

УДК 629.7.083.03

**КУЗЬМІН С.М.**, провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник

**ГРЕНЬ В.М.**, старший науковий співробітник

**ЛЯШЕНКО В.О.**, старший науковий співробітник

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОСНОВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ГАЗІВ У ЇЇ ВИХІДНОМУ ПЕРЕРІЗІ**

*У статті приведені результати досліджень впливу основних конструктивних елементів основної камери згоряння на її температурне поле*

*Ключові слова: основна камера згоряння, газотурбінний двигун, температурне поле*

З'ясування зв'язків конструктивного виконання основної камери згоряння (ОКЗ) авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) з її вихідними параметрами дає важливу інформацію при проектуванні, модернізації, ремонті та експлуатації елементів двигуна. ОКЗ ГТД відноситься до складних і відповідальних вузлів, від ступеня досконалості якої залежать основні характеристики двигуна та його надійність і ресурс. Вона є одним із основних вузлів ГТД, який значною мірою впливає на економічність, надійність, довговічність двигуна в цілому.

Аналіз фізики процесів, які відбуваються в ОКЗ, вичерпно глибоке їх розуміння допомагають більш достовірно та повно з'ясувати причини виникнення та розвитку негативних явищ в роботі ОКЗ, сутність появи різномірних несправностей, прогнозувати їх появу та своєчасно приймати ефективні запобіжні заходи.

Головне призначення ОКЗ – перетворення хімічної енергії палива в теплову та підведенню її до повітря, в результаті чого температура газів збільшується. Умовно робочий процес в ОКЗ можливо розподілити на декілька елементарних процесів: сумішоутворення, розпалювання, горіння паливо-повітряної суміші, стабілізація полум'я, змішування продуктів згоряння з вторинним повітрям, охолодження повітрям гарячих стінок жарової труби. Максимальна нерівномірність поля температури газу  $\theta^{max}$  характеризується відношенням різниці найбільшої температури в даній точці поля  $T_{Г^{*}max}^{*}$  і середньої температури газу  $T_{Г}^{*}$  до різниці середньої температури газу і температури повітря за компресором  $T_{К}^{*}$

$$\theta^{max} = \frac{T_{Г^{*}max}^{*} - T_{Г}^{*}}{T_{Г}^{*} - T_{К}^{*}}$$

Радіальна еюра середньої відносної температури газу визначається залежністю  $\theta_i = f(\bar{n})$ , де  $\theta_i$  – середня відносна температура газу на  $i$ -му радіусі

вихідного перетину камери згоряння;  $\bar{h} = \frac{h_i}{h}$  – відносна висота по  $i$ -му радіусу;  $h$  – висота вихідного перетину ОКЗ.

$$\theta_i = \frac{T_{\Gamma i}^* - T_K^*}{T_{\Gamma}^* - T_K^*},$$

де  $T_{\Gamma i}^*$  – середня температура газу на  $i$ -му радіусі.

За умовами забезпечення міцності турбіни радіальна еюра відносної середньої температури газу (рис. 1) зазвичай задається такою, щоб максимальне значення  $\theta_i^{max} = 1,1 \pm 0,05$  знаходилося на відносній висоті вихідного перерізу камери згоряння  $\bar{h} = 0,6 \dots 0,75$ . До кореневого і периферійного перерізу температура зменшується до  $\theta_i = 0,85 \dots 0,9$  [1];

При всьому різноманітті конструктивних відмінностей, ОКЗ ГТД мають загальні основні вузли і елементи. Об'єм жарової труби можна умовно розділити на три частини: первинну зону горіння, проміжну зону і зону змішування. У первинній зоні горіння мають бути забезпечені умови для стабілізації полум'я по часу перебування паливо-повітряної суміші, температури продуктів згоряння та інтенсивності турбулентності потоку. Ці вимоги забезпечують високу повноту згоряння палива.

Проміжна зона призначена для завершення процесу згоряння палива. Вона є продовженням первинної зони горіння і дозволяє збільшити час перебування газів при високій температурі. Регламентоване підведення повітря в зону горіння по довжині жарової труби запобігає передчасному охолодженню газу і уповільненню хімічних реакцій, що забезпечує отримання максимальної повноти згоряння палива.

Надлишкове повітря, яке не бере участь у горінні палива і охолодженні стінок, подається в зону змішування жарової труби. У зоні змішування остаточно формується середня температура газу на вході в турбіну, радіальна еюра і температурна нерівномірність у вихідному перерізі камери згоряння.

У зону змішування повітря підводиться через один або декілька рядів отворів в стінках жарової труби.

Розміри і форма отворів оптимізуються по глибині проникнення струменів і ефективності їх змішування з основним потоком газу. На рис. 2 показано вплив підведення повітря в жарову трубу на характеристику поля температури газу.

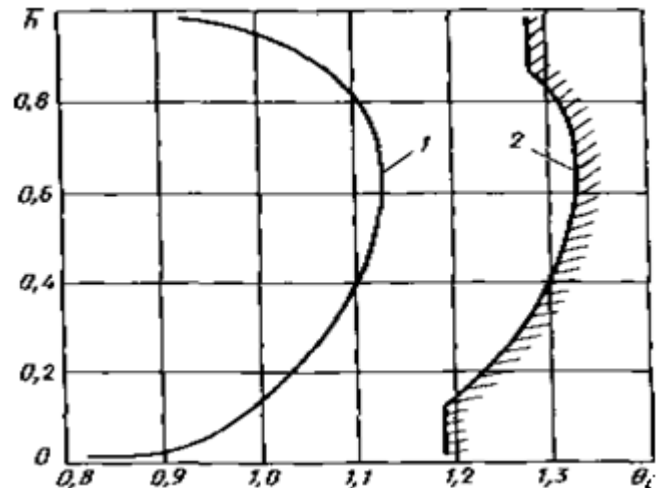


Рис. 1. Радіальна еюра температури газу: 1 – відносна середня температура; 2 – максимальна відносна температура (гранично допустима за умовами міцності турбіни)

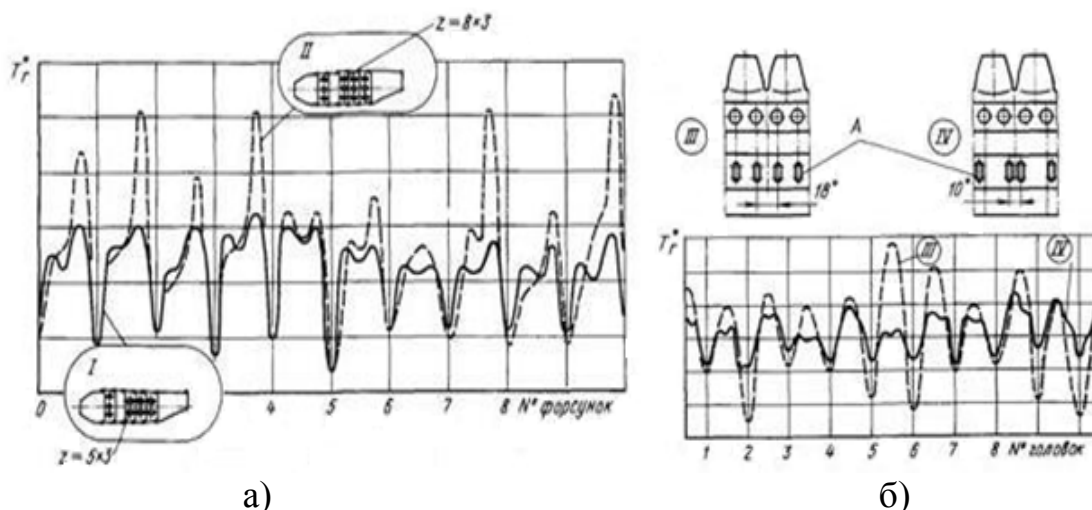


Рис. 2. Вплив підведення повітря в жарову трубу на поле температури газу на виході з ОКЗ:

а) – трубчасто-кільцева камера згоряння з 10-ма жаровими трубами (варіант I – три секції з 5-ма отворами в кожній ( $z = 5 \times 3$ ), варіант II – три секції з 8-ма отворами в кожній ( $z = 8 \times 3$ ), загальна площа отворів незмінна); б) – кільцева камера згоряння з 10-ма головками (варіант III – двадцять отворів А рівномірно розташовані по колу, варіант IV – двадцять отворів А з парним розташуванням отворів, загальна площа отворів незмінна)

Як показують дослідження [2], збільшення кількості отворів (рис. 2а) в секціях зони змішування жарової труби та оптимізація їх кутового положення (рис. 2б), при незмінній сумарній площі отворів, через які підводиться повітря для охолодження в цю зону, призводить до різкого зменшення рівня температурної нерівномірності газу у вихідному перерізі ОКЗ.

Крім того, зміна аеродинамічної структури течії і складу паливно-повітряної суміші в первинній зоні суттєво впливає на рівень нерівномірності температурного поля в перерізі жарової труби ОКЗ. Завдяки цьому з'являється реальна можливість впливати на рівень нерівномірності вихідного температурного поля за допомогою режиму роботи первинної зони ОКЗ, що можна використовувати як при доведенні і удосконаленні існуючих ОКЗ, так і при створенні нових.

Формування рівномірного газового потоку в ОКЗ залежить від організації робочого процесу в зоні горіння, а саме від відстані між форсунками, рівномірності розподілу палива і повітря за об'ємом жарової труби і завершеності процесу горіння в первинній зоні. Однією з причин збільшення рівня нерівномірності поля температур на виході з ОКЗ є неоднаковий розподіл палива по форсунках. Підтвердженням цього служить залежність рівня максимальної колової  $\theta_{\varphi}^{max}$  та максимальної радіальної  $\theta_r^{max}$  нерівномірності поля температур від початкової нерівномірності розподілу палива  $K_T$ , отриманих в результаті узагальнення експериментальних даних (рис. 3) [3].

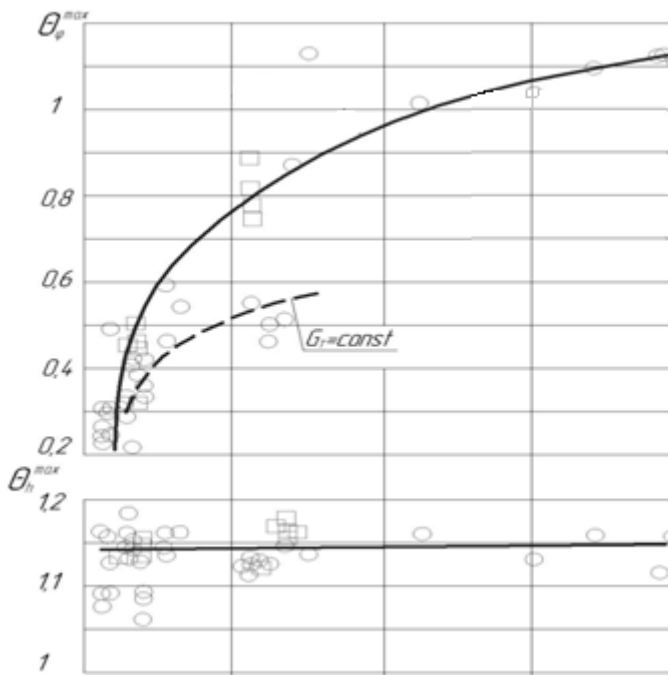


Рис.3. Вплив початкової нерівномірності розподілу палива по форсунках на характеристики вихідного поля температури газу ОКЗ

За мірою впливу зміни площі прохідних перетинів фронтального пристрою  $\bar{F}_{\text{ФР}}$ , зовнішнього  $\bar{F}_{\text{ЗМ}}^{\text{З}}$  і внутрішнього  $\bar{F}_{\text{ЗМ}}^{\text{ВН}}$  змішувачів (рис. 4) на вихідне поле температури та розподіл повітря по кільцевих каналах ОКЗ їх можна розташувати в наступному порядку: фронтальний пристрій, зовнішній змішувач, внутрішній змішувач [3].

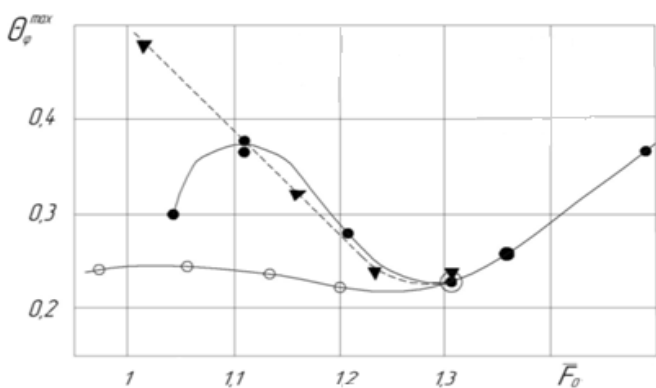


Рис. 4. Залежність впливу зміни прохідних перетинів фронтального пристрою та змішувачів на рівень колової нерівномірності поля температур

чого на струменях вторинного повітря відбувається догорання паливо-повітряної суміші, тобто змішувач формує вихідне поле температури газів догоранням паливо-повітряної суміші, що не згоріла в первинній зоні. Зміна розподілу повітря по

$$K_T = (q_{T \max} - q_{T \min}) / q_{T \text{ ср}} ,$$

де  $q_T$  – витрати палива через форсунки.

Значною мірою на формування максимальної колової нерівномірності ОКЗ ГТД впливає зона ( $\theta_{\phi}^{\max} = 0,2 \dots 0,5$ ), в якій при невеликій зміні  $K_T = 0,2 \dots 0,32$  рівень максимальної нерівномірності вихідного поля температур  $\theta_{\phi}^{\max}$  змінюється приблизно в 2,5 рази, що пояснюється незавершеністю процесу в зоні горіння і догоранням паливо-повітряної суміші на струменях змішувача. Крім того на характеристики поля температури газу на виході з ОКЗ значний вплив здійснює глибина проникнення струменів вторинного повітря.

- $\Delta$  —  $\bar{F}_{\text{ФР}}$
- $\bullet$  —  $\bar{F}_{\text{ЗМ}}^{\text{З}}$
- $\circ$  —  $\bar{F}_{\text{ЗМ}}^{\text{ВН}}$

Зміна площі прохідного перетину фронтального пристрою найбільше впливає на рівень колової і практично не впливає на максимальний рівень радіальної нерівномірності температурного поля. Це є прямим наслідком незавершеності процесу горіння в первинній зоні, внаслідок

змішувачах ( $\bar{F}_0 = \Sigma F_0 / F_K$ , де  $F_0$  - площа отвору;  $F_K$  – площа вихідного перерізу за компресором ГТД) призводить до зміни рівня максимальної нерівномірності вихідного поля температур  $\theta_{\varphi}^{max}$  та  $\theta_h^{max}$ , що, в свою чергу, призводить до зниження рівня повноти згоряння і відкладенню нагару на внутрішній стінці жарової труби. Як показують результати дослідження [3], мінімальному рівню колової і радіальної нерівномірності відповідає область приблизно рівних витрат через змішувачі. Оскільки зовнішня обичайка жарової труби знаходиться під надлишковим перепадом тиску, то можна передбачити, що будь-які нерівномірності потоку на виході з дифузора здійснюють вплив на характеристики температурного поля газу в коловому напрямі. Мінімальне значення  $\theta_{\varphi}^{max}$  досягається при реалізації шахового розташування струменів першого ряду і зовнішнього змішувача, що сприяє інтенсивнішому перемішуванню і вирівнюванню характеристик поля температури газу в коловому напрямку. Зміна геометричних розмірів змішувачів жарової труби найбільше впливає на рівень радіальної нерівномірності температурного поля на виході з ОКЗ.

Аналіз полів температур ряду двигунів, показав, що нерівномірність колового поля температур на виході ОКЗ ГТД доходить до  $\pm 200^\circ\text{C}$  від середньої температури. Існуюча нерівномірність поля температур в коловому напрямі ставить соплові лопатки турбін в неоднакові теплові умови роботи і одночасно підсилює динамічне навантаження на робочі лопатки турбін.

Таким чином, основними причинами нерівномірності колового поля температур на виході ОКЗ ГТД є:

- нерівномірний розподіл повітря за об'ємом камери згоряння;
- неоднакові умови теплообміну між потоком газу і елементами проточної частини двигуна;
- відмінність витратних характеристик окремих форсунок;
- зміна геометричних форм стінок жарової труби в процесі експлуатації двигуна, внаслідок чого порушуються початковий розподіл вторинного повітря і умови теплообміну між потоком газу і стінками ОКЗ.

На практиці знання зв'язків конструктивного виконання ОКЗ ГТД з її вихідними параметрами знайшло свою реалізацію в обґрунтуванні відміни обов'язкових "вогневих" випробувань ОКЗ двигуна АЛ-31Ф на державному підприємстві "Луцький ремонтний завод "Мотор".

## ЛІТЕРАТУРА

1. Вьюнов С.А., Гусев Ю.А. та ін. "Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей". М. Машиностроение. 1989. -565 с.
2. Сенюшкин Н.С., Харитонов В.Ф. "Двухуровневая система моделирования камер ВРД". Авиационная техника: Известия вузов. 2010. № 4. С. 76 ... 78.
3. Гребенюк Г.П., Кузнецов С.Ю., Харитонов В.Ф. "Исследование температурного поля на выходе камеры сгорания". Вестник СГАУ. 2006. № 1(9).- С. 48 ... 53.

*Надійшла до редакції 15.10.2013.*