

Державний концерн «Укроборонпром»
Державне підприємство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро
«Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка

ТОРБА ЮРІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 621.452.3:621.45.048

**РОЗШИРЕННЯ ДІАПАЗОНУ РОЗПАЛЕННЯ КАМЕР ЗГОРЯННЯ ГТД
ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЗАПАЛЬНИКА ТА РЕЖИМУ
ПОДАЧІ ПУСКОВОГО ПАЛИВА**

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на Державному підприємстві «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка Державного концерну «Укроборонпром»

Науковий керівник:

доктор технічних наук, **Кравченко Ігор Федорович**, Державне підприємство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка Державного концерну «Укроборонпром», директор підприємства, Генеральний конструктор.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент, **Дорошенко Катерина Вікторівна**, Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, професор кафедри авіаційних двигунів.

доктор технічних наук, професор **Расстригін Олександр Олексійович**, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, головний науковий співробітник науково-дослідного управління

Захист відбудеться «19» березня 2021 року о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 17.740.01 у Державному підприємстві «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка за адресою: 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2, корпус конструкторського науково-дослідницького комплексу, кімната 802 (актова зала).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного підприємства «Івченко-Прогрес», 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2, та на сайті підприємства www.ivclienko-progress.com у розділі "Про підприємство" - "Спеціалізована вчена рада".

Автореферат розісланий « 08 » лютого 2021 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради К17.740.01
кандидат технічних наук



О.В. Петров

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Завдання забезпечення надійного запуску газотурбінних двигунів (ГТД) у різних умовах експлуатації літальних апаратів є одним з основних з погляду забезпечення безпеки та надійності польотів.

Досвід проектування ГТД, що накопичений ДП "Івченко-Прогрес" показав, що застосування факельних запальників є найбільш ефективним методом розпалення камер згоряння. Основними перевагами його використання є висока ефективність ініціалізації горіння в камері згоряння, що досягається завдяки високій потужності джерела горіння (пускового полум'я) і висока надійність, що забезпечується короткочасним режимом роботи та відсутністю постійного впливу полум'я на електричну свічу та пускову форсунку та низька вартість, що досягається за рахунок простоти конструкції запальника, що не оснащується додатковими пристроями автоматизації та системами автоматичного керування.

Однак зазначені переваги часто є взаємно суперечливими. Основним із протиріч є забезпечення надійної роботи в широкому діапазоні експлуатаційних умов при збереженні простоти конструкції та малих розмірів запальника. Дотепер зазначене протиріччя вирішувалося шляхом проектування, випробування та доведення запальників для кожного із проєктованих типів ГТД окремо. Це приводить до значних витрат часу та матеріальних ресурсів, що пов'язане з необхідністю реалізації повного циклу проектування-випробування-доведення.

Таким чином на сьогодні розробка методики проектування запальників ГТД є актуальною задачею, що сприяє з одного боку зменшенню витрат часу і матеріальних ресурсів на доведення нових конструкцій запальників, а з іншого – підвищенню рівня експлуатаційної надійності ГТД в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями, що проводяться в експериментально-випробувальному комплексі ДП «Івченко-Прогрес». Робота відповідає основним напрямкам Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року, що схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 липня 2020 року № 851-р.

Матеріали дисертаційних досліджень частково викладені в науково-дослідних роботах і технічних звітах, що виконувалися ДП «Івченко-Прогрес».

Мета дослідження. Розширення діапазону стійкого розпалення камер згоряння ГТД шляхом вдосконалення конструкції факельного запальника та режиму подачі пускового палива.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

- виконати аналіз сучасного стану науково-технічного завдання розширення діапазону розпалення камер згоряння ГТД;
- розробити модель та дослідити якісний склад паливно-повітряної суміші, що формується в корпусі факельного запальника;
- встановити закономірності зміни температури факела полум'я запальника залежно від основних геометричних параметрів корпусу;
- дослідити основні шляхи підвищення ефективності роботи факельних

запальників камер згоряння ГТД, виконати оптимізацію режиму подачі пускового палива за критерієм максимальної температури факела полум'я. Встановити нижню границю сталого розпалу камери згоряння ГТД;

– розробити загальну методику щодо проєктування факельних запальників ГТД та визначити очікуваний економічний ефект від її впровадження.

Об'єкт дослідження – процес розпалу камери згоряння ГТД.

Предмет дослідження – діапазон розпалу камери згоряння за перепадом тиску повітря в залежності від режиму подачі пускового палива та геометричних параметрів корпусу запальника.

Методи дослідження. Метод обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD), що використовувався для визначення параметрів факела полум'я, при спалюванні паливно-повітряної суміші в факельному запальнику. Метод натурного експерименту, що використовувався для випробування факельних запальників, та відсіку камери згоряння для отримання їх характеристик. Методи статистичного аналізу для обробки експериментальних даних, побудови залежностей, планування експериментів, оцінки адекватності математичних моделей.

Достовірність отриманих результатів і висновків в дисертаційній роботі забезпечується використанням математичної статистики, теорії і конструкції ГТД. Отримані результати чисельного моделювання горіння задовільно узгоджуються з даними експериментальних і теоретичних досліджень інших авторів та результатів натурних випробувань, що проведені на ДП «Івченко–Прогрес».

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

1. Вперше встановлені закономірності, що пов'язують час відкритого та закритого стану клапана подачі пускового палива до запальника ГТД з температурою факела полум'я та імовірністю розпалу камери згоряння, на підставі чого знайдено їх оптимальне значення, що дозволяє розширити діапазон стійкого розпалювання камер згоряння шляхом управління режимом подачі пускового палива в залежності від температури та перепаду тиску повітря.

2. Вперше встановлено вплив геометричних параметрів корпусу факельного запальника на температуру факелу полум'я та встановлені закономірності, що визначають їх вплив на температуру факелу за рахунок чого знайдено їх оптимальні значення, що дозволило розширити діапазон стійкого розпалу камери згоряння.

3. Отримав подальший розвиток принцип розширення діапазонів сталого розпалу камер згоряння за перепадом тиску повітря шляхом керування часом відкритого та закритого стану клапана подачі пускового палива до запальника ГТД.

4. Отримали подальший розвиток загальні підходи щодо проєктування факельних запальників камер згоряння ГТД, що дозволяє забезпечити розширення діапазонів стійкого розпалу і зменшити витрату часу та матеріальних ресурсів на проєктування і доведення факельних запальників.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена в дисертаційній роботі загальна методика проєктування факельних запальників надає можливість обґрунтовано призначати режим подачі пускового палива та вдосконалювати конструкції корпусу запальників ГТД, що проєктуються, в залежності від параметрів запуску двигуна. Практичне значення отриманих результатів підтверджується Актом

про впровадження результатів дисертаційного дослідження на ДП «Івченко-Прогрес» (Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП «Івченко-Прогрес» від 04.12.2020).

Особистий внесок здобувача. Всі положення наукової новизни, висновки і рекомендації, викладені в дисертації виконані особисто автором. В статтях, що опубліковані в співавторстві, формулювання задач, проведення досліджень і аналіз результатів виконані автором особисто. В спільних роботах автору належить:

[3] – аналіз проблем та сучасного розвитку моделювання горіння, розробка чисельної моделі горіння, обґрунтування отриманих результатів;

[4, 14] – проведення експериментів, розробка методики оцінки впливу перепаду тиску палива на розмір крапель; статистична обробка результатів виміру діаметра крапель рідини. Встановлені закон розподілу розміру крапель і залежність середнього розміру крапель в факелі розпилу палива форсунки пускового пристрою ГТД від перепаду тиску палива;

[5] – аналіз методів підвищення ефективності роботи факельних запальників, експериментальна оцінка впливу перепаду тиску палива на пусковій форсунці, а також його пульсації та збільшення витрати повітря через запальник на ефективність роботи, визначення найбільш ефективного методу підвищення ефективності роботи факельних запальників ГТД. Показані основні шляхи модернізації запальників ГТД з точки зору розширення діапазону стійкого розпалу камер згорання;

[6, 17] – створення параметризованих твердотільних та скінчено–елементних моделей проточної частини корпусу досліджуваного запальника ГТД для подальшого моделювання горіння: оцінка адекватності результатів чисельного моделювання, статистична обробка результатів, розробка планів експериментів. Встановлені залежності, що пов'язують конструктивні особливості та режим роботи запальника з температурою факела полум'я дозволяють розширити діапазон стійкого розпалення камер згорання газотурбінних двигунів в залежності від конструкцій запальника, режиму подачі пускового палива та перепаду тиску повітря;

[7] – вдосконалення стендів для дослідження температури факела полум'я факельних запальників; розробка методики та планів експериментального дослідження факельних запальників, статистична обробка результатів експерименту, дослідження впливу режимів імпульсної подачі пускового палива і умов запалення на середню температуру факела полум'я на етапі стаціонарного горіння. Оптимізація режимів роботи запальника, оцінка ефективності використання оптимального режиму подачі пускового палива в умовах висотного запуску ГТД;

[9] – аналіз методів та шляхів підвищення висотності запуску запальниками камери згорання ГТД;

[10] – розробка методики оцінки працездатності запальників та їх вплив на температурне поле. Закономірності впливу роботи запальника на температурне поле у вихідному перерізу камер згорання;

[13] – розробка методики експерименту і засобів вимірювання при дослідженні та доведенні систем запалення камер згорання;

[15] – огляд літератури, систематизація запальних пристроїв, розробка конструкторських рішень щодо розробки запальників камер згорання;

[16] – розробка методики проектування факельних запальників ГТД з використанням сучасних CAD/CAE розрахункових пакетів;

[18] – визначення аналогів та прототипу, обґрунтування технічного рішення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня: VI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос» (м. Дніпро, 2004 р., 2005 р., 2006 р.); VI Міжнародні молодіжні науково-технічні читання ім. А.Ф. Можайського (м. Запоріжжя, 2010 р.); Проблемы авиационного двигателестроения (м. Москва, ЦИАМ, 2013 р.); XXIV міжнародний конгрес двигунобудівників (м. Коблево, 2019 р. м. Лазурне, 2020 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 18 робіт, 7 із них складають статті в наукових журналах [1 – 7], 8 – у працях конференцій [8 – 17] та 1 патент України на корисну модель [18].

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 204 сторінки: основного тексту 158 сторінок, 56 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел із 152 найменуваннями на 19 сторінках та 5 додатків на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність роботи. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проаналізовано особливості системи розпалювання камер згоряння сучасних ГТД та методи їх вдосконалення з метою встановлення рівня розробки та виявлення питань, що не вирішені: іскрові, газодинамічні, плазмохімічні, лазерні системи запалення, а також методи підвищення ефективності роботи факельних запальників камер згоряння ГТД. Встановлені наявні протиріччя щодо умов ефективної роботи факельних запальників, особливостей їх конструкції, подачі палива та повітря.

Проаналізувавши наявну науково-технічну інформацію було встановлено, що на сьогоднішній день відсутні рекомендації щодо загальної методики проектування факельних запальників. Сформульовано загальну мету та задачі дослідження.

Другий розділ присвячено моделюванню якісного складу паливно-повітряної суміші, що формується в факельному запальнику, та розробці способу її регулювання. Наведено аналітичний коефіцієнт надлишку повітря на виході з запальника:

$$\alpha_{\text{аналітична}} = \frac{C \cdot A \cdot P \cdot \sqrt{\left(\frac{k \cdot M}{z \cdot R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}}}{m_{\text{пал}} \cdot L_0} = 0,83. \quad (1)$$

Враховуючи складність процесів, при визначенні якісного складу суміші на підставі аналітичного розрахунку, виконано моделювання її якісного складу чисельними методами. Значення якісного складу суміші на виході з вихідного патрубка запальника визначали за полями масової концентрації часток палива в суміші (рис. 1). В залежності від зміни геометрії корпусу запальника та початкових умов розрахункове значення коефіцієнту надлишку повітря дорівнює $0,02 \dots 0,9$.

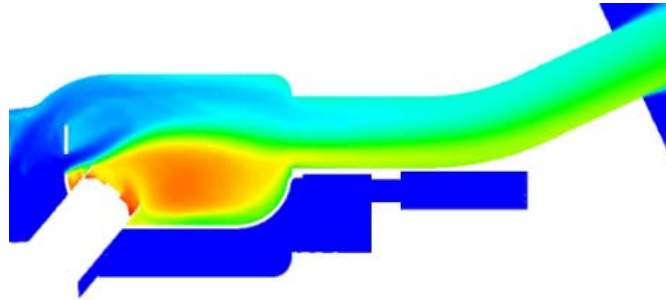


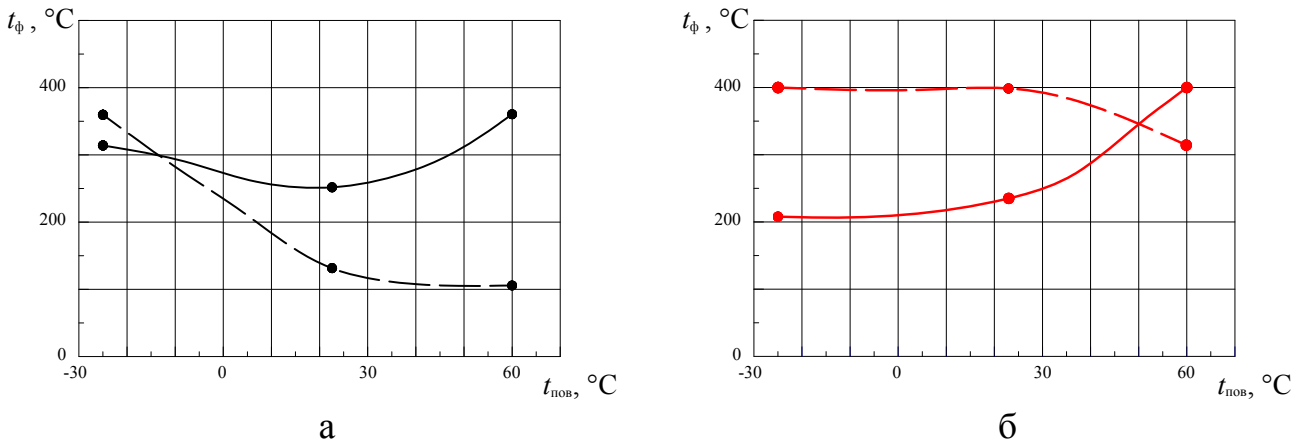
Рисунок 1 – Поле масової концентрації часток палива в суміші в корпусі факельного запальника ГТД

Експериментально встановлено, що коефіцієнт надлишку повітря на виході з запальника становить близько $0,25$, що суттєво відрізняється від стехометричного складу суміші. Перезбагачення паливно–повітряної суміші паливом призводить до несприятливих умов горіння та зниження потужності полум'я. Таким чином необхідним є керування якісним складом паливно–повітряної суміші для наближення її складу до найбільш оптимального, з точки зору ефективності горіння, шляхом застосування імпульсної подачі палива.

З використанням чисельного моделювання стаціонарного горіння паливно–повітряної суміші, що утворюється в корпусі факельного запальника камери згорання ГТД шляхом випарювання та розпилення частинок авіаційного гасу в повітряному потоці, досліджували вплив геометричних параметрів корпусу і зовнішніх факторів на середню температуру факела полум'я.

Враховуючи, що основними шляхами підвищення ефективності роботи факельного запальника є збільшення кількості одночасно запалюваної паливно–повітряної суміші та забезпечення її якісного складу близького до оптимального виконано експериментальні дослідження щодо їх впливу на температуру факела полум'я запальника, у широкому діапазоні зміни температури повітря і палива, витрати повітря, тиску палива та режиму подачі пускового палива до форсунок. Встановлені закономірності зміни температури факела полум'я від перепаду тиску палива на пусковій форсунці, а також його пульсації і збільшення витрати повітря через запальник на ефективність роботи запальника ГТД.

Результати дослідження показали, що як збільшення витрати повітря через запальник, так і застосування пульсації пускового палива можуть впливати на ефективність його роботи (рис. 2).



а – вихідний варіант; б – зі збільшеною витратою повітря;
пунктирна лінія – без пульсацій палива;
суцільна лінія – з пульсаціями палива.

Рисунок 2 – Залежності зміни температури факела від температури повітря

Встановлено, що для вихідного варіанту конструкції, в області низьких температур повітря, застосування імпульсної подачі палива сприяє підвищенню температури факела полум'я при температурі повітря більш ніж -15°C . Для конструкції зі збільшеною витратою повітря застосування імпульсної подачі палива ефективно лише в області температур повітря більш ніж 45°C . При цьому вплив витрати повітря на температуру полум'я також є неоднозначним (див. рис. 2).

Грунтуючись на раніше встановлених закономірностях зміни складу паливно-повітряної суміші від геометрії запальника обґрунтовано застосування імпульсного режиму подачі палива як найбільш ефективного з точки зору керуванням якісним складом суміші. При цьому паливо по магістралі 1 (рис. 3 а) до форсунки 2 подається імпульсатором палива 3, якісний склад паливно-повітряної суміші підтримується блоком керування 4 в діапазоні найбільш сприятливого рівня, з точки потужності полум'я (рис. 3 б).

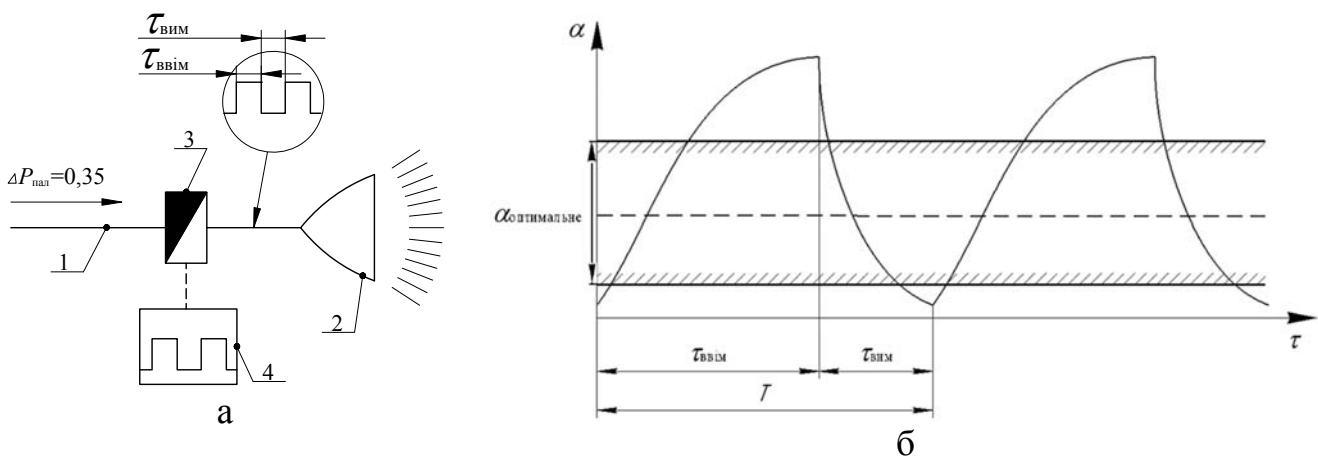


Рисунок 3 – Спосіб імпульсної подачі палива (а) та циклограма зміни якості паливно-повітряної суміші (б)

Час відкритого та закритого стану клапану подачі палива залежить від поточної температури повітря, а також перепаду тиску повітря. Дані про них подають до системи автоматичного керування, що формує імпульси подачі палива таким чином, щоб забезпечувати оптимальні умови згоряння паливно-повітряної суміші в конкретних умовах.

Третій розділ присвячено дослідженню та оптимізації конструкції факельного запальника ГТД за критерієм збільшення температури факелу полум'я.

Для моделювання горіння досліджено якість розпилю пускової форсунки запальника від перепаду тиску палива. Встановлено залежність величини крапель палива та швидкість їх розповсюдження (рис. 4).

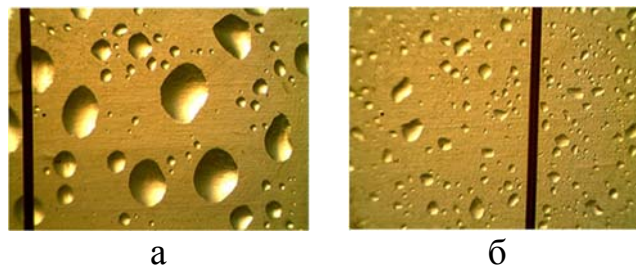
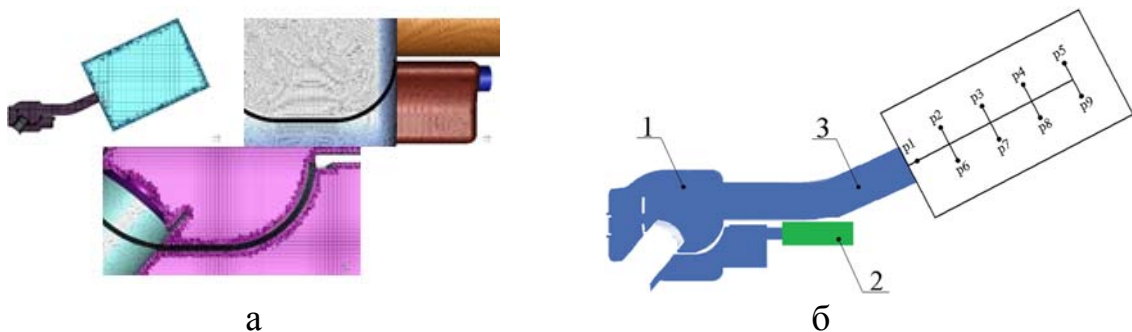


Рисунок 4 – Краплі палива при перепаді тиску 0,05 МПа (а) і 0,35 МПа (б)

Моделювання процесу горіння виконано в програмному середовищі ANSYS Workbench 2019R3. Використано модель стаціонарного горіння з частково попереднім змішуванням Partially Premixed Combustion, C-Equation модель змішання газу та повітря, Discrete Phase модель для моделювання інжекції рідкого газу та k- ω SST модель турбулентності потоку. Ініціацію горіння виконано за допомогою джерела енергії в зоні розташування свічі. Критерій збіжності становив $1 \cdot 10^{-5}$. Середня кількість ітерацій становила близько 1500. Використано структуровану сітку кубічних кінцевих об'ємів HEX, побудову виконано генератором Fluent meshing. Кількість елементів становила 8–10 млн. Розмір кінцевих об'ємів у зоні горіння не перевищував 0,5 мм. Розмір кінцевих об'ємів за межами зони горіння становив 5 мм (рис. 5).



- 1 – корпус запальника;
- 2 – вхідний циліндр;
- 3 – вихідний циліндр

Рисунок 5 – Фрагменти сітки моделі газового потоку у корпусі запальника (а) та точки визначення середньої температури факелу полум'я (б)

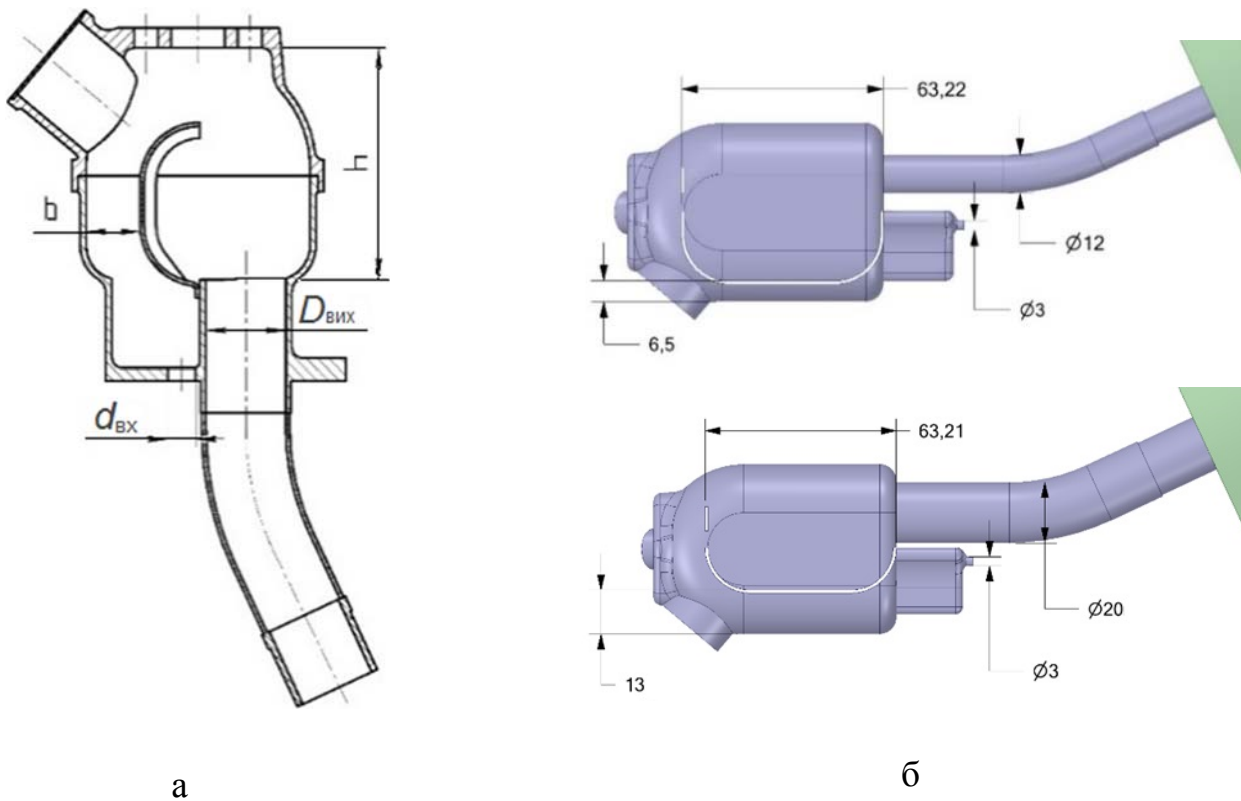


Рисунок 6 – Параметри оптимізації (а) і твердотільні моделі (б) корпусу запальника

Таблиця 1 – Фактори, що впливають на температуру факела полум'я запальника ГТД 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 $t_{\text{п}}$, °С | -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 |

Параметрами оптимізації є геометричні розміри корпусу запальника (табл. 1, рис. 6). Функцією відгуку є середнє значення температури факелу полум'я, що визначається за 9-тю точками, та відповідають місцям встановлення термопар (див. рис. 5).

Адекватність результатів чисельного моделювання підтверджено шляхом реалізації серії натурних експериментів за критерієм Фішера. Високі значення парних кореляцій Пірсона між температурами в різних точках факелу полум'я на різних режимах роботи запальника підтвердили однорідність факелу полум'я та правомірність оцінки його якості за середньою температурою.

Для визначення ступеня і характеристики впливу факторів на температуру

факелу полум'я реалізовані дрібно факторний та повнофакторний експерименти з варіюванням факторами на двох і трьох рівнях.

Враховуючи, що середня температура факела полум'я є інтегральним показником якості паливно-повітряної суміші та при однаковому об'ємі визначає потужність полум'я, досліджували вплив факторів на температуру. Значення температур в різних точках факелу полум'я визначено за полями температур (рис. 7).

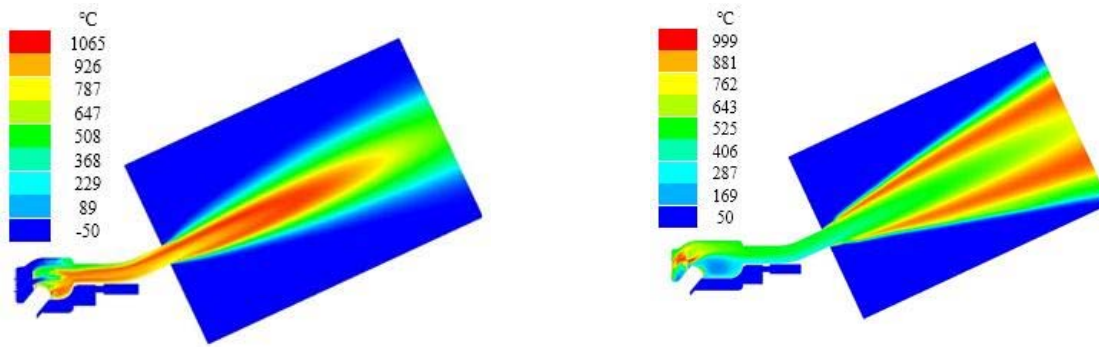


Рисунок 7 – Поля температур газового потоку для різних комбінацій факторів

За результатами дисперсійного аналізу обрані найбільш статистично значимі фактори (рис. 8).

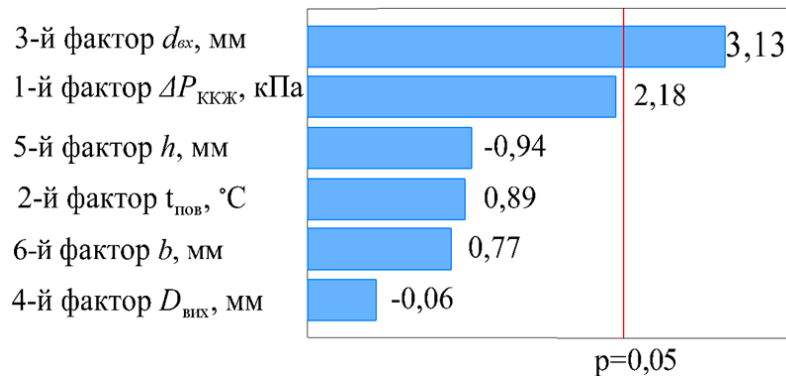


Рисунок 8 – Діаграма Парето для моделі впливу діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на температуру факела полум'я

Встановлена регресійна залежність, що пов'язує діаметр повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря з температурою факела. Регресійна модель впливу діаметра повітропідвідного отвору $d_{вх}$ і перепаду тиску повітря $\Delta P_{ккж}$ на температуру факела полум'я $t_{ф}$:

$$t_{ф} = -503 + 307 \cdot d_{вх} - 19 \cdot \Delta P_{ккж} - 30,5 \cdot d_{вх}^2 - 9 \cdot \Delta P_{ккж}^2 + 31 \cdot d_{вх} \cdot \Delta P_{ккж} \quad (2)$$

Встановлена закономірність підвищення температури факела при збільшенні діаметра повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря може пояснюватися збільшенням витрати повітря, що супроводжується поліпшенням, як умов утворення паливно-повітряної суміші, так і умов її горіння (рис. 9).

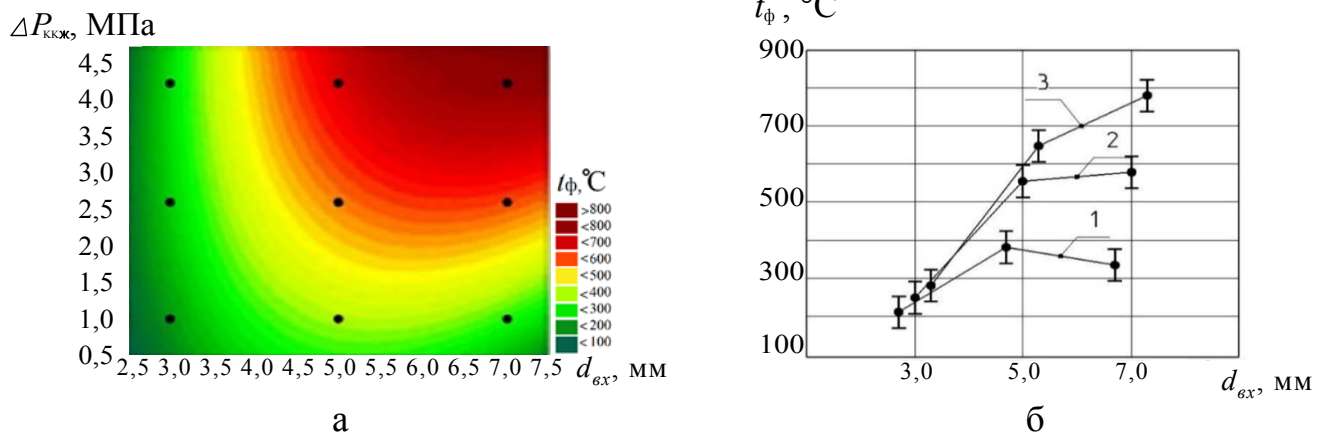


Рисунок 9 – Залежність середньої температури факела полум'я від діаметра (а) повітропідвідного отвору і перепаду тиску повітря на запальнику (б)

Виконана якісна і кількісна оцінка впливу розглянутих факторів на процес формування паливно-повітряної суміші і її горіння. Визначені оптимальні величини геометричних параметрів корпусу запальника і умов його роботи, при яких забезпечується максимальна температура факела полум'я на етапі стаціонарного горіння.

Встановлено, що найменший вплив виявляють висота корпусу запальника і ширина повітропідвідного каналу. Для збільшення температури факела в запальнику розглянутої конструкції раціонально їх значення приймати рівними 10 мм і 13 мм відповідно. Найбільший вплив виявляють фактори, що визначають витрату повітря через запальник – діаметр повітропідвідного отвору, перепад тиску повітря та їх комбінація. Найбільш оптимальною величиною діаметра повітропідвідного отвору, у дослідженому діапазоні, є 6,5 мм при максимально можливому перепаді тиску повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою.

У четвертому розділі наведені результати досліджень щодо способів підвищення ефективності роботи запальників шляхом оптимізації режиму подачі пускового палива за критерієм максимальної температури полум'я. Виконано оцінку діапазону розпалення камер згоряння на різних режимах подачі пускового палива до запальника.

Наведені методи експериментальних досліджень та обладнання, що використовується в дисертаційній роботі.

Для встановлення оптимальної величини часу відкритого та закритого стану клапана подачі палива досліджено вплив режимів імпульсної подачі пускового палива в запальник камери згоряння і умов запалення на середню температуру факела полум'я на етапі стаціонарного горіння. Дослідження виконане для конструкції корпусу запальника зі збільшеним до 6,5 мм діаметром повітропідвідного отвору.

Випробування проведені в діапазоні температур повітря і палива, а також перепадів тиску повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою камери згоряння, що відповідають земному запуску у різних умовах (табл. 2). На підставі реалізації серії експериментів, встановлено фактори, що є найбільш впливовими на температуру, і знайдено їх комбінацію, що забезпечує її максимальне значення як в області від'ємних, так і додатних температур повітря.

Таблиця 2 – Фактори, що впливають на температуру полум'я запальника

| № з/п | Назва фактора | Діапазон варіювання |
|-------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1 | Перепад тиску повітря $\Delta P_{\text{ккж}}$, кПа | 1,0...2,5 |
| 2 | Температура повітря $t_{\text{пов}}$, °С | 0...50 (-25...0) |
| 3 | Температура палива $t_{\text{пал}}$, °С | 0...50 |
| 4 | Тиск палива $P_{\text{пал}}$, МПа | 0,2...0,6 |
| 5 | Відстань від форсунки до зони горіння dL , мм | 0...3 |
| 6 | Час відкритого стану клапана подачі палива $\tau_{\text{ввім}}$, с | 0,1...1,5 |
| 7 | Час закритого стану клапана подачі палива $\tau_{\text{вим}}$, с | 0,1...1,5 |

Відстань від форсунки до зони горіння впливає на об'єм зони змішування і розмір крапель палива.

Діапазон варіювання факторами вибрано таким чином, щоб забезпечити "чутливість" до їх зміни. Враховуючи, що зміна температури повітря в широких межах, що охоплює діапазон земного запуску ГТД впливає на якість паливно-повітряної суміші, що формується в запальнику, виконані окремі дослідження для області низьких та високих температур повітря.

Функцією відгуку є середнє значення температури факелу полум'я визначене за 9-тю термопарами на 10 с сталого горіння. Програма експериментальних досліджень має чотири етапи: два при додатних та два при від'ємних температурах повітря. Етап №1 – дрібнофакторний експеримент $2^{(7-3)}$ при додатних температурах повітря. Етап №2 – повнофакторний експеримент 3^4 при додатних температурах повітря. Етап №3 – дрібнофакторний експеримент $2^{(7-3)}$ при від'ємних температурах повітря. Етап №4 – повнофакторний експеримент 3^4 при від'ємних температурах повітря.

Для області додатних і від'ємних температур отримані регресійні моделі, що пов'язують середню температуру факела із часом відкритого та закритого стану клапана подачі палива, температурою повітря та палива і перепадом тиску повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою:

$$t_{\text{ф}} = 452 + 374 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} - 122 \cdot \Delta P_{\text{ккж}}^2 + 280 \cdot \tau_{\text{ввім}} - 154 \cdot \tau_{\text{ввім}}^2 - 505 \cdot \tau_{\text{вим}} + 167 \cdot \tau_{\text{вим}}^2 - 4,5 \cdot t_{\text{пал}} + 0,067 \cdot t_{\text{пал}}^2 + 59 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} \cdot \tau_{\text{ввім}} - 103 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} \cdot \tau_{\text{вим}} + 0,3 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} \cdot t_{\text{пал}} + 98 \cdot \tau_{\text{ввім}} \cdot \tau_{\text{вим}} + 0,7 \cdot \tau_{\text{ввім}} \cdot t_{\text{пал}} + 0,42 \cdot \tau_{\text{ввім}} \cdot t_{\text{пал}}, \text{ °С}; \quad (3)$$

$$t_{\text{ф}} = 420,5 + 78,4 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} - 159,6 \cdot \Delta P_{\text{ккж}}^2 + 209,4 \cdot \tau_{\text{ввім}} - 130,7 \cdot \tau_{\text{ввім}}^2 - 532,1 \cdot \tau_{\text{вим}} + 128,5 \cdot \tau_{\text{вим}}^2 + 728,3 \cdot P_{\text{пал}} - 2398 \cdot P_{\text{пал}}^2 + 58 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} \cdot \tau_{\text{ввім}} + 35 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} \cdot \tau_{\text{вим}} + 840 \cdot \Delta P_{\text{ккж}} \cdot P_{\text{пал}} + 87 \cdot \tau_{\text{ввім}} \cdot \tau_{\text{вим}} + 104 \cdot \tau_{\text{ввім}} \cdot P_{\text{пал}} - 140 \cdot \tau_{\text{вим}} \cdot P_{\text{пал}}, \text{ °С}; \quad (4)$$

де $t_{\text{ф}}$, °С – температура факелу полум'я запальника;

$t_{\text{пал}}$, °С – температура палива;

$\Delta P_{\text{ккж}}$, кПа – перепад тиску повітря між кільцевим каналом та жаровою трубою

камери згоряння;

$\tau_{\text{ввім}}, \text{с}$ – час відкритого стану клапана подачі палива;

$\tau_{\text{вим}}, \text{с}$ – час закритого стану клапана подачі палива;

$P_{\text{пал}}, \text{МПа}$ – тиск палива.

Адекватність моделей (3) та (4) підтверджена за критерієм Фішера шляхом дублювання експериментів в центрі плану та розрахунку дисперсії адекватності та відтворюваності моделей.

Встановлені залежності температури полум'я від факторів, що впливають (рис. 10, 11) дозволили визначити їх оптимальні значення шляхом застосування методу крутого сходження. Теоретичне обґрунтування явищ, що спостерігаються, дозволило надати фізичні моделі, що підтверджують достовірність отриманих результатів.

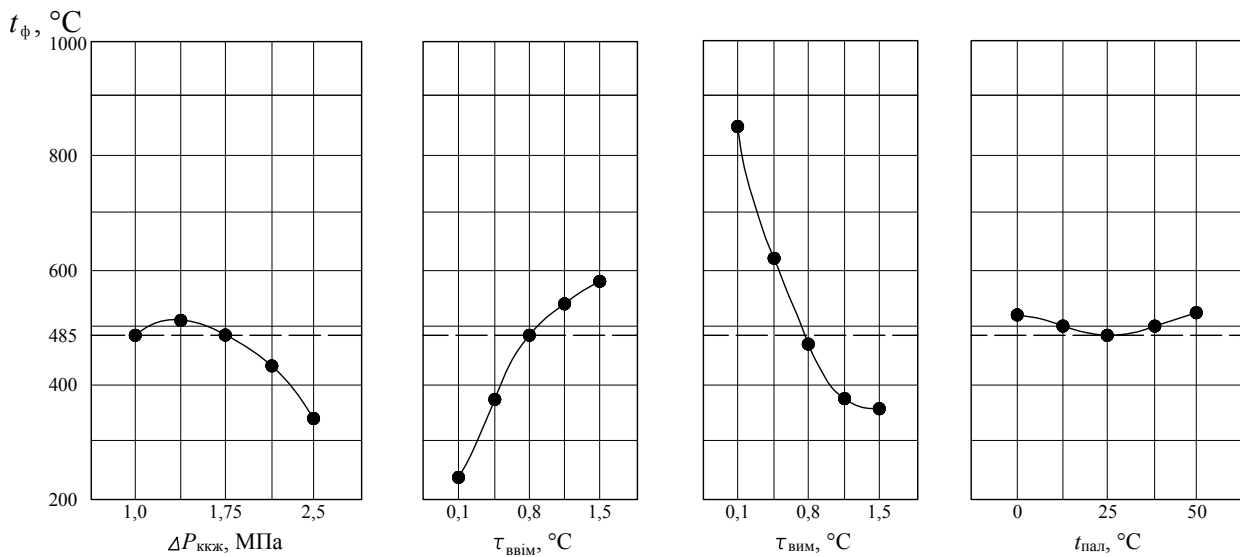


Рисунок 10 – Залежність температури факела полум'я від режимів роботи запальника при додатних температурах повітря

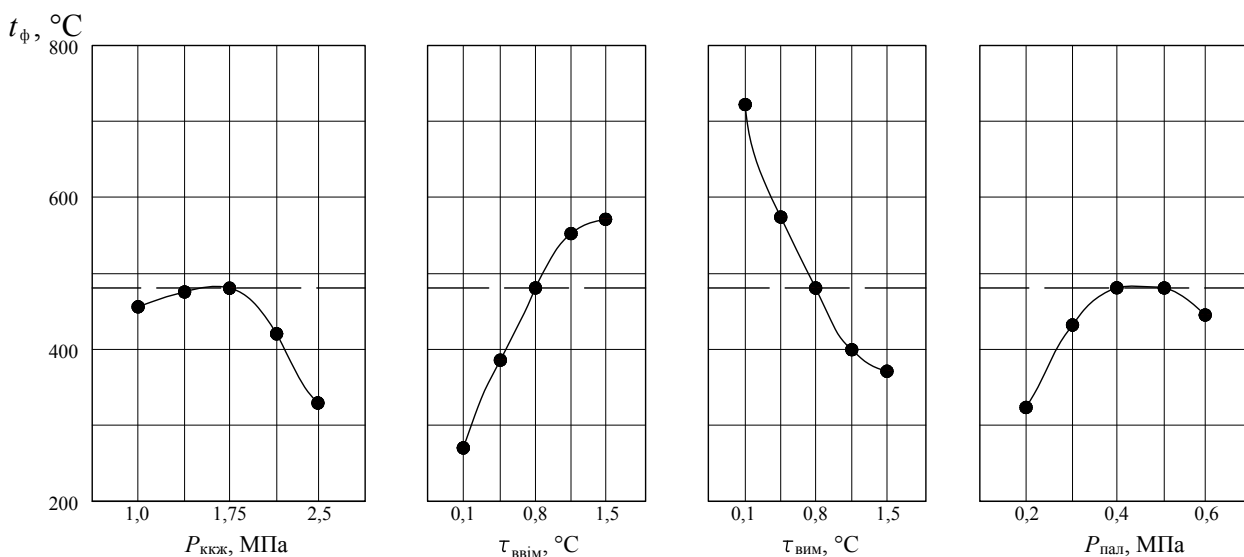


Рисунок 11 – Залежність температури факела полум'я від режимів роботи запальника при від'ємних температурах повітря

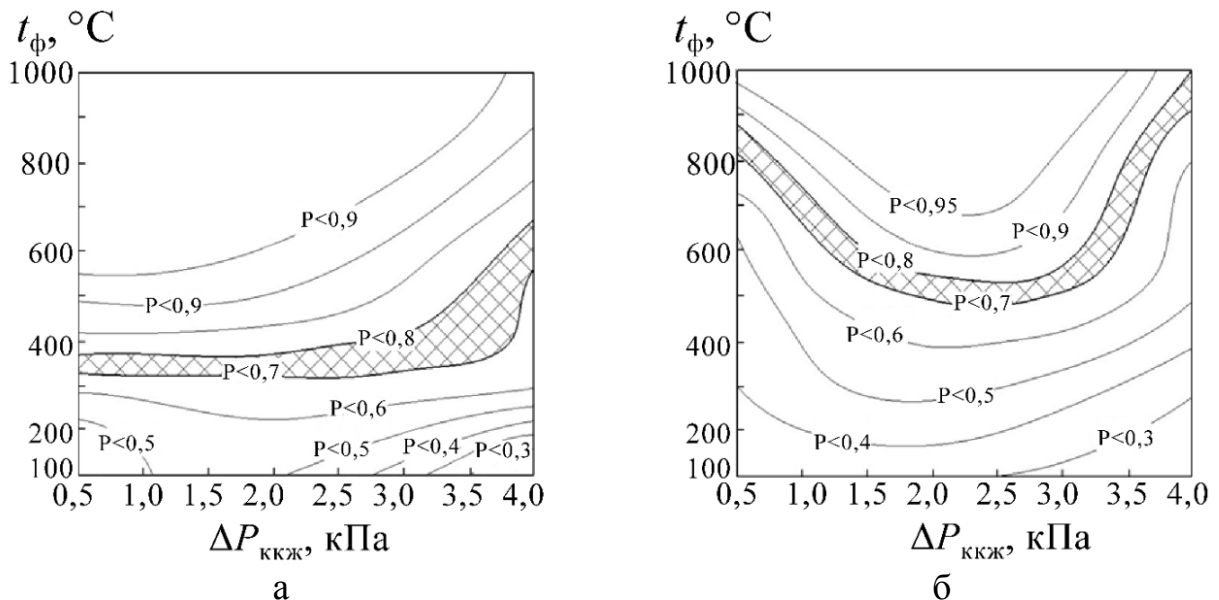
Встановлено, що в області підвищених температур повітря (від 0 до 50 °C)

основними факторами, що виявляють статистично значимий вплив на температуру факела полум'я запальника, є перепад тиску повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою, час відкритого та закритого стану клапана подачі палива і його температура. В області від'ємних температур повітря (від -25 до 0°C) значимими факторами є ті ж, що і при додатних температурах, однак перед температурою палива превалює його тиск. Раціональним режимом роботи запальника у всьому діапазоні температури при запуску на землі, за критерієм максимальної температури факела полум'я, можна вважати: час відкритого стану клапана подачі палива – $1,5$ с, вимкнення – $0,1$ с, тиск палива – $0,35$ МПа, відстань від форсунки до зони горіння – 3 мм.

Незалежно від перепаду тиску повітря та його температури максимальна ефективність роботи факельного запальника спостерігається при мінімальному часі закритого стану клапана подачі палива і максимальному часі його відкритого стану.

Зв'язок між режимом подачі пускового палива до запальника оптимальної конструкції та ефективністю розпалення камери згоряння встановлено шляхом оцінки нижньої границі температури розпалу камери згоряння ГТД факельним запальником та діапазону стійкого розпалення. Визначено температури факела для розпалу камери згоряння при земному перепаді тиску повітря між кільцевим каналом і жаровою трубою камери згоряння.

Так як на границю розпалу впливає безліч факторів, її оцінено в ймовірнісній постановці. Оброблено більш ніж 400 результатів натурних випробувань камер згоряння. Побудовані на їх основі поверхні (рис. 12) визначають ймовірність розпалення камери згоряння в заданих умовах.

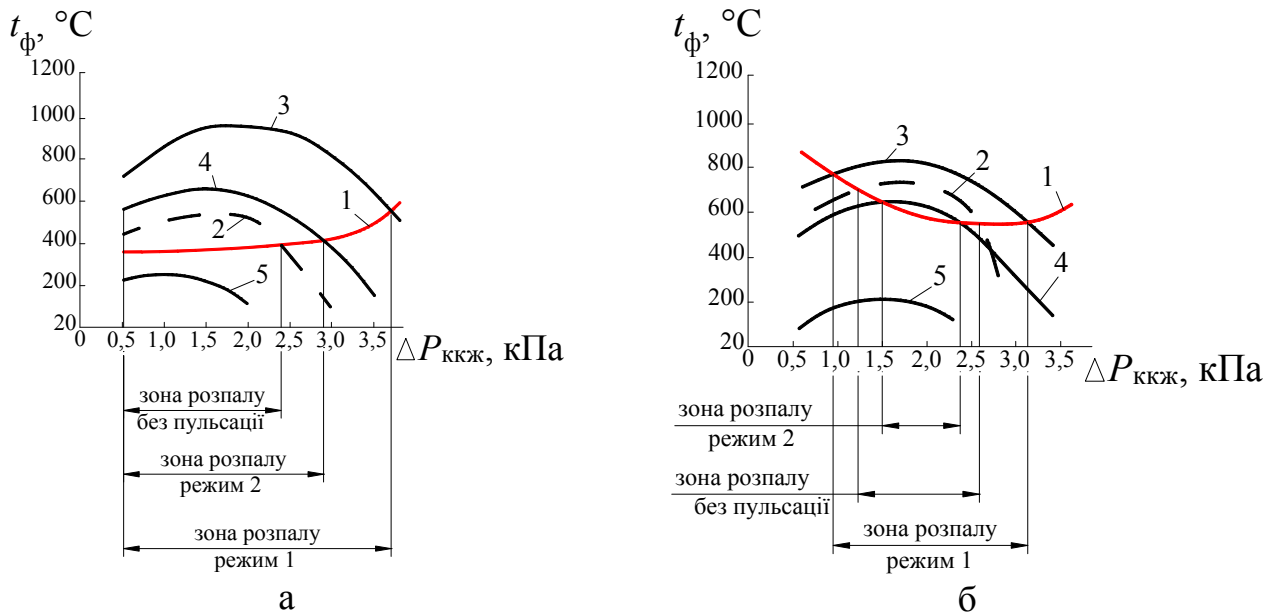


а – для додатних температур повітря; б – для від'ємних температур повітря;
0 – не горить; 1 – горить стійко

Рисунок 12 – Поверхні ймовірності розпалу камери згоряння

Моделювання різних режимів подачі пускового палива в форсунки запальника дозволило оцінити зміну діапазону перепаду тиску повітря, при якому відбувається

стійкій розпал камери згорання. Також оцінку зони розпалу виконано для випадку безперервного живлення запальника пусковим паливом. Враховуючи ймовірність розпалення, що встановлено технічними умовами для камер згорання ГТД на рівні 0,99 та використання двох запальників, встановлено нижню границю розпалення одним запальником на рівні 0,75. На підставі розгляду нижньої границі розпалення сумісно з встановленими залежностями температури факелу полум'я запальника від режимів подачі палива, встановлені діапазони розпалення для від'ємних (рис. 13 а) та додатних (рис. 13 б) температур повітря для різних режимів подачі пускового палива.



а – для додатних температур; б – для від'ємних температур

1 – нижня границя розпалу камери згорання;

2 – без пульсації;

3 – $\tau_{\text{ввім}} = 0,5$ с, $\tau_{\text{вим}} = 0,1$ с;

4 – $\tau_{\text{ввім}} = 0,5$ с, $\tau_{\text{вим}} = 0,5$ с;

5 – $\tau_{\text{ввім}} = 0,1$ с, $\tau_{\text{вим}} = 1,5$ с

Рисунок 13 – Діапазони розпалу камери згорання

Результати моделювання ймовірності розпалу камери згорання залежно від температури повітря і режиму роботи пускової форсунки запальника показали, що при раціональній комбінації часу відкритого та закритого стану клапану подачі палива ($\tau_{\text{ввім}} = 1,5$ с; $\tau_{\text{вим}} = 0,1$ с) діапазон розпалу розширюється на 0,8 кПа при додатних температурах повітря в порівнянні з режимом подачі палива, застосовуваним на серійних ГТД ($\tau_{\text{ввім}} = 0,5$ с; $\tau_{\text{вим}} = 0,5$ с). В області від'ємних температур повітря забезпечується можливість розпалу в діапазоні 0,9...3,1 кПа.

Для поширення рекомендацій щодо розширення діапазону розпалення камер згорання ГТД шляхом вдосконалення конструкції запальника та режиму подачі пускового палива на широке коло двигунів, що проектують, розроблено блок-схему що визначає загальну методику проектування та дослідження запальників (рис. 14).



Рисунок 14 – Блок-схема загальної методики проектування факельних запальників ГТД

Основні положення цього розділу викладені в публікаціях автора [1, 4, 5, 7 - 9, 18].

В додатках до дисертації наведені матриці планування експериментів, розрахунок економічного ефекту, що очікується від впровадження методики проектування факельних запальників для ГТД одного типу, акт впровадження та список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

1. На підставі огляду літературних джерел встановлено, що ключовим питанням вирішення науково-технічного завдання щодо зменшення витрат на проектування та розширення діапазону стійкого розпалення камер згоряння ГТД актуальними питаннями є оптимізація їх конструкції і умов роботи шляхом застосування натурних та чисельних експериментів із застосуванням теорії планування експериментів. Встановлено, що оптимізація складу паливно-повітряної суміші, режимів живлення запальників та їх конструкції є найбільш ефективними та найменш ресурсовитратними методами підвищення ефективності роботи камер згоряння ГТД.

2. Розроблено чисельну модель утворення паливно-повітряної суміші на підставі якої встановлено, що безперервна подача палива призводить до значного перебагачення суміші та її значного відхилення від стехіометричного стану. Для

керування складом паливно-повітряної суміші обґрунтовано використання імпульсної подачі палива.

3. На підставі комплексу чисельних експериментів встановлено, що перепад тиску повітря і діаметр повітропідвідного отвору виявляють статистично значимий вплив на температуру факела полум'я в діапазоні температур повітря, що досліджували. Встановлені оптимальні значення діаметра повітропідвідного отвору корпусу запальника залежно від перепаду тиску повітря, що дозволяє підвищити температуру факела полум'я запальника.

4. За допомогою вдосконаленого науково-методичного апарату та створеного експериментального обладнання виконано оптимізацію режиму подачі пускового палива за критерієм максимальної температури факела полум'я. На підставі результатів експериментального дослідження розпалення камери згорання ГТД в залежності від перепаду тиску повітря і температури факела запальника встановлено, що застосування запропонованого режиму подачі пускового палива дозволяє розширити діапазон стійкого розпалення камер згорання ГТД за перепадом тиску оточуючого повітря. Розширення діапазону перепаду тиску, при якому реалізується стійкий розпал камери згорання складає 0,8 кПа при додатних температурах повітря в порівнянні з режимом подачі палива, застосовуваним на серійних ГТД ($\tau_{\text{ввим}} - 0,5$ с; $\tau_{\text{вим}} - 0,5$ с). В області від'ємних температур повітря забезпечується можливість розпалу в діапазоні перепаду тиску повітря 0,9...3,1 кПа.

5. Розроблено загальну методику проектування перспективних факельних запальників камер згорання ГТД та визначення оптимального режиму їх живлення паливом для розширення діапазону стійкого розпалу камер згорання. Визначено, що очікуваний економічний ефект від впровадження розробленої методики проектування, що отримано внаслідок зменшення потрібної кількості натурних випробувань запальників ГТД в широкому діапазоні експлуатаційних умов, становить порядку 2249 тис. грн. із розрахунку на один тип запальника.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Торба, Ю.И. Исследование характеристик факельного воспламенителя ВРД [Текст] / Ю.И. Торба // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. науч. тр. / Ред. кол.: Л.В. Пронь (відп. редактор) та ін. – Д.: Вид-во ДНУ, 2004 – С. 123 -127.

2. 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. [входить до баз: INSPEC, Index Copernicus (Польща), Google Scholar (США)].

3. Торба Ю.И. Моделирование процесса горения в факельных воспламенителях ГТД / Ю.И. Торба, С.И. Планковский, О.В. Трифонов и др. [Текст] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2019. – Вып. 7/159. – С. 39–49. [входить до баз: Index Copernicus (Польща); Google Scholar (США)].

4. 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. [входит до баз: INSPEC, Index Copernicus (Польша), Google Scholar (США)].

5. Торба, Ю.И. Исследование методов повышения эффективности работы факельных воспламенителей камер сгорания ГТД [Текст] / Ю., Д.В. Павленко, Д.В. Ткач // Технологические системы. – 2019. – № 4. – С. 63-73. [входит до баз: Index Copernicus (Польша); Google Scholar (США)].

6. 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. – Харьков, 2020. – №5(165). – С.83-95. [входит до баз: Index Copernicus (Польша); Google Scholar (США)].

7. Kravchenko, I. Expanding the range of ignition of GTE combustion chamber by optimizing the fuel supply mode [Електронне видання] / I. Kravchenko, Yu. Torba, D. Pavlenko // Journal of science. Lyon. – 2020. - №10, Vol. 1. –Р. 46-57. [входит до баз: Index Copernicus (Польша), Jfactor, Calameo].

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Торба, Ю.И. Исследование влияния параметров воспламенителя на температуру факела [Текст] / Ю.И. Торба // VI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: збірник тез (14-16 квітня 2004 р.). Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2004. С. 80.

9. Торба, Ю. И.Повышение высотности запуска факельного воспламенителя [Текст] /Ю. И. Торба, Л. В. Пронь // VII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез (13-15 квітня 2005р.). Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2005. –С. 105.

10. Торба, Ю. И. Оценка работоспособности и влияния работы факельных воспламенителей на температурное поле у выходном сечении камеры сгорания при взлетном режиме работы ГТД [Текст] / Ю. И. Торба, Л. В. Пронь // VIII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез (13-14 квітня 2006р.). Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2006.–С. 74.

11. Торба, Ю. И. Расширение диапазона устойчивой работы пусковых факельных воспламенителей [Текст] / Ю. И. Торба // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: тезисы докладов VI Международная молодежная научно-техническая конференция авиадвигательной отрасли (г. Алушта, 17-21 мая 2010г.). Запорожье, 2010.–С. 32-33.

12. Торба, Ю. И. Метод расширения рабочих характеристик пусковых воспламенителей ГТД [Текст] / Ю. И. Торба // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: тезисы докладов VI Международная молодежная научно-техническая конференция авиадвигательной отрасли (г. Алушта, 22-24 мая 2012 г.). Запорожье, 2012.–С . 42-43.

13. Торба, Ю.И., Яковлев Ю. А. Методика эксперимента и средства измерения при исследовании и доводке систем воспламенения камер сгорания [Текст] / Ю. И. Торба, Ю. А. Яковлев // Проблемы авиационного двигателестроения: Тезисы докладов. ЦИАМ. – 2013. – С.96-98.

14. Торба, Ю.И. Моделирование процесса горения в факельных воспламенителях ГТД / Ю.И. Торба, С.И. Планковский, О.В. Трифонов и др. [Текст]

// XIV міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків. Нац. Аерокосмічний ун-т "Хар. Авіац. Ін-т". – 2019. – С. 75.

15. Торба, Ю. І Проектування факельних запальників газотурбінних установок в середовищі сучасних CAD/CAE систем / Ю. І. Торба, С. І. Планковськнй, О.В. Трифонов О. В., Д.В. Павленко [Текст] // XVII міжнародна науково-технічна конференція «Удосконалювання енергоустановок методами математичного та фізичного моделювання», Харків. – 2019. – С. 30-31.

16. Торба, Ю.І. Організація процесу запалювання модельних газогенераторів [Текст] / Ю.І. Торба, В. В. Заверуха, А. В. Шевцов, О.М. Коровай XXIX International conference «New leading technologies in machine building» Koblevo - Kharkov, Ukraine September 3-8. – 2019. – Р. 93.

17. Торба, Ю.І. Оптимізація конструкції факельного запальника ГТД чисельним методом [Текст] / Ю.І. Торба, Д.В. Павленко, Я.В. Двірник // XV міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. – Харків. Нац. Аерокосмічний ун-т "Хар. Авіац. Ін-т". – 2020. – С. 55.

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

18. Патент № 141741 України, МПК F02C 7/26 (2006.01) Спосіб подачі палива в запальні пристрої газотурбінних двигунів / 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.

АНОТАЦІЯ

Торба Ю.І. Розширення діапазону розпалення камер згоряння ГТД шляхом вдосконалення конструкції запальника та режиму подачі пускового палива. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» - ДП «Івченко-Прогрес», Державний концерн «Укроборонпром», Запоріжжя, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню завданню розширення діапазону розпалення камер згоряння ГТД шляхом вдосконалення конструкції факельного запальника та режиму подачі пускового палива.

Встановлено вплив геометричних параметрів корпусу запальника на температуру полум'я та встановлені закономірності, що визначають їх вплив на температуру факелу та знайдено їх оптимальні значення.

Шляхом реалізації експериментів встановлені закономірності, що пов'язують час відкритого та закритого стану клапана подачі пускового палива до запальника з температурою полум'я, та знайдено їх оптимальне значення, що дозволяє розширити діапазон розпалювання камер згоряння.

Розроблено методику проектування запальників ГТД, що дозволяє зменшити час та матеріальні ресурсів на проектування та їх доведення.

Ключові слова: камера згоряння, факельний запальник, температура факела, перепад тиску повітря, режим подачі пускового палива, паливно-повітряна суміш, діапазон розпалення.

АННОТАЦИЯ

***Торба Ю.И.* Расширение диапазона розжига камер сгорания ГТД путем совершенствования конструкции воспламенителя и режима подачи пускового топлива. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 «Двигатели и энергетические установки» Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», Государственный концерн «Укроборонпром», Запорожье, 2020.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной задачи расширения диапазона устойчивого розжига камер сгорания ГТД путем совершенствования конструкции факельного воспламенителя и режима подачи пускового топлива.

На основании анализа современной научно-технической литературы установлены противоречия относительно проектирования систем розжига камер сгорания ГТД и пути их решения. Предложено и обосновано для расширения диапазона устойчивого розжига камер сгорания по перепаду давления воздуха управлять временем открытого и закрытого состояния клапана подачи пускового топлива. На основании разработанной численной модели факельного воспламенителя реализована серия численных экспериментов. Установлено влияние геометрических параметров корпуса факельного воспламенителя на температуру факела пламени и закономерности, определяющие их влияние на температуру факела. Определены их оптимальные значения.

Путем реализации серии натуральных экспериментов на усовершенствованных экспериментальных стендах установлены закономерности, связывающие время открытого и закрытого состояния клапана подачи пускового топлива в воспламенитель ГТД с температурой факела пламени и вероятностью розжига камеры сгорания. Найдено их оптимальное значение, что позволяет расширить диапазон устойчивого розжига камер сгорания путем управления режимом подачи пускового топлива в зависимости от температуры и перепада давления воздуха.

Разработана общая методика проектирования факельных воспламенителей камер сгорания ГТД, что позволяет обеспечить расширение диапазона устойчивого розжига, снизить затраты времени и материальных ресурсов на их проектирование и доводку.

Ключевые слова: камера сгорания, конструкция факельного воспламенителя, температура факела, перепад давления воздуха, режим подачи пускового топлива, стехиометрическая смесь, диапазон розжига.

ABSTRACT

***Torba Yu.I.* Expansion of the range of ignition of GTE combustion chambers by improving the igniter design and the starting fuel supply mode. – Qualification scientific paper, manuscript.**

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.05.03 “Engines and power plants” – State Enterprise Ivchenko-Progress, State Concern Ukroboronprom, Zaporizhzhia, 2020.

The dissertation addresses the important applied scientific problem of expanding the range of stable ignition of GTE combustion chambers by improving the design of the flare igniter and the starting fuel supply mode.

It is established the effects of the flare igniter case geometry on the flame flare temperature and regularities determining the geometry effects on the flare temperature. Optimal values of geometrical parameters are determined.

By conducting experiments, it is established the regularities that relate the time of open and closed state of starting fuel supply valve to the igniter with the flare flame temperature and their optimal values are found, which makes it possible to expand the range of stable ignition of the combustion chambers.

The general methodology for the design of flare igniters for gas turbine combustion chambers is developed, which makes it possible to reduce the time and material resources spent for their design and fine-tuning.

Key words: combustion chamber, flare igniter, flame temperature, air differential pressure, starting fuel supply mode, stoichiometric mixture, ignition range.

Підписано до друку 25.01.2021 р.
Формат 60x90/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Умовн. друк. арк. 0,89. Тираж 100 прим. Зам. № ЕВК/55 від 25.01.2021.
Державне підприємство
«Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес»
імені академіка О.Г. Івченка
вул. Іванова 2, м. Запоріжжя, 69068
тел.: 0612-65-03-27, 0612-65-46-25