

УДК 621.452.3.017:665.753.2

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup1.04

І. В. МОРОЗОВА, Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО, В. М. ЄГУНЬКО

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА РОБОТУ АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

В роботі розглянуто можливості підвищення надійності та ефективності роботи авіаційного двигуна, які є одними з основних показників якості та потребують високої якості палива. Сучасні газотурбінні двигуни (ГТД) – набагато потужніші та економічніші в порівнянні з тими, які випускалися ще 50 років тому. Тим не менш, виробники безперервно працюють над удосконаленням двигунів, роблячи основний упор на їхню паливну економічність. Присутні в паливі механічні домішки можуть забивати паливні фільтри, тим самим припиняючи подачу палива. Наявність у паливі смол призводить до утворення різних відкладень на деталях двигуна, а вміст сірки, кислот та лугів підвищує корозійну активність палива. Повнота згорання та схильність до нагароутворення є основними експлуатаційними характеристиками вуглеводневих палив, що мають велике практичне значення у разі підвищення економічності та ресурсу двигуна. В даний час існує безліч варіантів підвищення техніко-економічних показників. Запропоновано спосіб підготовки більш якісної паливної суміші перед подачею двигуна. Підготовка авіаційного палива здійснюється за рахунок електрофізичного впливу (ЕФВ) на паливо. Електрофізичний вплив на паливо здійснюється магнітною установкою зі знакозмінним магнітним полем. Було проведено дослідження щодо визначення електрофізичного впливу на повноту згорання авіаційного палива та нагароутворення в камері згорання ГТД. Спосіб дозволяє дати порівняльну оцінку повноти згорання і нагароутворення палив для двигунів при невеликому обсязі палива, що витрачається на випробування. Встановлено, що при електрофізичному впливі на авіаційне паливо повнота згорання палива збільшується на 10...12 %, нагароутворення у камері згорання ГТД знижується на 20...25 %. Позитивний ефект на процес згорання в попередніх фазах призводить до скорочення фази догорання, отже, зменшення температури відпрацьованих газів, зниження концентрації оксиду азоту на 12...16 %, оксиду вуглецю на 0,64...0,7 % і вуглеводню на 25...35 %. Після електрофізичного впливу та напрацювання палива в чотири рази збільшується зміст смолянистих сполук, на ~23 % зменшується зміст кисневих сполук та на ~25 % сірчистих.

Ключові слова: повнота згорання; нагароутворення; камера згорання газотурбінного двигуна; електромагнітний вплив; протизносні властивості; паливо.

Вступ

Для оцінки досконалості камер згорання, ефективності їхнього робочого процесу, а також при розрахунках основних даних та характеристик авіаційних ГТД розглянемо повноту згорання. Повнота згорання – одна з найважливіших характеристик камер згорання в газотурбінних двигунах, по-перше, через пов'язані з нею невідобовні втрати тепла, а по-друге, через шкідливі викиди в атмосферу, особливо NO_x . У зв'язку з цим у номінальному режимі роботи потрібно забезпечити повноту згорання палива не нижче 0,999. Для газотурбінних двигунів, в якості палива використовується газ, в номінальному режимі роботи величина повноти згорання палива близька до одиниці, що збільшує вимоги до точності її визначення [1].

Повнота згорання авіаційного палива характеризує теплову ефективність горіння і визначається як відношення тепла, що виділилося при згоранні 1 кг газу Q_{get} , до його нижчої теплоти згорання Q_n :

$$\eta_z = \frac{Q_{\text{get}}}{Q_z}.$$

Неповне використання тепла палива пов'язане з недопалом та ендотермічною реакцією утворення оксидів азоту NO_x [1].

Розділяють два види недопалу: механічний та хімічний.

Механічний недопал – це викиди вуглеводнів, що не згоріли. Він пов'язаний з областями зниженої температури, через які паливний газ проходить не згораючи. У камерах згорання такі області зазвичай утворюються в пристінних зонах або з'являються у разі згасання частини пальників. Даний вид недопалу характерний для режимів з збідненою паливно-повітряною сумішшю на межі зриву полум'я.

Хімічний недопал – це викиди окису вуглецю. Він виникає з двох причин: через незавершеність процесів горіння та дисоціацію CO_2 за зоною горіння.

Незавершеність процесів горіння виникає, коли час перебування паливно-повітряної суміші в зоні горіння менше за швидкість протікання хімічних реакцій окислення.

Дисоціація CO_2 за зоною горіння зумовлена хімічною нестабільністю продуктів згорання та протікання при температурах 2200–2400 К. Поступове охолодження продуктів згорання до 1600–1800 К сприяє повному окисленню оксиду вуглецю до CO_2 , що виключає втрати тепла палива. Різде охолодження продуктів згорання «заморожує» склад газів із збереженням певного рівня CO , що призводить до хімічного недопалу [2].

Реакція утворення оксидів азоту проходить із поглинанням частини теплоти, що виділяється при згоранні палива. При температурі в зоні горіння вище 1800 К утворення NO_x йде по ланцюговому механізму Зельдовича [3]. Наступний за значимістю – це механізм утворення оксидів азоту у фронті полум'я і навіть механізм утворення оксидів азоту через N_2O .

1. Постановка мети і задачі дослідження

Метою і задачами даної роботи є:

- виконати порівняльний аналіз експериментальних досліджень повноти згорання авіаційного палива в камері згорання ГТД до та після електрофізичного впливу;
- на основі отриманих результатів і запропонованому методі провести порівняльну оцінку нагароутворення палив для двигунів при невеликому обсязі витратного на випробування палива;
- провести оцінку зміни протизносних властивостей палива в результаті електрофізичного впливу на його фізико-хімічні властивості та зношування контактуючих поверхонь сталі в середовищі палива.

2. Порівняльна оцінка повноти згорання і нагароутворення палива для ГТД

Повнота згорання та схильність до нагароутворення є основними експлуатаційними характеристиками вуглеводневих палив, які мають велике практичне значення у разі підвищення економічності та ресурсу двигуна. Про схильність до нагароутворення судять за кількістю нагару, який відкладається на стінках камер згорання, при цьому порушується аеродинаміка потоку, відбувається місцевий перегрів, короблення та розтріскування жарових труб. Частинки нагару, що мчаться газовим потоком, викликають ерозію металевих поверхонь. При відкладенні нагару на форсунках змінюється форма розпо-

рошеного струменя, знижується ефективність згорання палива [4, 6, 7].

Застосування кваліфікаційних методів випробувань авіаційного палива в сукупності з фізико-хімічними методами досліджень, при мінімальному витраті засобів та випробуваннях зразків рідини, дозволяє надійно оцінити їх експлуатаційні властивості, тобто за допомогою кваліфікаційних методів вдається прискорити оцінку експлуатаційних властивостей авіаційного палива, виявити оптимальний режим та ефективність електрофізичного способу впливу.

Проведено дослідження щодо визначення впливу електрофізичної дії [5] на характеристики згорання вуглеводневих палив на малорозмірній установці. Метод дозволяє дати порівняльну оцінку повноти згорання та нагароутворення палив для двигунів при невеликому обсязі палива, що витрачається на випробування. В якості досліджуваного об'єкта брали авіаційне паливо марки ТС-1. Випробування контрольного зразка палива та зразка, підданого електрофізичному впливу, проводили на тому самому стенді.

При знятті характеристик по повноті згорання постійними витримували такі умови: витрата повітря, що надходить в камеру згорання, 0,25 кг/с; тиск повітря перед камерою згорання 0,025 кг/см²; температура повітря перед камерою згорання, 333 К (60°C); склад робочої суміші – коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1$.

Коефіцієнт повноти згорання η випробуваного палива визначали по тепловому балансу.

Контрольні випробування на товарному паливі ТС-1 показали, що при постійному коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1$ повнота згорання досить велика і $\eta_{\text{исх}} = 0,940$, а відхилення коефіцієнта повноти згорання становили менше $\Delta\eta = \pm 0,010$. Однак після електрофізичного впливу на паливо відбувається збільшення повноти згорання $\eta_{\text{ФВ}} = 0,956\text{--}0,960$, що можна пояснити підвищенням реакційної здатності вуглеводневих сполук в початковій стадії реакції у присутності в паливі збудженого молекулярного кисню та залежності від енергії активізації E_a .

Швидкість хімічної реакції горіння по паливу в даний момент часу пропорційна добутку концентрації реагуючих речовин в той же момент часу:

$$W_f = \frac{dC_f}{dt} = k_f C_f^{v_f} C_k^{v_k}.$$

Залежність константи швидкості хімічної реакції визначається згідно із законом Арреніуса:

$$K_f = k_0 \sqrt{T} e^{\frac{-E_a}{RT}}.$$

Отже, при зменшенні енергії активації E_a , як наслідок електрофізичного впливу на енергію міжмолекулярної взаємодії між молекулами палива та кисню [6], швидкість реакції горіння по паливу W_f зросте.

Підвищення швидкості реакції окислення W_f в основній фазі горіння є однією з вимог покращення економічності та сприяє збільшенню повноти згорання. Поліпшення процесів згорання палива в попередніх фазах призводить до скорочення фази догорання, що спричиняє зменшенню температури відпрацьованих газів.

З повнотою згорання палив тісно пов'язана можливість утворення нагару та появи смолистих, вуглих та коксоподібних відкладень у двигунах. Перед оцінкою палив на схильність до нагароутворення середню частину жарової труби малорозмірної камери згорання очищали від нагару, сушили при температурі 420 К, зважували з точністю до $m = 0,01$ г, потім камери монтували на стенд.

Експерименти показали, що при контрольному паливі кількість нагару становила $m_{\text{исх}} = 5,30 \dots 5,50$ г, а після ЕФВ $m_{\text{ЕФВ}} = 4,10 \dots 4,20$, тобто відбувається зменшення відкладення нагару на стінках камери на 20...25 %, при похибці вимірювань за кількістю нагару лише на 5 % (табл. 1).

3. Результати досліджень протизносних властивостей авіаційного палива

Паливо перед подачею в камеру згорання проходить через паливну апаратуру, що забезпечує підвищення тиску палива та його очищення. Аналіз відмов свідчить, що однією з основних причин виходу з ладу паливної апаратури є підвищений знос прецизійних пар, де паливо є мастилом. Тому одне із завдань дослідження полягало щодо оцінки зміни протизносних властивостей палива в результаті еле-

ктрофізичного впливу на його фізико-хімічні властивості.

Проведено експерименти з вивчення впливу електрофізичного способу на протизносні властивості авіаційного палива [8,9,10]. Дослідження проводили на зразках гідроочищеного палива Т-8В та прямогонного ТС-1 в умовах тертя ковзання. При терті ковзання металів у паливному середовищі в даному приладі створюється найбільш важкий режим для поверхневих шарів і тонкої граничної плівки, що розділяє поверхню тертя.

Застосування електрофізичного впливу при сигналі абсорбції ще більше покращує протизносні властивості палив і зменшує зношування контактуючих поверхонь сталі в паливі ТС-1 на 34...38 % ($K_{\text{ТС-1}} \approx 164$ %).

Для підвищення достовірності визначення зносу сталі ШХ15 при терті ковзання був застосований метод емісійної спектроскопії, який дозволяє визначати продукти зносу у вуглеводневому середовищі, що спалюється у дузі вольтової змінного струму. Метод має високу чутливість і дозволяє визначати в паливі вміст усіх металів [12]. Одночасно, визначення хімічного складу проводили мас-спектрометричним та хроматографічним методами. Дослідження піддавали паливо ТС-1 до і після випробувань з визначення протизносних властивостей палив.

Результати досліджень показали відсутність заліза у вихідному зразку палива. В зразку палива після напрацювання, але без попереднього ЕФВ, виявлено заліза – 0,00048 % ваги, а в зразку палива, який перед напрацюванням був підданий електрофізичному впливу, вміст заліза був двічі менший – 0,00024 %.

Результати хімічного складу палива ТС-1 до та після випробувань наведено в таблиці 2.

Таблиця 1

Нагароутворення палива в камері згорання для газотурбінного двигуна

Найменування	Показники	
Паливо ТС-1	Коефіцієнт надлишку повітря	Нагароутворення в камері згорання, г
1	1,0	5,3
2	1,0	5,3
3	1,0	5,2
Паливо ТС-1 після ЕФВ		
$H = 80$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	4,40
$H = 160$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	4,19
$H = 480$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	4,70
$H = 640$ кА/м, $V = 0,5$ м/с	1,0	5,20

Таблиця 2

Хімічний склад авіаційного палива ТС-1

Найменування показників	Паливо, %	Паливо після напрацювання	
		До ЕФВ, %	Після ЕФВ, %
Зміст вуглеводнів:			
– парафінових сполук	52,50	52,80	52,73
– нафтових сполук	32,10	31,75	31,52
– ароматичних сполук	13,50	13,35	13,52
Зміст смолистих сполук	–	0,006	0,024
Зміст сірки	0,45	0,37	0,27
Зміст кисневих сполук	0,075	0,35	0,27
Зміст азотистих сполук	1,2	1	1,1
Зміст води	0,0035	0,017	0,018

При розгляді отриманих результатів статистично оброблених матеріалів серії дослідів можна побачити певний зв'язок між протизносними властивостями та складом товарної гасу. Після електрофізичного впливу та напрацювання палива в чотири рази збільшився вміст смолянистих сполук, на ~23 % зменшився вміст кисневих сполук та на ~25 % сірчистих.

Зниження вмісту заліза в два рази свідчить про зменшення зносу поверхонь деталей зі сталі, що труться ШХ15. Все це в комплексі говорить про поліпшення протизносних властивостей палива і про можливість збільшення критичного навантаження.

Висновки

Порівняльна оцінка параметрів проведених експериментальних досліджень повноти згорання та нагароутворення авіаційного палива для газотурбінних двигунів до та після електрофізичного впливу показало підвищення повноти згорання палива на 10...12 % та зниження відкладення нагару у камері згорання ГТД на 20...25 %. Позитивний ефект на процес згорання в попередніх фазах призводить до скорочення фази догорання, отже, зменшення температури відпрацьованих газів, зниження концентрації оксиду азоту на 12...16 %, оксиду вуглецю на 0,64...0,7 % і вуглеводню на 25...35 %. Після електрофізичного впливу та напрацювання палива в чотири рази збільшився вміст смолянистих сполук, на ~23 % зменшився вміст кисневих сполук та на ~25 % сірчистих. Наукове обґрунтування вимог до якості палив, оцінка найважливіших їх експлуатаційних параметрів – все це набуває першочергового значення в технічній експлуатації авіаційних двигунів.

Література

1. Бойко, А. В. Гідрогазодинаміка [Текст] / А. В. Бойко. – Х. : НТУ ХПІ, 2008. – 444 с.
2. Лефевр, А. Процессы в камере сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр. – М. : Мир, 1989. – С. 144-145.
3. Зельдович, Я. Б. Окисление азота при горении [Текст] / Я. Б. Зельдович. – М. : Рипол Классик, 1984. – 148 с.
4. Теория авиационных трехконтурных турбореактивных двигателей: монография [Текст] / Ю. М. Терещенко, Н. С. Кулик, И. А. Ластивка [и др.] ; под ред. проф. Ю. М. Терещенко. – К. : Изд-во Нац. авиац. ун-та «НАУ-друк», 2010. – 116 с.
5. Morozova, I. V. Influence on the Energy Efficiency of Hydrocarbon Fueis [Text] / I. V. Morozova, V. I. Morozov // Nanostructured Materials for the Detection of CBRN. – Springer, 2017. – P. 319-330.
6. Абрагам, А. Ядерный магнетизм [Текст] / А. Абрагам. – М. : Иностранная литература, 1963. – 551 с.
7. Теорія теплових двигунів. Газодинамічний розрахунок елементів газотурбінних двигунів: навч. посібник [Текст] / Ю. М. Терещенко, М. С. Кулик, М. М. Мітрахович [та ін.] ; за ред. Ю. М. Терещенка. – К. : НАУ, 2015. – 292 с.
8. Морозова, І. В. Вплив електрофізичної дії на протизношувальні властивості пально-мастильних матеріалів теплових двигунів [Текст] / І. В. Морозова, Ю. М. Терещенко // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 2 (71). – С. 50-55.
9. Энергоемкие горючие для авиационных ракетных двигателей [Текст] / В. И. Бакулин, Н. Ф. Дубовкин [и др.]. – М. : Физматлит, 2009. – 400 с.

10. Белоусов, В. Н. *Топливо и теория горения [Текст] / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, О. С. Смирнова. – С-Пб : С-ПГУРП, 2011. – 84 с.*

11. Погорлецкий, Д. С. *Перспективы магнитной обработки углеводородных топлив на автотранспорте [Текст] / Д. С. Погорлецкий, А. Б. Малыгин, А. В. Котыло // Научный вестник Херсонского государственного морского института. – 2013. – № 3. – С. 58–66.*

References

1. Boyko, A. V. *Hidrohazodynamika [Hydrogasdynamics]*. Kharkiv, NTU KhPI Publ., 2008. 444 p.

2. Lefevre, A. *Processy v kamere sgoraniya GTD [Processes in the combustion chamber of a gas turbine engine]*. Moscow, Mir Publ., 1989, pp. 144-145.

3. Zeldovich, Ya. B. *Okislenie azota pri gorenii [Nitrogen oxidation during combustion]*. Moscow, Ripol Classic Publ., 1984. 148 p.

4. Tereshchenko, Yu. M., Kulik, N. S., Lastivka, I. A. *Teoriya aviacionnykh trehkoturnykh turboreaktivnykh dvigatelej [Theory of aircraft three-circuit turbojet engines: monografiya]*. Kiev, Publishing House of the National Aviation University "NAU-Druk" Publ., 2010. 116 p.

5. Morozova, I. V., Morozov, V. I. *Influence on the Energy Efficiency of Hydrocarbon. Nanostructured Materials for the Detection of CBRN*, Springer Publ., 2017, pp. 319-330.

6. Abraham, A. *Yaderny mahnetizm [Nuclear magnetism]*. Moscow, Inostrannaja literatura Publ., 1963. 551 p.

7. Tereshchenko, Yu. M., Kulik, N. S., Mitrahovich, M. M. *Teoriya teplovykh dyhunyv. Hazodynamichnyy rozrakhunok elementiv hazoturbinnnykh dyhunyv [Theory of heat engines]*. Kiev, Publishing House of the National Aviation University Publ., 2015. 292 p.

8. Morozova, I. V., Tereshchenko, Yu. M. *Vplyv elektrofizychnoy diyi na protyznoshuvai'ni vlastyvyosti pal'no-mastylnykh materialiv teplovykh dyhunyv [The influence of electrophysical action on antiwear properties of fuel and lubricant materials of heat engines]*. *Problemy tertya ta znoshuvannya – Friction and wear problems*, 2016, no. 2 (71), pp. 50-55.

9. Baculin, V. I., Dubovkin, N. F. *Jenergoemkie gorjuchie dlja aviacionnykh raketnykh dvigatelej [Energy-intensive fuels for aircraft rocket engines]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 400 p.

10. Belousov, V. N., Smorodin, S. N., Smirnova, O. S. *Toplivo i teoriyahorennya [Fuel and combustion theory]*. St. Petersburg, St-PSTUPP Publ., 2011. 84 p.

11. Pogorletsky, D. S., Malygin, A. B., Kotylo, A. V. *Perspektivy magnitnoj obrabotki uglevodorodnykh topliv na avtotransporte [Prospects for magnetic processing of hydrocarbon fuels in vehicles]*. *Naukovyy visnyk Khersons'koho derzhavnoho morsk'koho instytutu – Scientific Visnik of the Kherson Sovereign Marine Institute*, 2013, no. 3, pp. 58–66.

Надійшла до редакції 24.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

IMPROVEMENT OF MIXING PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER OF THERMAL ENGINES

Iryna Morozova, Yuriy Tereshchenko, Vasyl Yehunko

This paper considers the possibilities of improving the reliability and efficiency of the aircraft engine, which are one of the main indicators of quality and require high-quality fuel. Modern gas turbine engines (GTE) are much more powerful and economical compared with those produced 50 years ago. Nevertheless, manufacturers are constantly working to improve gas turbine engines with the main emphasis on their fuel efficiency. Mechanical impurities present in the fuel can clog the fuel filters, thereby cutting off the fuel supply. The presence of resins in the fuel leads to the formation of various deposits on engine parts, and the content of sulfur, acids and alkalis increases the corrosiveness of the fuel. The completeness of combustion and the tendency of carbon formation are the main performance characteristics of hydrocarbon fuels, which are of great practical importance in improving the efficiency and service life of the engine. Currently, there are many options for improving technical and economic indicators. The proposed ways to prepare a better fuel mixture before supplying it to the engine. The preparation of aviation fuel is carried out because of the electrophysical effects on the fuel. The electrophysical effect on the fuel is determined by a magnetic installation with a sign-changing magnetic field. Studies were conducted to determine the effect of electrophysical impact on the completeness of combustion of aviation fuel and carbon formation in the combustion chamber of a gas turbine engine. The method allows to give a comparative assessment of the completeness of combustion and carbon formation of fuels for engines with a small amount of fuel consumed for testing. It has been established that under electrophysical action on aviation fuel, the fuel combustion efficiency increases by

10...12 %, carbon formation in the gas turbine engine combustion chamber decreases by 20...25 %. The positive effect on the combustion process in the previous phases decreases the afterburning phase, therefore, a decrease in the temperature of the exhaust gases, a decrease in the concentration of nitrogen oxide by 12...16 %, carbon monoxide by 0.64...0.7 % and hydrocarbon by 25...35 %. After the electrophysical impact and the fuel running time, the content of resinous compounds increased four times, the content of oxygen compounds decreased by ~23 %, and the content of sulfur compounds decreased by ~25 %.

Keywords: combustion efficiency; soot formation; turbine engine combustion chamber; electromagnetic influence; anti-wear properties; fuel.

Морозова Ірина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., проф. каф. електроніки, робототехніки та технології моніторингу та Інтернету речей, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Терещенко Юрій Матвійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Єгунько Василь Миколайович – аспірант, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Iryna Morozova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor of Dept. of electronics, robotics, monitoring technologies and internet of things, National Aviation University, Kyiv, Ukraine
e-mail: iramoro@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4238-4001, Scopus Author ID: 57202956987.

Yuriy Tereshchenko – Doctor of Technical Sciences, Head of Dept. of aviation engine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: terj@nau.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4367-3232, Scopus Author ID: 57194568327.

Vasyl Yehunko – PhD student, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: vasy_l_yehunko@nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5316-8996.