

УДК 004.67:629.7  
DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-04>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ ГОРІННЯ ПАЛИВО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ У ФОРСАЖНІЙ КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

**Виганяйло Я. М.**

*аспірант*

*Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0009-0007-2478-6633](https://orcid.org/0009-0007-2478-6633)  
[yaroslav.m.m.m.77@gmail.com](mailto:yaroslav.m.m.m.77@gmail.com)*

**Шило Г. М.**

*доктор технічних наук,*

*завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0000-0002-5020-6707](https://orcid.org/0000-0002-5020-6707)  
[shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com)*

**Ключові слова:** форсажна камера згоряння, газотурбінний двигун, полум'я, іонізаційний струм, пульсації провідності, мікроконтролерна система.

У статті наведено огляд існуючих систем і методів визначення наявності полум'я у форсажній камері згоряння (ФКЗ) авіаційних газотурбінних двигунів. Дана їх класифікація за принципом дії. Надано розгорнутий опис основних властивостей та аналіз особливостей кожної системи. Зазначена необхідність удосконалення відомих на даний час систем визначення наявності полум'я в ФКЗ у зв'язку з потребою в підвищенні точності та швидкодії виявлення горіння паливо-повітряної суміші у форсажній камері згоряння у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації газотурбінного двигуна.

Описані особливості конструкції ФКЗ, що розроблюють українські двигунобудівники, та пояснено, чому неможливо використовувати відомі та традиційні методи визначення наявності полум'я для такої конструкції ФКЗ. Зроблено висновок, що існуючі способи визначення наявності полум'я мають обмеження по можливості застосування та значну ймовірність помилкових спрацювань, тому існує необхідність у розробці нового методу та алгоритмів для надійного визначення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ. Визначений найбільш перспективний напрям розвитку систем і методів визначення наявності полум'я в ФКЗ – аналіз стану середовища у ФКЗ за допомогою мікропроцесорної техніки, використовуючи такі властивості полум'я, як електропровідність, за рахунок наявності іонів та радикалів, та наявність пульсацій провідності у певних спектрах частот за рахунок протікання окисно-відновних реакцій. Описані основні задачі алгоритму з аналізу стану середовища в ФКЗ за параметрами іонізаційного струму між іонізаційними зондами (корпусним та сигнальним), встановленими в ФКЗ. Запропоновано структурну схему нової мікроконтролерної системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ. Мікроконтролерна система за величиною іонізаційного струму корегує коефіцієнт підсилення сигналу від іонізаційних зондів, аналізує спектр сигналу по частоті та за отриманими даними формує сигнал про наявність чи відсутності горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ.

# RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION OF THE PRESENCE OF COMBUSTION OF THE FUEL-AIR MIXTURE IN THE AFTERBURNER COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINES

**Vyhaniailo Ya. M.**

*Postgraduate Student*

*Zaporizhzhia National University*

*Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine*

*orcid.org/0009-0007-2478-6633*

*yaroslav.m.m.m.77@gmail.com*

**Shilo G. M.**

*Doctor of Technical Sciences,*

*Head of the Department of Computer Science*

*Zaporizhzhia National University*

*Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine*

*orcid.org/0000-0002-5020-6707*

*shilo.gn@gmail.com*

**Key words:** *afterburner combustion chamber, gas turbine engine, flame, ionization current, conductivity pulsations, microcontroller system.*

The article provides an overview of the existing systems and methods for detecting the presence of flame in the afterburner combustion chamber (ACC) of aircraft gas turbine engines. They are classified by the operating principle. A detailed description of the main properties and analysis of the features of each system are presented. The need to improve the currently known systems for detecting the presence of flame in the ACC is indicated in connection with the need to increase the accuracy and speed of detecting the combustion of the fuel-air mixture in the ACC in the entire altitude-speed range of gas turbine engine operation. The design features of the ACC, which are being developed by Ukrainian engine builders, are described, and it is explained why it is impossible to use known and traditional methods of determining the presence of flame for such ACC design. It is concluded that the existing methods for detecting the presence of flame have limitations in the possibility of application and a significant probability of erroneous responses, so there is a need to develop a new method and algorithms for reliable detection and control of the combustion of the fuel-air mixture in the ACC. The most promising direction of development of systems and methods for determining the presence of flame in the ACC is determined. This is the analysis of the state of the environment in the ACC using microprocessor technology, using such flame properties as electrical conductivity due to the presence of ions and radicals, and the presence of conductivity pulsations in certain frequency spectra due to the occurrence of oxidation-reduction reactions. The main tasks of the algorithm for analyzing the state of the environment in the ACC based on the parameters of the ionization current between the ionization probes (housing and signal) installed in the ACC are described. A structural diagram of a new microcontroller system for determining and monitoring combustion of the fuel-air mixture in the ACC is proposed. The microcontroller system adjusts the gain factor of the signal from the ionization probes based on the ionization current value исследование, analyzes the signal spectrum by frequency, and, based on the data received, generates a signal about the presence or absence of combustion of the fuel-air mixture in the ACC.

**Вступ.** В даний час на світовому ринку є великий попит на сучасні учбово-тренувальні та легкі бойові літаки (УТЛ та ЛБЛ), оскільки використовували раніше реактивні літаки для підготовки льотного складу за тактико-технічними характеристиками поступаються бойовим літкам. Відповідно, завдання створення сучасних та високоефективних двигунів для УТЛ та ЛБЛ є актуальним та затребуваним. Тому велику перспективу та особливий інтерес для авіаційної промисловості та усієї авіаційної галузі України становить створення сімейства двигунів для УТЛ та ЛБЛ [1]. Дане сімейство включає в себе, також, турбореактивні двоконтурні двигуни з форсажною камерою згоряння (ТРДДФ). Форсовані ТРДД (ТРДДФ) мають переваги перед нефорсованими у розширеному діапазоні застосування за висотами та швидкостями польоту. Проблема створення алгоритмів виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ [2–4] є новою для українських двигунобудівників. Це і визначає актуальність і необхідність виконання відповідних досліджень методів визначення наявності полум'я у ФКЗ. Тому **предметом** дослідження і стали системи і методи визначення наявності полум'я у форсажній камері згоряння (ФКЗ) авіаційних газотурбінних двигунів. **Метою** дослідження є необхідність удосконалення відомих на даний час систем визначення наявності полум'я в ФКЗ у зв'язку з потребою в підвищенні точності та швидкодії виявлення горіння паливо-повітряної суміші у форсажній камері згоряння у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації газотурбінного двигуна. Для вирішення існуючих потреб українських двигунобудівників найбільш ефективним є використання сучасних інструментів і методів з області комп'ютерних наук, а саме - розробка нового методу та алгоритмів для надійного визначення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ з використанням мікропроцесорної техніки, що і становить головне **завдання** цього дослідження.

**Огляд літератури.** Для рішення завдання виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ існують різноманітні за принципом дії датчики та системи [5–9]:

**1. Електроіонізаційні датчики** [10–19], що розташовуються у зоні стабілізаторів горіння. Спосіб формування сигналу заснований на детектуванні іонізаційного струму, що протікає між іонізаційним зондом датчика та корпусом ФКЗ. Недоліком засобу є необхідність частково виключити охолодження корпусу ФКЗ для забезпечення можливості протікання іонізаційного струму, що призводить до інтенсивного зносу та зниження ресурсних показників ФКЗ.

## **2. Оптичні датчики** [20–25]:

1) **диференційний спосіб** реєстрації теплового випромінювання продуктів згоряння (без обмеження спектрального діапазону), до та за стабілізаторами горіння. Однак при сучасних високоентальпійних режимах роботи основних камер згоряння та застосування малих режимів у форсажних камерах згоряння відмінності реєстрованих інтегральних випромінювань незначні та надійність цього способу недостатня;

2) **детектор полум'я**, в якому використовується фотоприймач на основі гетероструктури GaAsP з чутливістю до ультрафіолетового випромінювання, щоб зменшити вплив інфрачервоного випромінювання. Такий детектор добре сприймає вказане вище випромінювання, що характеризує зону горіння. Однак специфіка роботи ФКЗ у польоті припускає можливість потрапляння променів сонця у реактивне сопло. При цьому датчик полум'я видасть помилковий сигнал про наявність горіння в камері згоряння;

3) **датчик на основі газорозрядного фотоелементу**, спектр чутливості якого лежить у інтервалі 180...300 нм. Однак процеси, що характеризують горіння, супроводжуються локальним випромінюванням радикалів OH (308-320 нм), CN (431-438 нм), C<sub>2</sub> (467-470 нм; 513-516 нм) при хемілюмінесценції у хімічних реакціях окислення вуглеводневого пального. Тому чутливість пристрою для виявлення горіння у відомому способі низька.

**3. Система контролю наявності полум'я у ФКЗ за параметрами вібрації двигуна** [26–36]. За основу методу взята технологія пікового усереднення сигналу датчика вібрації, що дозволяє виділити ознаки наявності полум'я на форсованих режимах роботи газотурбінних двигунів навіть датчиками вібрації достатньо віддаленими від ФКЗ. При цьому виявляється не менше ніж на 13 дБ підвищення потужності шуму віброприскорення над нефорсованими режимами.

Основним частотним діапазоном, в районі якого найбільш характерно виявляються ознаки наявності полум'я в ФКЗ, є діапазон частот у районі 6,4 кГц з шириною полоси від 80 Гц до 250 Гц у залежності від місця та напрямку зміни вібрації. У цій полосі частот максимальні потужності випадкового віброприскорення на форсованих режимах на усіх датчиках вібрації двигуна зростають на 9-21 дБ.

Найбільш чутливим до наявності полум'я у ФКЗ виявляється вимірювання вібрації в осьовому напрямку, у якому максимальні потужності випадкового віброприскорення підвищуються більш ніж на порядок або на 21 дБ.

Включення ФКЗ підвищує потужність шуму віброприскорення на жаровій трубі основної

камери згоряння (ОКЗ) на навколо нульових частотах, що може свідчити про суттєве підвищення рівня випадкового вібропереміщення, величина якого при однаковому рівні віброприскорення зворотно пропорційна частоті коливань.

Момент розпалювання ФКЗ характеризується проходженням зворотної хвилі тиску, що призводить до різкого гальмування ротору низького тиску (НД) розмахом до 3000 об/хв/с після попереднього розгону до 1200-1800 об/хв/с, викликаного попереднім розкриттям сопла та визначається за максимумом прискорення роторів, що відповідає точці перегину трендів частот обертання.

Момент згасання ФКЗ характеризується проходженням зворотної хвилі розрідження, що характеризується гальмуванням ротору НД розмахом до 3000 об/хв/с з попереднім прискоренням до 600 об/хв/с.

Незважаючи на наявність характерних ознак, що відповідають процесу горіння ФКЗ, у описаного метода є основний та принциповий недолік: аналіз стану середовища в ФКЗ (наявність або відсутність полум'я) ведеться за непрямыми ознаками (вібрація двигуна) і знаходиться в області шумів сигналу або випадкових віброприскорень та вібропереміщень. Визначити такі характерні ознаки процесу горіння ФКЗ можливо лише при стендових випробуваннях двигуна, але при роботі двигунів у складі літака причиною таких шумів сигналу або випадкових віброприскорень та вібропереміщень можуть бути: робота сусіднього двигуна або робота літакових систем, наприклад, використання озброєння, що призведе до помилкових визначень наявності полум'я. Тому навіть розробники методу рекомендують використання його у комбінації з основною системою визначення наявності полум'я на іонізаційній основі.

Враховуючи, що у існуючих способів визначення наявності полум'я є обмеження по можливості застосування та значна ймовірність помилкових спрацювань, існує необхідність у розробці нового методу та алгоритмів для надійного визначення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ.

### **Перспективи розвитку систем, методів та алгоритмів визначення наявності полум'я в ФКЗ**

Необхідність удосконалення відомих на даний час систем визначення наявності полум'я в ФКЗ викликано потребою в підвищенні точності та швидкодії виявлення горіння паливо-повітряної суміші у форсажній камері згоряння у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації газотурбінного двигуна.

ТРДДФ, що розробляються українськими двигунобудівниками, мають особливості конструкції ФКЗ [1, 2]. А саме для виключення умов, що при-

зводять до віброгоріння (шкідливе явище, що руйнує елементи ФКЗ), до конструкції вводяться демпфуючі отвори у екранах ФКЗ. При цьому повітря з-за компресору через ці отвори обдуває стінки екрану. Холодне повітря створює граничний шар з діелектричним характером, який не дозволяє використати відомий та описаний вище метод детектування. У зв'язку з цим розробка принципу та відповідного методу виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ є актуальною.

### **Методи**

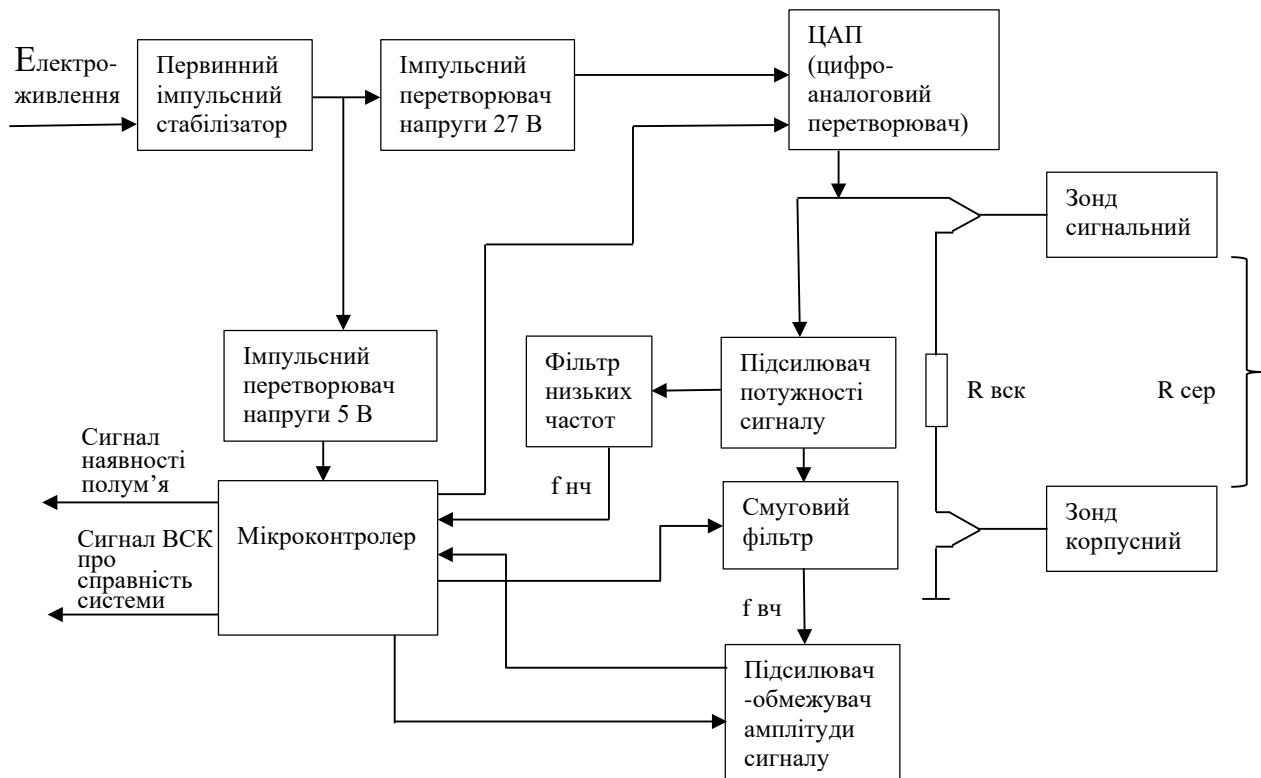
**Найбільш перспективним та достовірним напрямком** у даному випадку є розробка методу та алгоритму для аналізу з використанням мікропроцесорної техніки, стану середовища у ФКЗ, а саме комбінації таких характерних властивості полум'я, як електропровідність, за рахунок наявності іонів та радикалів, та наявності пульсацій провідності у певних спектрах частот за рахунок протікання окисно-відновних реакцій.

**Результати.** Структурна схема мікроконтролерної системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ на основі аналізу стану середовища наведена на рис. 1.

Аналіз стану середовища в ФКЗ пропонується виконувати автоматично мікроконтролерною системою, що вимірює іонізаційний струм між іонізаційними зондами (корпусним та сигнальним), встановленими в ФКЗ, за величиною струму корегує коефіцієнт підсилення сигналу від іонізаційних зондів, аналізує спектр сигналу по частоті та за отриманими даними формує сигнал про наявність чи відсутність горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ. А для взаємодії з системою контролю та діагностики основної системи автоматичного керування двигуна формується сигнал про справність апаратної частини системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ, що складається з діагностики відсутності обривів та коротких замикань у лініях зв'язку з іонізаційними зондами, у ланцюгах електроживлення та у внутрішніх ланцюгах елементів системи. Первинний імпульсний стабілізатор, імпульсні перетворювачі напруги 5 В та 27 В забезпечують необхідну якість живлення для мікроконтролера та функціональних вузлів обробки сигналу від іонізаційних зондів: фільтри низькочастотних та високочастотних складових сигналу, підсилювачі потужності та амплітуди сигналів. ЦАП призначений для підтримки максимальної чутливості роботи смугового фільтру.

Розробка та реалізація системи визначення наявності полум'я в ФКЗ такого напрямку потребує поглибленого дослідження особливостей середовища у ФКЗ при наявності або відсутності полум'я.





**Рис. 1. Структурна схема мікроконтролерної системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ**

$f_{нч}$  – низькочастотна складова сигналу від зондів;  $f_{вч}$  – високочастотна складова сигналу від зондів;  $R_{вск}$  – резистор вбудованої системи контролю (ВСК);  $R_{сер}$  – електричний опір середовища між зондами.

**Висновки.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає в тому, що запропоновано розробку нового методу та алгоритму з використанням мікропроцесорної техніки для аналізу стану середовища у ФКЗ, описані основні задачі алгоритму з аналізу стану середовища в ФКЗ за параметрами іонізаційного струму між іонізаційними зондами (корпусним та сигнальним), встановленими в ФКЗ, та запропонована структурна схема основних функціональних вузлів для апаратної реалізації.

Цей метод принципово новий та призначений саме для ФКЗ розробки українських двигунобудівників, що мають особливості конструкції. Тому запропонований метод та алгоритми не можуть бути порівняні з існуючими та вищеписаними методами визначення наявності полум'я у ФКЗ.

В подальшій перспективі передбачена розробка та виготовлення дослідного зразка електронного блоку з такими функціями для використання у складі газотурбінного двигуна.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко І.Ф. Формування параметричного обліку та конструктивної схеми ТРДД для УТЛ-ЛБЛ. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2011. № 9(86). С. 7–12.27.
2. Єпіфанов С.В., Кузнецов Б.І., Богаєнко В.І. Синтез систем управління та діагностування газотурбінних двигунів. Київ : Техніка. 1998. 312 с.
3. Кіслов О.В., Шевченко М.А. Особливості розрахунку та регулювання двоконтурного турбореактивного двигуна з форсажною камерою згоряння в зовнішньому контурі в прямоточному режимі роботи. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2020. № 6(166). С. 15–23.
4. Chen Y., Fan Y., Bai X.S., Xu L., Shan X., Bi Y. Experimental study on combustion and flow resistance characteristics of an afterburner with air-cooled bluff-body flameholder. *Aerospace Science and Technology*. 2022. Т. 123. С. 107488.
5. Іноземцев А.А., Сандрацький В.Л. Газотурбінні двигуни / ВАТ «Авіадвигун», 2011. 1024 с.

6. Герасименко В.П. Теорія авіаційних двигунів : підручник. Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т». 2003. 199 с.
7. Docquier N., Candel S. Combustion control and sensors: A review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2002. № 28. С. 107–150.
8. Ballester J., Garcia-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2010, № 36. С. 375–411.
9. Bader A., Bellovich J. Pilot, ignition and monitoring systems / The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. 2013. 2-е изд. Boca Raton, USA. С. 299–306.
10. Xu H., Fan W., Feng J., Yan P., Qi S., Zhang R. Parameter Determination and Ion Current Improvement of the Ion Current Sensor Used for Flame Monitoring. *Sensors*. 2021. 21. 697.
11. Chang L., Cao Z., Fu B., Lin Y., Xu L. Lean blowout detection for bluff-body stabilized flame. *Fuel*. 2020. № 266. 117008.
12. Li F., Xu L., Du M., Yang L., Cao Z. Ion current sensing-based lean blowout detection for a pulse combustor. *Combust. Flame*. 2017. № 176. С. 263–271.
13. Ding Y., Durox D., Darabiha N., Schuller T. Combustion state monitoring of premixed heating appliances with flame ionization current and chemiluminescence. *Combust. Sci. Technol.* 2018. № 191. С. 382–401.
14. Yan Y., Wang L., Qian X., Zhang W., Reda K., Wu J., Zheng G. Electrostatic sensors – Their principles and applications. *Measurement*. 2021. 169. 108506.
15. Gardiner D.P., Pucher G., Allan W.D., La Violette M. Flame-Out Detection for Gas Turbine Engines Based upon Thermocouple Signal Analysis. In *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air*. Barcelona, Spain. 6-11 May 2006. С. 777–783.
16. Rolando A., D'Alessio A., D'Anna A., Allouis C., Beretta F., Minutolo P. Measurement of particulate volume fraction in a coflow diffusion flame using transient thermocouple technique. *Combust. Sci. Technol.* 2004. № 176. С. 945–958.
17. Strandh P., Christensen M., Bengtsson J., Johansson R., Vressner A., Tunestal P., Johansson B. Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback. In *Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition*. Pittsburgh, USA. 27-30 October 2003. SAE International: Pittsburgh, USA. 2003.
18. Yoshiyama S., Tomita E. Combustion Diagnostics of a Spark Ignition Engine Using a Spark Plug as an Ion Probe. In *Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition*. San Diego, USA. 21-24 October 2002. SAE International: San Diego, USA. 2002.
19. Chorpening B.T., Thornton J.D., Huckaby E.D., Benson K.J. Combustion oscillation monitoring using flame ionization in a turbulent premixed combustor. *J. Eng. Gas. Turbines Power*. 2006. № 129. С. 352–357.
20. Tang Q., Liu H., Li M., Yao M., Li Z. Study on ignition and flame development in gasoline partially premixed combustion using multiple optical diagnostics. *Combust. Flame*. 2017. № 177. С. 98–108.
21. Liu C., Cao Z., Lin Y., Xu L. Flame monitoring of a model swirl injector using 1D tunable diode laser absorption spectroscopy tomography. *Meas. Sci. Technol.* 2017. № 28. 054002.
22. Hariharan V., Mishra D. P. Dynamic flame stability diagnosis of inverse jet flame using CH\* chemiluminescence. *Fuel*. 2021. № 285. 119277.
23. Tsai C.F., Young M.S. Measurement system using ultraviolet and multiband infrared technology for identifying fire behavior. *Rev. Sci. Instrum.* 2006. № 77. 014901.
24. Xu L., Liu C., Jing W., Cao Z., Xue X., Lin Y. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H<sub>2</sub>O mole fraction. *Rev. Sci. Instrum.* 2016. № 87. 013101.
25. Muruganandam T., Nair S., Neumeier Y., Lieuwen T., Seitzman J. Optical and Acoustic Sensing of Lean Blowout Precursors. In *Proceedings of the 38<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Indianapolis, USA. 7-11 July 2002.
26. Журавльов В.М., Торба Ю.І, Павленко Д.В. Дослідження параметрів процесу включення форсажної камери згоряння ГТД. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2022. № 3(179). С. 30–36.
27. Schulz C., Dreizler A., Ebert V., Wolfrum J. Combustion diagnostics. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin: 2007. С. 1241–1315.
28. Khosravy el Hossaini M. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines. *Progress in Gas Turbine Performance*. Intech Open. 2013. С. 16.
29. Z. Wang, N. Zhao, W. Wang, R Tang, S. Li. A fault diagnosis approach for gas turbine exhaust gas temperature base on fuzzy c-means clustering and support vector machine. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015.
30. Afgan N.H., Carvalho M.G., Pilavachi P.A., Tourlidakis A., Olkhonski G.G., Martins N. An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers. *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26. С. 766–771.

31. Mauricio A., Helm D., Timusk M., Antoni J., Gryllias K. Novel cyclo-nonstationary indicators for monitoring of rotation machinery operating under speed and load varying conditions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2022. Vol. 144. C. 24–40.
32. Лозня С.В., Некрасов С.С., Соляник В.Г., Торхов М.І., Френев О.В., Якунін В.М. Застосування засобів вібраційної діагностики для захисту від вібраційного горіння. *Вібрації у техніці та технологіях*. 2001. № 4(20). С. 57–60.
33. Торхов М.І., Лозня С.В., Налесний М.Б. Метод виявлення вібраційного горіння палива у камерах згоряння газотурбінних установок. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2006. № 10(36). С. 103–106.
34. Singh A., Eshaghi A., Yu M., Gupta A.K., Bryden N.M. Simultaneous time-resolved fluctuating temperature and acoustic pressure field measurements in a premixed swirl flame. *Energy*. 2014. № 115. С. 116–127.
35. Nair S., Lieuwen T. Acoustic detection of blowout in premixed flames. *J. Propuls. Power*. 2005. № 21. С. 32–39.
36. Nair S., Lieuwen T. Acoustic Emissions of Premixed Flames on Swirl and Bluff-Body Stabilized Combustors near Flameout. In Proceedings of the 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, USA. 20-23 July 2003.

### REFERENCES

1. Kravchenko I.F. Formuvannya parametrichnoho obliku ta konstruktyvnoi shemy TRDD dlya UTL-LBL [Formation of the parametric appearance and design scheme of the turbofan engine for the TA-LCA] // *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiya*. 2011. № 9(86). pp. 7 – 12.27.
2. Yepifanov S.V., Kuznetsov B.I., Bohaienko V.I. Suntez sistem upravlinnya ta diahnostuvannya gazoturbinnuh dvyguniv [Synthesis of control and diagnostic systems for gas turbine engines] / Kyiv: Tehnika, 1998. 312 p.
3. Kislov O.V., Schevchenko M.A. Osoblyvosti rozrakhunku ta rehuluvannya dvokonturnoho turboreaktivnoho dvuhuna z forsazhnou kameroiu zhoryannya v zovnishnomu konturi v pryamotochnomu rezhumi robotu [Calculation and regulation features of dust-burning turbofan engine at ramjet modes] // *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiya*. 2020. № 6(166). pp. 15 – 23.
4. Chen Y., Fan Y., Bai X.S., Xu L., Shan X., Bi Y. Experimental study on combustion and flow resistance characteristics of an afterburner with air-cooled bluff-body flameholder // *Aerospace Science and Technology*. 2022. № 123. 107488.
5. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinni dvyguny [Gas turbine engines]: VAT «Aviadvygun». 2011. 1024 p.
6. Herasymenko V.P. Teoriya aviatsiinykh dvyhuniv [Theory of aircraft engines] / Pidruchnyk. Kharkiv: Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet, 2003. 199p.
7. Docquier N., Candel S. Combustion control and sensors: A review // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2002. № 28, pp. 107-150.
8. Ballester J., Garcia-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2010. № 36. pp. 375-411.
9. Bader A., Bellovich J. Pilot, ignition and monitoring systems / The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. 2013. 2nd ed. Boca Raton, USA. pp. 299-306.
10. Xu H., Fan W., Feng J., Yan P., Qi S., Zhang R. Parameter Determination and Ion Current Improvement of the Ion Current Sensor Used for Flame Monitoring // *Sensors*. 2021. 21. 697.
11. Chang L., Cao Z., Fu B., Lin Y., Xu L. Lean blowout detection for bluff-body stabilized flame // *Fuel*. 2020. № 266. 117008.
12. Li F., Xu L., Du M., Yang L., Cao Z. Ion current sensing-based lean blowout detection for a pulse combustor // *Combust. Flame*. 2017. № 176. pp. 263-271.
13. Ding Y., Durox D., Darabiha N., Schuller T. Combustion state monitoring of premixed heating appliances with flame ionization current and chemiluminescence // *Combust. Sci. Technol.* 2018. № 191. pp. 382-401.
14. Yan Y., Wang L., Qian X., Zhang W., Reda K., Wu J., Zheng G. Electrostatic sensors – Their principles and applications // *Measurement*. 2021. 169. 108506.
15. Gardiner D.P., Pucher G., Allan W.D., La Violette M. Flame-Out Detection for Gas Turbine Engines Based upon Thermocouple Signal Analysis // In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air. Barcelona, Spain. 6-11 May 2006. pp. 777-783.
16. Rolando A., D'Alessio A., D'Anna A., Allouis C., Beretta F., Minutolo P. Measurement of particulate volume fraction in a coflow diffusion flame using transient thermocouple technique // *Combust. Sci. Technol.* 2004. № 176. pp. 945-958.

17. Strandh P., Christensen M., Bengtsson J., Johansson R., Vressner A., Tunestal P., Johansson B. Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback // In Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition. Pittsburgh, USA. 27-30 October 2003. SAE International: Pittsburgh, USA. 2003.
18. Yoshiyama S., Tomita E. Combustion Diagnostics of a Spark Ignition Engine Using a Spark Plug as an Ion Probe // In Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition. San Diego, USA. 21-24 October 2002. SAE International: San Diego, USA. 2002.
19. Chorpening B.T., Thornton J.D., Huckaby E.D., Benson K.J. Combustion oscillation monitoring using flame ionization in a turbulent premixed combustor // J. Eng. Gas. Turbines Power. 2006. № 129. pp. 352-357.
20. Tang Q., Liu H., Li M., Yao M., Li Z. Study on ignition and flame development in gasoline partially premixed combustion using multiple optical diagnostics // Combust. Flame. 2017. № 177. pp. 98-108.
21. Liu C., Cao Z., Lin Y., Xu L. Flame monitoring of a model swirl injector using 1D tunable diode laser absorption spectroscopy tomography // Meas. Sci. Technol. 2017. № 28. 054002.
22. Hariharan V., Mishra D. P. Dynamic flame stability diagnosis of inverse jet flame using CH\* chemiluminescence // Fuel. 2021. № 285. 119277.
23. Tsai C.F., Young M.S. Measurement system using ultraviolet and multiband infrared technology for identifying fire behavior // Rev. Sci. Instrum. 2006. № 77. 014901.
24. Xu L., Liu C., Jing W., Cao Z., Xue X., Lin Y. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H<sub>2</sub>O mole fraction // Rev. Sci. Instrum. 2016. № 87. 013101.
25. Muruganandam T., Nair S., Neumeier Y., Lieuwen T., Seitzman J. Optical and Acoustic Sensing of Lean Blowout Precursors // In Proceedings of the 38<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Indianapolis, USA. 7-11 July 2002.
26. Zhuravlyov V.M., Torba Yu.I., Pavlenko D.V. Doslidzhennya parametriv protsesu vkluchennya forsazhnoi kamery zhoryannya GTD [Investigation of the parameters of the process of turning on the afterburner of GTE] // Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohyia, 2022. № 3(179). pp. 30-36.
27. Schulz C., Dreizler A., Ebert V., Wolfrum J. Combustion diagnostics // Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin: 2007. pp. 1241-1315.
28. Khosravy el Hossaini M. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines // Progress in Gas Turbine Performance. – Intech Open. 2013. p. 16.
29. Z. Wang, N. Zhao, W. Wang, R Tang, S. Li. A fault diagnosis approach for gas turbine exhaust gas temperature base on fuzzy c-means clustering and support vector machine // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 2015.
30. Afgan N.H., Carvalho M.G., Pilavachi P.A., Tourlidakis A., Olkhonski G.G., Martins N. An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26. pp. 766-771.
31. Mauricio A., Helm D., Timusk M., Antoni J., Gryllias K. Novel cyclo-nonstationary indicators for monitoring of rotation machinery operating under speed and load varying conditions // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2022. Vol.144. pp. 24-40.
32. Loznya S.V., Nekrasov S.S., Solyanik V.G., Torhov M.I., Frenev O.V., Yakunin V.M. Zastosuvannya zasobiv vibratsiynoi diahnostryky dlya zakhystu vid vibratsiynoho horinnya [Application of means of vibration diagnostics for protection against vibration burning] // Vibratsii u tehnitsi ta tekhnolohiyakh. 2001. №4 (20). pp. 57-60.
33. Torhov M.I., Loznya S.V., Nalesnyj M.B. Metod vyyavlennya vibratsiynoho horinnya palyva u kamerah zhoryannya hazotyrbinyh ustanovok [Method for detecting vibrational combustion of fuel in combustion chambers of gas turbine installations] // Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohyia, 2006. № 10(36). pp. 103-106.
34. Singh A., Eshaghi A., Yu M., Gupta A.K., Bryden N.M. Simultaneous time-resolved fluctuating temperature and acoustic pressure field measurements in a premixed swirl flame // Energy. 2014. №115. pp. 116-127.
35. Nair S., Lieuwen T. Acoustic detection of blowout in premixed flames // J. Propuls. Power. 2005. №21. pp. 32-39.
36. Nair S., Lieuwen T. Acoustic Emissions of Premixed Flames on Swirl and Bluff-Body Stabilized Combustors near Flameout // In Proceedings of the 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, USA. 20-23 July 2003.