіцієнтів парних кореляцій між значеннями температур, вимірюваними термопарами, розміщеними на гребінці при температурі повітря як при 50 °С, так і 0 °С, показало, що незалежно від температури навколишнього повітря їх значення перебувають у діапазоні 0,98...0,99. Наявність тісних кореляційних зв'язків свідчить про однорідність протікання процесів у факелі полум'я і правомірності вибору середньої температури як критерію оптимізації.

Вибір критеріїв оптимізації конструкції факельних запальників ГТД, що виявляють істотний вплив на температуру факела полум'я, ґрунтувався на досвіді їх експериментального доведення. З одного боку, необхідно було вибрати параметри, які найбільшою мірою впливають на ефективність роботи запальника, а з іншого сторони, щоб вони були незалежні один від одного і керовані. Використання такого підходу дозволило застосувати теорію планування експерименту для оптимізації конструкції запальника.

Параметри оптимізації конструкції факельного запальника, що визначають його ефективність роботи (рис. 5), і діапазони їх варіювання наведені в табл. 1.

На першому етапі дослідження враховували зміни як усіх прийнятих факторів, що характеризують конструкцію запальника, так і умов його роботи (табл. 1).

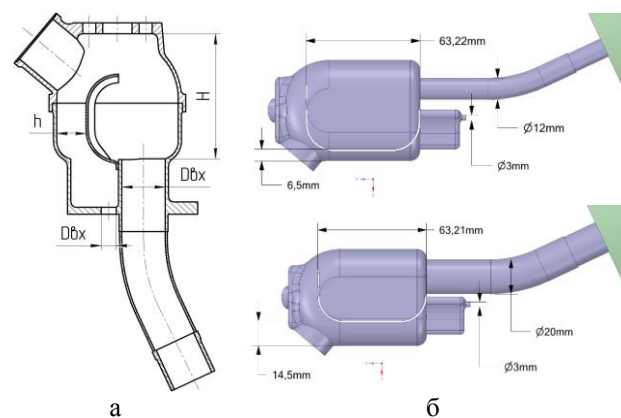


Рис. 5. Параметри оптимізації (а) і твердотільні моделі (б) корпусу/у факельного запальника

Таблиця 1

Фактори і діапазони варіювання

№ п/п	Фактор	Діапазон варіювання
1	Перепад тиску повітря, $dP_{\text{вх}}$ кПа	1,0...2,5
2	Температура повітря, $T_{\text{вх}}$ °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, h , мм	5...13

Мінімальне значення фактору у кодованому масштабі позначали -1, максимальне +1. При загальному числі незалежних змінних (факторів) 6 і рівні їх варіювання 3, що забезпечує отримання нелінійної залежності функції відгуку від досліджуваних параметрів, загальна кількість дослідів у повнофакторному плані становить 729 шт. При варіюванні факторів на двох рівнях кількість дослідів скорочується до 64. Реалізація одного чисельного експерименту становить порядку 8 годин. У такий спосіб загальний час моделювання, без обліку підготовчих операцій, може скласти 5832 год при варіюванні факторами на трьох рівнях і 512 год при дворівневому варіюванні. Очевидно, що незважаючи на переваги повнофакторного експерименту, що полягають у можливості оцінки не тільки основних ефектів, але і ефектів парної взаємодії, практична реалізація такої кількості дослідів чисельним методом, незважаючи на відсутність необхідності їх дублювання, є нерациональною.

Враховуючи, що кількість факторів, які можуть впливати на усталену роботу запальника, досить велика, на першому етапі проводили експеримент, що відсіває фактори, із користуванням наднасиченого плану при варіюванні факторами на двох рівнях. Був реалізований дворівневий дрібнофакторний план експерименту $2^{(6-2)}$. Застосування $1/4$ репліки від повного плану експерименту дозволило для 6-ти незалежних змінних скоротити число дослідів до 16-ти, виявити головні ефекти впливу і ефекти парної взаємодії факторів. На етапі відсіювання факторів дублювання дослідів не виконували. Контраст для $1/4$ репліки від повного факторного плану 26 задавали у вигляді:

$$I_5 = I_1 \cdot I_2 \cdot I_3; I_6 = I_2 \cdot I_3 \cdot I_4, \quad (2)$$

де I_i – кодоване значення i -го фактора.

Реалізація плану експерименту, що відсіває фактори, дозволило отримати інформацію, достатню для оцінки їх впливу на середню температуру факела полум'я (табл. 3, рис. 7).

Аналіз діаграми Парето, що відображає кумулятивний внесок дисперсій від кожного фактора у мінливість температури, показує, що найменший

вплив на неї виявляє діаметр вихідного патрубка ($D_{\text{вих}}$) і ширина повітропідвідного каналу (h). Їх збільшення сприяє підвищенню температури, у зв'язку із чим при подальшому аналізі вони прийняті константами на максимальному рівні. Враховуючи, що модель, отримана за результатами дрібнофакторного експерименту, містить недостатню кількість інформації про якісний вплив факторів на функцію відгуку, на другому етапі дослідження був реалізований повнофакторний експеримент із варіюванням факторів, які вносять найбільший вклад у мінливість температури факела полум'я (рис. 6).

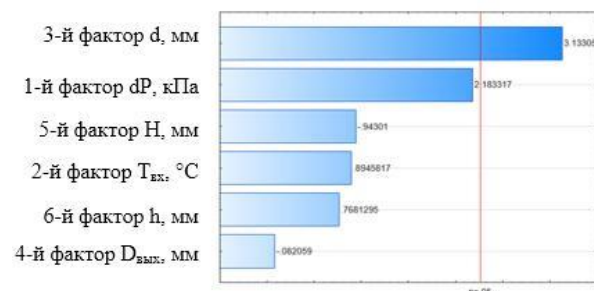


Рис. 6. Діаграма Парето для моделі без ефектів парної взаємодії (табл. 1)

Для вивчення впливу значимих факторів на температуру факела полум'я і наступної оптимізації їх величини реалізовували повнофакторний експеримент для найбільш значимих факторів, що визначають геометрію запальника і умови його роботи. Для отримання даних про ефекти парних взаємодій факторів першого і більш високого порядку, а також враховуючи їхню можливу нелінійну зміну, на даному етапі дослідження раціональним було варіювання факторами на три і більше рівнях. Враховуючи, що реалізація повнофакторного експерименту при чотирьох факторах, що варіюються на трьох рівнях, вимагає більших витрат часу і обчислювальних ресурсів (64 дослідів, 240 годин машинного рахунку при використуванні якості сітки), припустили, що залежність функції відгуку у дослідженому діапазоні зміни факторів лінійна. Реалізовували план експерименту із чотирма факторами, які варіювались на двох рівнях, що дозволило врахувати ефекти їх парної взаємодії (табл. 2).

Таблиця 2

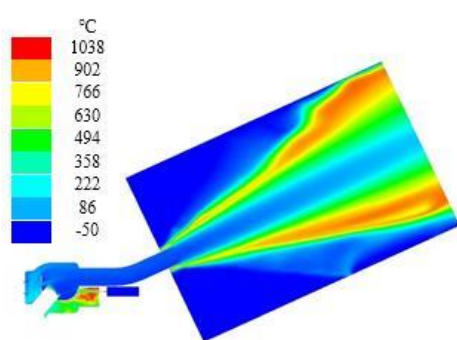
Фактори і постійні, прийняті у повнофакторному експерименті 2⁴

№ п/п	Фактор	Діапазон варіювання
1	Діаметр вхідного (повітропідвідного) отвору, $d_{вх}$, мм	3...7
2	Перепад тиску повітря $dP_{вх}$ кПа	1,0...2,5
3	Температура повітря $T_{вх}$, °C	-50...50
4	Висота корпусу H , мм	60...80
5	Діаметр вихідного отвору (патрубка) $D_{вих}$, мм	10 мм (const)
6	Ширина повітропідвідного каналу h , мм	13 мм (const)

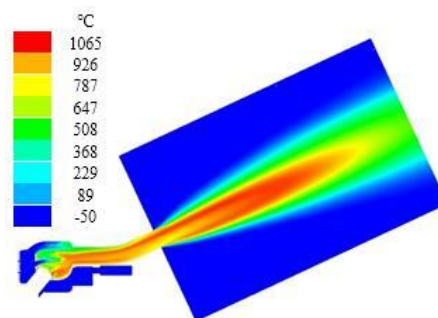
Таблиця 3

План експерименту, що відсіває фактори 2⁽⁶⁻²⁾

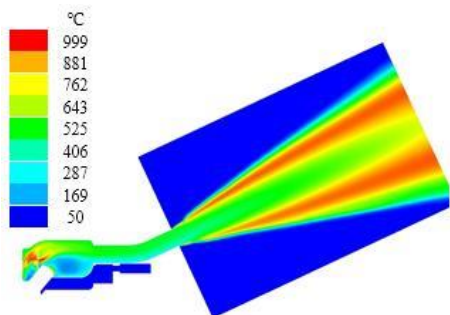
№ п/п	Назва змінної / номер / значення												T _ф , °C
	P _{вх} кПа		T _{вх} °C		d _{вх} , мм		D _{вих} , мм		H, мм		h, мм		
	1		2		3		4		5		6		
	код	абс	код	абс	код	абс	код	абс	код	абс	код	абс	
1	-1	1,0	-1	-50	-1	3	-1	6	-1	60	-1	5	290
2	-1	1,0	-1	-50	-1	3	1	10	-1	60	1	13	211
3	-1	1,0	-1	-50	1	7	-1	6	1	80	1	13	459
4	-1	1,0	-1	-50	1	7	1	10	1	80	-1	5	552
5	-1	1,0	1	50	-1	3	-1	6	1	80	1	13	280
6	-1	1,0	1	50	-1	3	1	10	1	80	-1	5	215
7	-1	1,0	1	50	1	7	-1	6	-1	60	-1	5	491
8	-1	1,0	1	50	1	7	1	10	-1	60	1	13	615
9	1	2,5	-1	-50	-1	3	-1	6	1	80	-1	5	344
10	1	2,5	-1	-50	-1	3	1	10	1	80	1	13	244
11	1	2,5	-1	-50	1	7	-1	6	-1	60	1	13	608
12	1	2,5	-1	-50	1	7	1	10	-1	60	-1	5	884
13	1	2,5	1	50	-1	3	-1	6	-1	60	1	13	898
14	1	2,5	1	50	-1	3	1	10	-1	60	-1	5	278
15	1	2,5	1	50	1	7	-1	6	1	80	-1	5	585
16	1	2,5	1	50	1	7	1	10	1	80	1	13	895



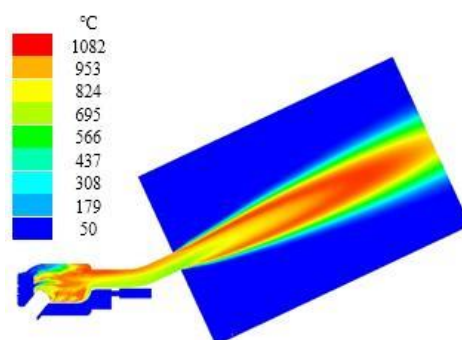
а



б



в



г

Рис. 7. Поля температур газового потоку для різних комбінацій початкових і граничних умов:
а – режим №1; б – режим №4; в – режим №14; г – режим №16 (номера режимів відповідають табл. 3)

Аналіз результатів реалізації чисельних експериментів вказує на те, що з імовірністю 95% на середню температуру факела значимий вплив виявляють діаметр повітропідвідного отвору ($d_{\text{вх}}$), перепад тиску повітря ($dP_{\text{вх}}$) і їх комбінація (рис. 8, а).

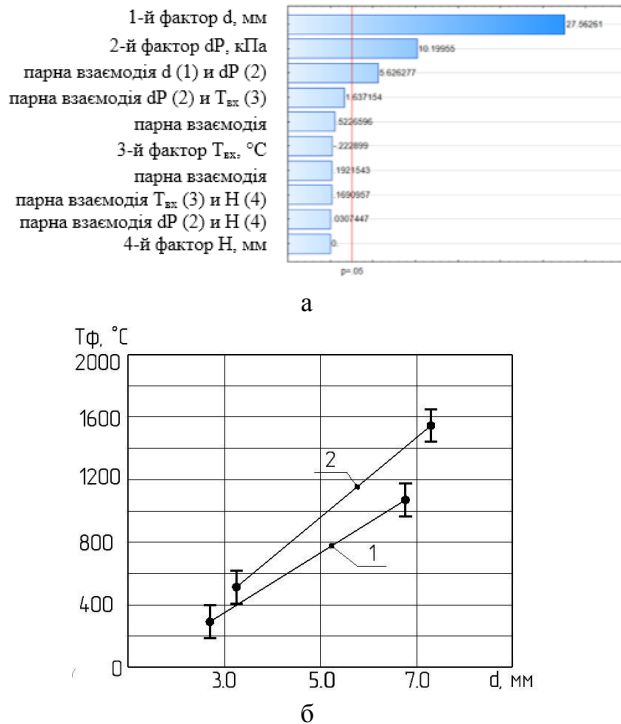


Рис. 8. Діаграма Парето (а) і криві середніх значень (б) для моделі з урахуванням ефектів парної взаємодії, отриманої при реалізації повнофакторного експерименту (див. табл. 2):
1 – $dP=1$ кПа; 2 – $3,5 dP=1$ кПа

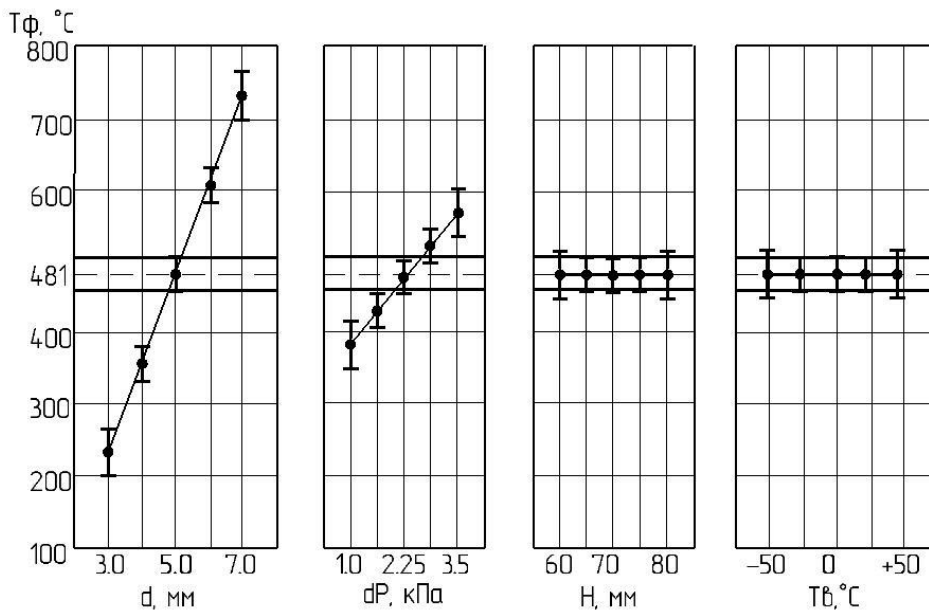


Рис. 9. Залежність середніх значень температури факела полум'я від змінних моделі

Для побудови якісної моделі, що відбиває вплив діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря і ефектів їх взаємодії на середню температуру факела полум'я, на третьому етапі дослідження реалізовували повнофакторний експеримент із двома факторами, що варіювались на трьох рівнях. Незалежними змінними були d , мм і dP , кПа, вплив яких на функцію відгуку максимальний. При обмеженому числі факторів такий підхід не приводить до великої кількості експериментів і дозволяє врахувати їх нелінійну зміну в досліджуваному діапазоні. Результати дисперсійного аналізу показали статистичну значимість як досліджених змінних, так і ефектів їх взаємодії (рис. 10).

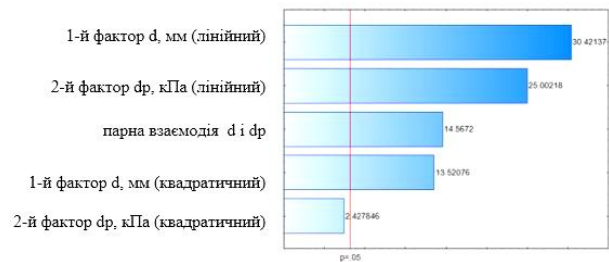


Рис. 10. Діаграма Парето для моделі впливу діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на температуру факела полум'я

Регресійний аналіз результатів повнофакторного експерименту дозволив установити залежність функції відгуку від досліджених факторів. Для функції відгуку будували модель, що враховує головні, статистично значимі ефекти і ефекти їх парної взаємодії:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq c1} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq c2} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j \leq c3} b_{ij} x_i^2, \quad (3)$$

де i, j – номер незалежної змінної.

Для оцінки статистичної значимості коефіцієнтів рівнянь регресії розраховували величину дисперсії кожного дослідження і виконували перевірку однорідності ряду дисперсій за критерієм Кохрена. Враховуючи, що для обраного плану експерименту виконувалася умова нормування, то дисперсії оцінок коефіцієнтів рівнянь регресії були розраховані за формулою:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}. \quad (4)$$

Коефіцієнт рівняння регресії вважали статистично значимим, якщо при рівні значимості $\alpha=0,05$ виконувалася умова:

$$|b_i| \geq |\Delta b_i| \geq t_{\alpha; f1} S_{b_i}, \quad (5)$$

де $t_{0,05;3} = 3,18$ – коефіцієнт Стюдента при $P=95\%$.

З врахуванням установлених статистично значимих коефіцієнтів регресійна модель впливу діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на температуру факела полум'я в натуральному масштабі має вигляд:

$$T_{\text{ф}} = -503 + 307 \cdot d_{\text{вх}} - 19 \cdot dP - 30,5 \cdot d_{\text{вх}}^2 - 9 \cdot dP^2 + 31 \cdot d_{\text{вх}} \cdot dP, \quad (6)$$

де $d_{\text{вх}}$ – діаметр повітропідвідного отвору, мм;

dP – перепад тиску повітря, кПа.

Для перевірки адекватності моделі виконували оцінку однорідності дисперсії адекватності і дисперсії відтворюваності по F-Критерію Фішера [15]. Число дослідів експериментального плану більше числа оцінюваних коефіцієнтів регресії математичної моделі, тобто план експерименту був ненасиченим. Для визначення дисперсії відтворюваності S_y^2 виконували трикратне дублювання всіх дослідів згідно плану експерименту.

Однорідність дисперсій оцінювали за допомогою F-Критерію Фішера:

$$F^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2}. \quad (9)$$

Табличне значення критерію Фішера при рівні значимості 0,05 ($P=95\%$), числі ступенів свободи дисперсії адекватності і дисперсії відтворюваності рівним 8 становить $F_{0,05;8;8}^{\text{табл}} = 3,44$. Розрахункове значення критерію Фішера склало $F_{8;8}^{\text{расч}} = 0,363$. Враховуючи, що $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$, отриману регресійну модель (6) можна вважати такою, що адекватно описує середню температуру факела полум'я залежно від перепаду тиску повітря на вході у запальник, а також діаметра повітропідвідного отвору.

Поверхня температури факела залежно від діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на запальнику (рис. 11, а) у дослідженому діапазоні має екстремум, що відповідає максимальним значенням змінних. При цьому встановлено нелінійність залежності температури факела полум'я від діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на запальнику (рис. 11, б та рис. 12).

Комплексний аналіз отриманих кількісних і якісних результатів, що відображають вплив досліджених факторів на особливості формування полів температур, швидкості потоків, а також концентрації CO_2 і складу паливоповітряної суміші як усередині корпусу запальника, так і у факелі полум'я, дозволив пояснити роль діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря.

Так відомо, що особливістю утворення ППС у факельних запальниках ГТД є відсутність можливості регулювання кількості подаваного палива. Застосування регульованих пристроїв буде сприяти зниженню надійності паливної системи. Також більш низький тиск палива не є оптимальним, оскільки погіршується якість його розпилю, розмір крапель збільшується. Великі краплі палива не встигають випаруватися через малий об'єм порожнини запальника і температура горіння падає або розпал палива не відбувається. Збільшення тиску поліпшує якість розпилю, але супроводжується збільшенням витрати палива тому, що технологічно неможливо зменшити розміри каналів форсунки. У цьому випадку ППС перебагачується, що також веде до неефективності процесу горіння й, як наслідок, зниження температури факела полум'я. Досліджений спосіб імпульсної подачі палива, при раціональних режимах, є компромісним і ефективним розв'язком, що поєднує у собі гарну якість розпилю при імпульсній подачі і недопущення перебагачення за рахунок імпульсу вимикання.

Встановлена закономірність підвищення температури факела в міру збільшення діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря може пояснюватися збільшенням витрати повітря, що супроводжується поліпшенням, як умов утворення ППС, так і умов її горіння.

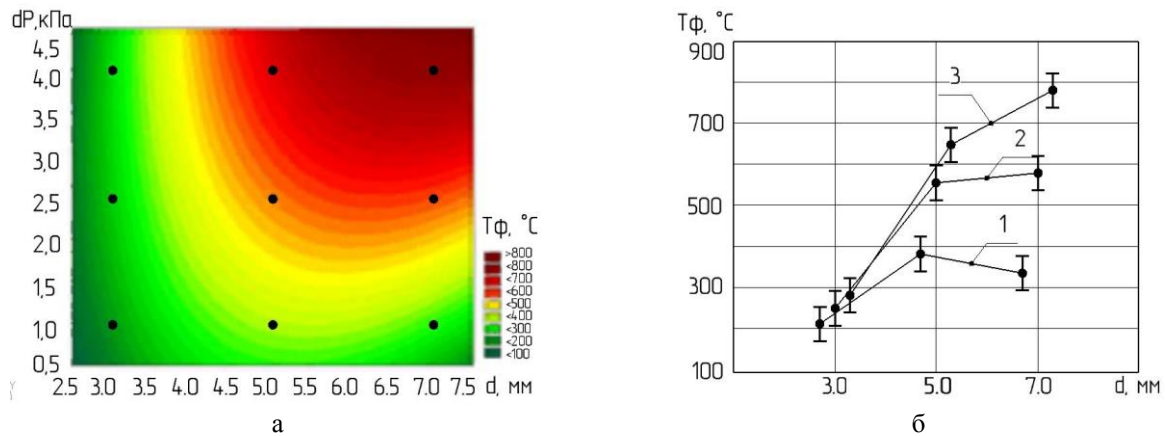


Рис. 11. Залежність середньої температури факела полум'я від діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на запальнику:
1 – $dP=1$ кПа; 2 – $dP=2,5$ кПа; 3 – $dP=4,0$ кПа

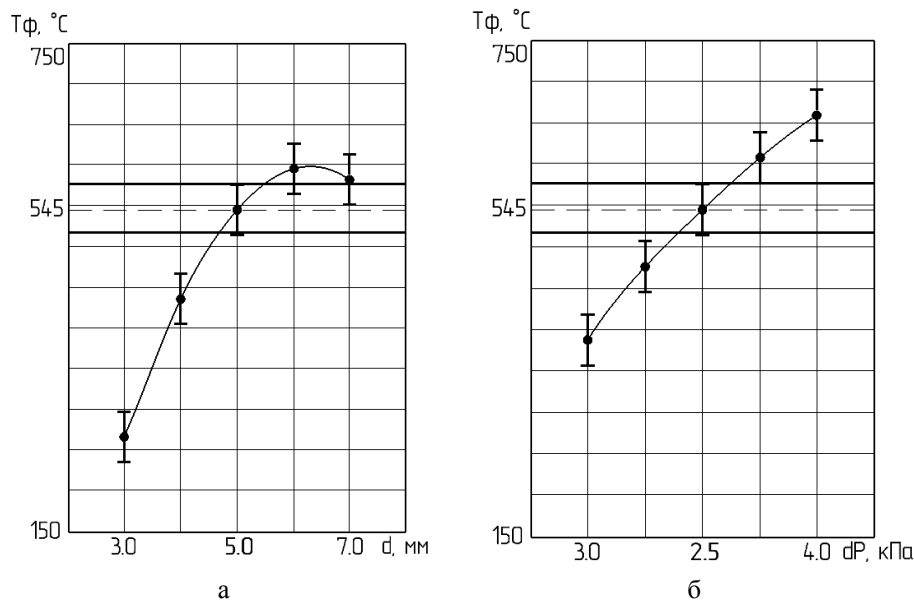


Рис. 12. Залежність середньої температури факела полум'я від діаметра повітропідвідного отвору d (а) і перепаду тиску повітря (б)

Незважаючи на те, що обидва фактори діють однонаправлено, їх вплив проявляється неоднаково. При малому діаметрі повітропідвідного отвору збільшення перепаду тиску не приводить до такого істотного підвищення температури, як при великому діаметрі. Така тенденція, пов'язана зі зменшенням пропускної здатності отвору малого діаметра. Однак, збільшення діаметра більш 5 мм приводить до затримки збільшення температури факела, а при малому перепаді тиску – і до її зниження. Це може бути пов'язане з тим, що при збільшенні витрати повітря через запальник надлишок повітря проохолоджує продукти горіння, у результаті чого температура факела падає.

Висновки і перспективи досліджень

Моделювання процесу горіння паливоповітряної суміші у факельному запальнику ГТД при різних комбінаціях його геометричних параметрів і умов горіння дозволило встановити основні фактори, що впливають на температуру факела полум'я на етапі горіння, що встановилося, і виконати їхню оптимізацію.

Встановлено, що найменший вплив виявляють висота корпусу запальника і ширина повітропідвідного каналу. Для збільшення температури факела у факельному запальнику розглянутої конструкції

раціонально їх значення приймати рівними 10 мм і 13 мм відповідно. Температура повітря і тиск палива на пусковій форсунці запальника на температуру факела на етапі стаціонарного горіння впливу не виявляють. Найбільший вплив виявляють фактори, що визначають витрату повітря через запальник – діаметр повітропідвідного отвору, перепад тиску повітря і їх комбінація. Найбільш оптимальною величиною діаметра повітропідвідного отвору, у дослідженому діапазоні, є 7 мм при максимально можливому перепаді тиску повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою ГТД.

Беручи до уваги, що температура факела полум'я запальника пов'язана з імовірністю розпаду основної камери згорання ГТД, перспективою подальших досліджень є отримання закономірностей, що пов'язують режим роботи запальника і його геометрію з діапазоном розпаду камери згорання.

Література

1. Григорьев, В. А. Испытания авиационных двигателей [Текст] : учебник для вузов / В. А. Григорьев, А. С. Гишваров. – М. : Машиностроение, 2009. – 504 с.

2. Разработка методов расчета характеристик нестационарного рабочего процесса в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД [Текст] / С. И. Сербин, А. Б. Мостипаненко, А. В. Козловский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 11 (1054). – С. 90-94.

3. Митрофанов, В. А. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: математическое моделирование, методология расчета, концепция оптимального проектирования [Текст] : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Митрофанов В. А. – СПбПУ, С.-Пб, 2004. – 32 с.

4. Костюк, В. Е. Анализ современных подходов к прогнозированию пусковых и срывных характеристик камер сгорания ГТД. I. Макромоделирование [Текст] / В. Е. Костюк, И. Ф. Кравченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4 (12). – С. 48–55.

5. Костюк, В. Е. Анализ современных подходов к прогнозированию пусковых и срывных характеристик камер сгорания ГТД. II. Моделирование на микроуровне [Текст] / В. Е. Костюк, И. Ф. Кравченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7 (15). – С. 59–68.

6. Грасько, Т.В. Верификация разработанной расчетной модели основной камеры сгорания серийного газотурбинного двигателя с результатами испытаний на основе численного моделирования [Текст] / Т. В. Грасько, С. А. Маяцкий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 10 (655). – С. 18–24.

7. Лодня, В. А. Улучшение параметров двухтактного ДВС путем применения непосредствен-

ного впрыскивания бензина и совершенствования процесса смесеобразования [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02; защищена 15.03.2000; утв. 02.06.2000 / Лодня Вячеслав Александрович – М., 2000. – 171 с.

8. Каргин, С. А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05; защищена 25.09.2006; утв. 10.11.2006 / Каргин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.

9. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / Д. Н. Вырубов, С. И. Ефимов, Н. А. Иващенко и др. ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1984. – 384 с.

10. Модели смесеобразования и горения в ДВС с непосредственным впрыском [Текст] / С. А. Чесноков, Н. Н. Фролов, В. А. Дунаев и др. // Двигателестроение. – 2005. – № 1. – С. 3–5.

11. Моделирование термомпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов и др. // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Х. : «ХАИ». – 2010. – Вып. 46. – С. 75–87.

12. Мазниченко, С. А. Об особенностях смесеобразования в тепловых приводах импульсного оборудования [Текст] / С. А. Мазниченко, С. И. Планковский, О. С. Борисова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 7(44). – С. 45–52.

13. Моделирование процесса горения в факельных запальниках ГТД / Ю. И. Торба, С. И. Планковский, О.В. Трифонов и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2019. – № 7 (159). – С. 39–49. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.05.

14. Торба, Ю. И. Экспериментальная установка и метод исследования работоспособности факельных воспламенителей в широких диапазонах имитируемых эксплуатационных характеристик [Текст] / Ю. И. Торба // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 4. – С. 56–60.

15. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

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

References

1. Grigorev, V. A., Gishvarov, A. S. Ispytaniya aviacionny'x dvigatelej: uchebnik dlya vuzov [Testing of aircraft engines: a textbook for universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 504 p.

2. Serbin, S. I., Mostipanenkov, A. B., Kozlovskij, A. V. *Razrabotka metodov rascheta xarakteristik nestacionarnogo rabocheho processa v nizko-emissionnyx kamerax sgoraniya GTD* [Development of the methods for calculating characteristics of an unsteady working process in low-emission GTE combustion chambers.]. Visnik NTU "KPI", 2014, no. 11 (1054), pp. 90-94
3. Mitrofanov, V. A. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnyx dvigatelej matematicheskoe modelirovanie, metodologiya rascheta, koncepciya optimalnogo proektirovaniya*. Synopsis Diss. dokt. tekhn. nauk [Combustion chambers of gas turbine engines: mathematical modeling, calculation methodology, optimal design concept. Synopsis Dr. eng. sci. diss.]. Saint Petersburg, SPGPU Publ., 2004. 32 p.
4. Kostyuk, V. E., Kravchenko, I. F. Analiz sovremennyx podxodov k prognozirovaniyu puskovyx i sryvnyx xarakteristik kamer sgoraniya GTD. I. Makromodelirovanie [Analysis of modern approaches to forecasting the starting and stall characteristics of gas turbine engine combustion chambers. I. Macromodeling]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2004, no 4 (12), pp. 48–55
5. Kostyuk, V. E., Kravchenko, I. F. Analiz sovremennyx podxodov k prognozirovaniyu puskovyx i sryvnyx xarakteristik kamer sgoraniya GTD. II. Modelirovanie na mikrourovne [Analysis of modern approaches to predicting the starting and disruptive characteristics of gas turbine engine combustion chambers. II. Micro level modeling]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2004, no 7 (15), pp. 59–68
6. Grasko, T. V., Mayaczkiy, S. A. Verifikaciya razrabotannoj raschetnoj modeli osnovnoj kamery sgoraniya serijnogo gazoturbinnogo dvigatelya s rezultatami ispytaniy na osnove chislennogo modelirovaniya [Verification of the developed calculation model of the gas turbine engine in production main combustion chamber with test results based on numerical simulation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2014, no 10 (655), pp. 18–24.
7. Lodnya, V. A. *Uluchshenie parametrov dvux-taktnogo DVS putem primeneniya neposredstvennogo vpryskivaniya benzina i sovershenstvovaniya processa smeseobrazovaniya*. Dis. kand. tekhn. nauk [Characteristics improvement of a two-stroke ICE by applying direct injection of gasoline and improving the process of mixture formation. PhD diss.]. Moscow, 2000. 171 p.
8. Kargin, S. A. *Teoreticheskoe obosnovanie i eksperimentalnoe issledovanie rabocheho protsessa sudovogo DVS s kombinirovannym smeseobrazovaniem i prinuditel'nyim vosplameneniem*. Dis. kand. tekhn. nauk [Theoretical basis and experimental study of the working process of a ship ICE with combined mixture formation and forced ignition. PhD diss.]. Astrakhan, 2006. 177 p.
9. Vyubov, D. N., Efimov, S. I., Ivashhenko, N. A. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 384 p.
10. Chesnokov, S. A., Frolov, N. N., Dunaev, V. A., Kuz'mina, I. V. *Modeli smeseobrazovaniya i goreniya v DVS s neposredstvennym vpryskom* [Mixture formation and combustion models in ICE with direct injection]. *Dvigatelistroenie – Engines construction*, 2005, no. 1, pp. 3–5
11. Borisova, O. S., Plankovskij, S. I., Shipul, O. V., Trifonov, O. V. *Modelirovanie termoimpulsnoj obrabotki s uchetom neodnorodnosti toplivnoj smesi* [Simulation of thermal pulse processing considering fuel mixture heterogeneity]. *Otkrytye informacionnye i kompyuternye tekhnologii – Open information and computer technologies*, 2010, no. 46, pp. 75–87.
12. Maznichenko, S. A., Plankovskij, S. I., Borisova, O. S. *Ob osobennostyax smeseobrazovaniya v teplovyx privodax impulsnogo oborudovaniya* [About the features of mixture formation in pulsed equipment thermal drives]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2007, no. 7(44), pp. 45–52.
13. Torba, Yu. I., Plankovskij, S. I., Trifonov, O. V., Cegelnik, E. V., Pavlenko, D. V. *Modelirovanie processa goreniya v fakelnyx zapalnikax GTD* [Combustion process simulation in gas turbine torch ignitors]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 7(159), pp. 39–49. DOI: 10.32620/akt.2019.7.05.
14. Torba, Yu. I. *Eksperimentalnaya ustanovka i metod issledovaniya rabotosposobnosti fakelnyx vosplamenitelej v shirokix diapazonax imitiruemyx ekspluatacionnyx xarakteristik* [Experimental setup and method for studying the performance of flare igniters in a wide range of simulated operational characteristics]. *Vestnik dvigatelestroeniya – Herald of Aeroenginebuilding*, 2006, no. 4, pp. 56–60
15. Spiridonov, A. A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskix processov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.
16. Torba, Yu. I., Pavlenko, D. V. *Zavisimost kachestva raspyla puskovoj forsunki zapalnika GTD ot perepada davleniya topliva* [The dependence of quality spray starting sprayer of the gte igniter from the fall pressure drop]. *Vestnik dvigatelestroeniya – Herald of Aeroengine building*, 2019, no. 1, pp. 46–53.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФАКЕЛЬНОГО ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ ГТД ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Ю. І. Торба, Д. В. Павленко, Я.В. Двірник

Решали задачи повышения эффективности работы факельного воспламенителя камеры сгорания газотурбинного двигателя путем повышения температуры факела пламени за счет оптимизации конструкции корпуса. Для определения влияния различных геометрических параметров корпуса воспламенителя, влияющих на образование и горение топливовоздушной смеси, разработаны параметрическая модель, которая в совокупности с разработанным проектом в программном комплексе ANSYS Workbench позволила автоматизировать процесс моделирования. С использованием численной модели стационарного горения топливовоздушной смеси, подготовленную в корпусе факельного воспламенителя камеры сгорания газотурбинного двигателя путем испарения и распыления частиц авиационного керосина в воздушном потоке, исследовали влияние геометрических параметров корпуса и внешних факторов на среднюю температуру факела пламени. Адекватность результатов численного моделирования подтверждали путем реализации серии дополнительных натурных экспериментов по критерию Фишера. С использованием корреляционного анализа результатов измерений температуры в различных точках факела пламени установлена его однородность и правомерность оценки средней температуры. Для определения степени и характеристики их влияния последовательно реализовывали дробнофакторный (отсеивающий факторы) и полнофакторный эксперименты с варьированием факторов на двух и трех уровнях. По результатам дисперсионного анализа выбраны наиболее статистически значимые факторы. Установлена регрессионная зависимость, связывающая диаметр воздухоподводящего отверстия и перепада давления воздуха с температурой факела пламени. Выполнена качественная и количественная оценка влияния рассмотренных факторов на процесс формирования топливовоздушной смеси и ее горение. Определены оптимальные величины геометрических параметров корпуса факельного воспламенителя и условия его работы, при которых обеспечивается максимальная температура факела пламени на этапе стационарного горения. Установленные зависимости, связывающие конструктивные особенности и режим работы воспламенителя с температурой факела пламени, позволят расширить диапазон устойчивого разжигания камер сгорания газотурбинных двигателей в зависимости от конструкций воспламенителя, режима подачи пускового топлива и перепада давления воздуха.

Ключевые слова: факельный воспламенитель; газотурбинный двигатель; форсунка; факел; пламя; топливо; температура; метод конечных элементов; моделирование; оптимизация.

NUMERICAL METHOD GTE TORCH IGNITOR DESIGN OPTIMIZATION

Yu. Torba, D. Pavlenko, Y. Dvirnyk

Solved the problem of gas-turbine engine combustion chamber flame igniter efficiency increasing by increasing the flame temperature via optimizing the body design. To determine the influence of the igniter body various geometric parameters, affecting the formation and combustion of the fuel-air mixture, a parametric model was developed. This model together with the developed project in the ANSYS Workbench software package made it possible to automate the modeling process. The influence of the geometric parameters of the igniter body and external factors on the average flame temperature has been studied via a numerical model of the stationary combustion process of the air-fuel mixture formed inside the igniter of the combustion chamber of a gas turbine engine by evaporation and spraying particles of aviation kerosene in the air stream. The adequacy of the numerical simulation results was confirmed by the implementation of a series of full-scale experiments using the Fisher criterion.

The uniformity of temperature and adequacy of the average temperature estimation algorithm was established using the correlation analysis of the results of measured temperature at various points of the flame. To determine the degree and nature of their influence, sequentially screening (fractional), as well as full-factor experiments with varying factors at two and three levels were implemented. Based on the results of the analysis of variance, the most statistically significant factors were selected. A regression dependence was established that relates the diameter of the air inlet orifice and the air pressure drop to the flame temperature. A qualitative and quantitative assessment of the influence of the considered factors on the process of formation of a hot air mixture and its combustion has been performed. The optimal values of the geometric parameters of the igniter body and its operating conditions are determined under which the maximum flame temperature at the stationary combustion stage is ensured. Relationships between design features, igniter operation mode, and the temperature of the flame are established. This allows ex-

panding the range of stable ignition of gas turbine engine combustion chambers in accordance with the design of the igniter, the starting fuel supply mode, and the air pressure drop.

Keywords: igniter; gas turbine engine; nozzle; torch; flame; fuel; temperature; finite element method; modeling; optimization.

Торба Юрий Иванович – начальник экспериментально-исследовательского комплекса, ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Павленко Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии авиационных двигателей, Национальный университет «Запорожская политехника»; ведущий инженер ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Двирник Ярослав Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии авиационных двигателей, Национальный университет «Запорожская политехника»; начальник отдела управления, эксплуатации и ремонта АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Yuriy Torba – Head of Experimental Testing Complex, SE «Ivchenko-Progress», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-8470-9049.

Dmytro Pavlenko – PhD, Associate Professor, Professor of Aircraft Engines Technologies Department, National University «Zaporizhzhia polytechnic»; leading engineer of SE «Ivchenko-Progress», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6376-2879.

Yaroslav Dvirnyk – PhD, Associate Professor of Aircraft Engines Technologies Department, National University «Zaporizhzhia polytechnic»; Head of Department of Product Support Office Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvirnyk@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-5439-5413.