

УДК 621.438

Березовский Е. К. аспирант кафедры технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД С ШИРОКОХОРДНЫМИ РАБОЧИМИ ЛОПАТКАМИ

Цель работы. Оценка степени влияния широкохордных рабочих лопаток на эксплуатационные характеристики вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД).

Методы исследования. Сравнительные экспериментальные стендовые испытания ТРДД с различными типами вентиляторов.

Полученные результаты. Получены экспериментальные зависимости приведенного расхода воздуха через двигатель и степени повышения полного давления в наружном контуре от приведенной частоты вращения ротора вентилятора при испытаниях турбореактивного двухконтурного двигателя с серийным и модифицированным вентилятором.

Показано, что в диапазоне изменения частот вращения ротора вентилятора до ~ 5200 об/мин модифицированный вентилятор обеспечивает требования технических условий на его проектирование по расходу воздуха через двигатель и по степени повышения полного давления в наружном контуре и тем самым обеспечивает существенное повышение этих параметров над аналогичными параметрами серийного вентилятора при одинаковых частотах его вращения.

Установлено, что при частотах вращения ротора вентилятора 4000 и 5200 об/мин замена в двигателе серийного вентилятора на модифицированный с широкохордными рабочими лопатками приводит к повышению расхода воздуха через двигатель на 9,511,4% и повышению степени полного давления на 1,65,3 % при сопле $F_{c2} = 1,1 F_{c2ном}$. При использовании в двигателе сопла $F_{c2} = 1,05 F_{c2ном}$ при указанной приведенной частоте вращения прирост расхода воздуха составляет 810,5%, а степени повышения полного давления до 2,47,3%.

КПД модифицированного вентилятора более чем на 7% превышает КПД вентилятора с рабочими лопатками с антивибрационными полками.

Научная новизна. Установлена степень влияния широкохордных рабочих лопаток на эксплуатационные характеристики вентилятора ТРДД отечественного производства.

Практическая ценность. На основе полученных результатов возможно создание в авиадвигателестроении Украины ТРДД нового поколения с высокими эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: вентилятор; широкохордные рабочие лопатки; эксплуатационные характеристики; турбореактивный двухконтурный двигатель; расход воздуха; полное давление; коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Турбореактивные двухконтурные двигатели содержат вентиляторы, которые являются частью компрессора по внутреннему тракту и основной частью компрессора по сжатию воздуха для наружного контура. Вентиляторы ТРДД выполняются одноступенчатыми. Развитие конструкции титановых рабочих лопаток вентилятора происходит по двум направлениям: использование лопаток малого удлинения или применение широкохордных профилей. Лопатки с отношением высоты к хорде менее 2 называют широкохордными.

Применение широкохордных рабочих лопаток позволяет:

- получать меньшую плотность решетки ступени вентилятора с меньшим числом лопаток;
- уменьшить потери, связанные с аэродинамическими следами от антивибрационных полок;

- обеспечить максимальный расход воздуха на единицу площади и свести к минимуму габариты двигателя;

- снизить уровень шума вентилятора;
- уменьшить массу.

На авиадвигателях пятого поколения фирм «Снема» и «Дженерал Электрик» применяют широкохордные рабочие лопатки вентилятора, что позволило повысить газодинамическую эффективность вентилятора до 6%, снизить удельный расход топлива на крейсерском режиме до 4%, увеличить расход воздуха через вентилятор и др. [1].

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Все авиадвигателестроительные фирмы мира заняты поиском оптимальной конструкции и технологии создания лопатки вентилятора для перспективных ТРДД [1–4].

Основными направлениями исследований являются: создание оптимальной конструкции сплошной лопатки из титанового сплава, полый конструкции и из композиционного материала. Указанные исследования в авиадвигательных фирмах находятся на различных стадиях освоения и внедрения.

Конструкции широкохордной рабочей лопатки и лопатки с антивибрационными полками представлены на рис. 1.



Рисунок 1. Сравнение широкохордной и полочной лопаток вентилятора [1]

Цель работы – оценка степени влияния широкохордных рабочих лопаток на эксплуатационные характеристики вентилятора ТРДД.

Объект исследований – ТРДД с различными типами вентиляторов: с широкохордными рабочими лопатками и рабочими лопатками с антивибрационными полками.

Методы исследования – сравнительные стендовые экспериментальные испытания ТРДД с различными типами вентиляторов.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение экспериментальных зависимостей приведенного расхода воздуха через двигатель и степени повышения полного давления в наружном контуре от приведенной частоты вращения вентилятора, полученных в испытаниях двигателя Д-36 с модифицированным и серийным вентиляторами, приведено на рис. 2. На этом рисунке нанесены также возле зависимостей $G_{\Sigma np}(n_{np})$ земная линия рабочих режимов, заданная в технических условиях на проектирование модифицированного вентилятора, и возле зависимостей $\pi_{\text{вдл}}^*(n_{np})$ зависимость заданных в этих технических условиях значений вдоль этой линии рабочих режимов.

Из рассмотрения рис. 2 следует, что в диапазоне изменения частот вращения вентилятора до ~5200 об/мин модифицированный вентилятор обеспечивает требования технических условий на его проектирование по расходу воздуха через

двигатель и по степени повышения полного давления в наружном контуре и тем самым обеспечивает существенное превышение этих параметров над аналогичными параметрами серийного вентилятора при одинаковых частотах вращения вентилятора. Например, при частотах вращения вентилятора 4000 и 5200 об/мин замена в двигателе серийного вентилятора на модифицированный приводит к повышению расхода воздуха через двигатель соответственно от 200 до 219 кг/с (на 9,5 %) и от 262 до 292 кг/с (на 11,4%) и к повышению величины $\pi_{\text{вдл}}^*$ соответственно от 1,203 до 1,223 (на 1,6%) и от 1,359 до 1,432 (на 5,3%) при сопле $F_{c2} = 1,1 F_{c2\text{ном}}$. При использовании модифицированного вентилятора с соплом $F_{c2} = 1,05 F_{c2\text{ном}}$ при этих же значениях приведенной частоты вращения соответствующие приросты расхода воздуха 8 и 10,5%, а степени повышения полного давления 2,4 и 7,3%.

Вследствие того, что модифицированный вентилятор обеспечивает превышение расхода воздуха через двигатель и степени повышения полного давления в наружном контуре по сравнению с этими параметрами серийного вентилятора, обеспечивается и полученный в испытаниях прирост тяги двигателя, собранного с модифицированным вентилятором, по сравнению с тягой двигателя, собранного с серийным вентилятором.

На рис. 3 и 4 представлены изменения приведенного расхода воздуха через двигатель и степени повышения полного давления в наружном контуре при изменении приведенного расхода подаваемого в двигатель топлива, полученных в испытаниях двигателя Д-36 с модифицированным и серийным вентиляторами.

Из этих рисунков видно, что в диапазоне изменения расхода топлива от 1200 до 2500 кг/час подача в двигатель с модифицированным вентилятором расхода топлива, одинакового с расходом топлива, подаваемым в двигатель с серийным вентилятором, приводит как к увеличению степени повышения полного давления в наружном контуре, так и к увеличению расхода воздуха через двигатель с модифицированным вентилятором по сравнению с подобными параметрами двигателя с серийным вентилятором. Так, при расходе топлива 2500 кг/час замена модифицированного вентилятора с соплом $F_{c2} = 1,1 F_{c2\text{ном}}$ на серийный с соплом $F_{c2} = F_{c2\text{ном}}$ приводит к увеличению расхода воздуха через двигатель от 254 до 262 кг/с (на 3,1%) и к повышению величины $\pi_{\text{вдл}}^*$ от 1,382 до 1,402 (на 1,4 %), а с модифицированным вентилятором и соплом $F_{c2} = 1,05 F_{c2\text{ном}}$ приросты аналогичных величин составляют 9 и 2%, что подтверждают исследования [5].

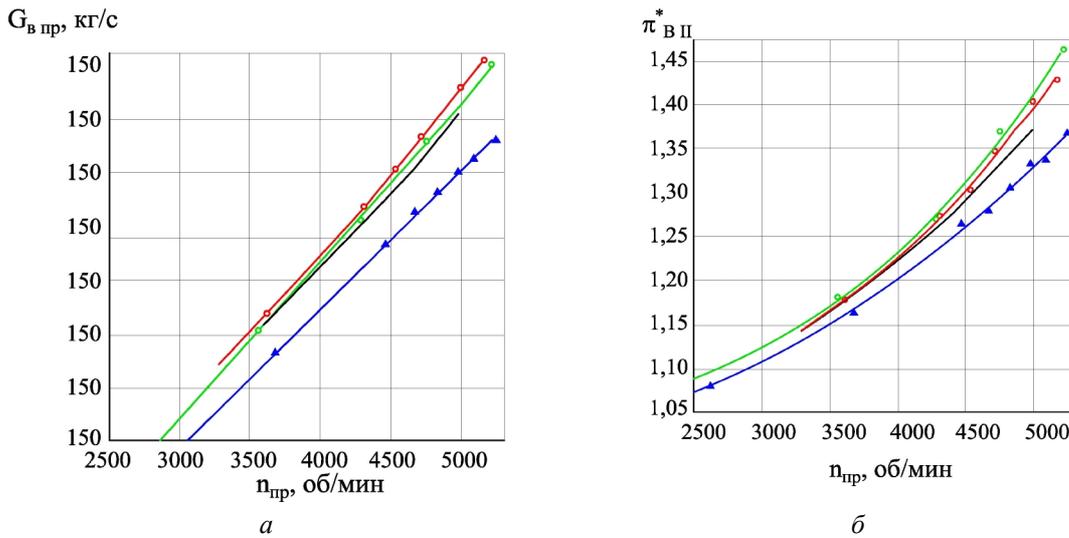


Рисунок 2. Сравнение экспериментально полученных зависимостей расхода воздуха $G_{впр}$ (а) и степени повышения полного давления $\pi_{вII}^*$ (б) серийного и широкохордного вентиляторов от приведенной частоты вращения ротора $n_{пр}$:

- серийный вентилятор $F_c = 1,00 F_{c\text{ ном}}$
- широкохордный вентилятор $F_c = 1,05 F_{c\text{ ном}}$
- широкохордный вентилятор $F_c = 1,10 F_{c\text{ ном}}$
- тех. требования

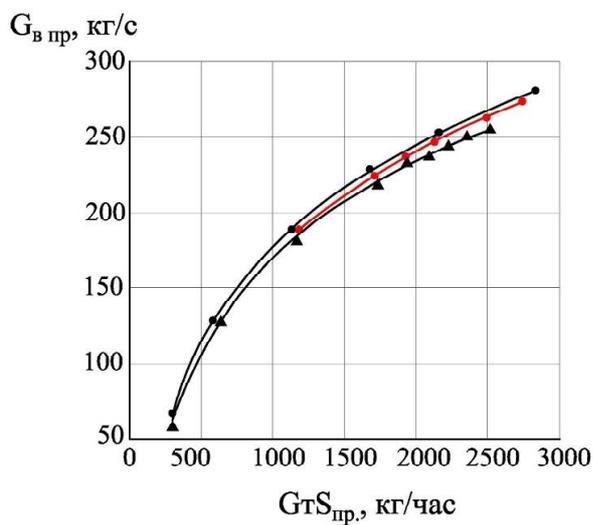


Рисунок 3. Изменение приведенного суммарного расхода воздуха от приведенного расхода топлива:

- Δ – серийный вентилятор $F_c = 1,00 F_{c\text{ ном}}$
- \circ – широкохордный вентилятор $F_c = 1,10 F_{c\text{ ном}}$
- \circ – широкохордный вентилятор $F_c = 1,05 F_{c\text{ ном}}$

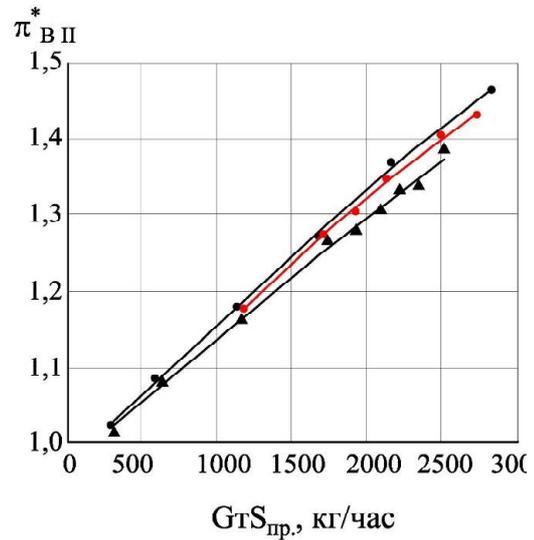


Рисунок 4. Изменение степени повышения полного давления в наружном контуре вентилятора от приведенного расхода топлива:

- Δ – серийный вентилятор $F_c = 1,0 F_{c\text{ ном}}$
- \circ – широкохордный вентилятор $F_c = 1,1 F_{c\text{ ном}}$
- \circ – широкохордный вентилятор $F_c = 1,05 F_{c\text{ ном}}$

Увеличение при одинаковых расходах топлива значений $G_{\Sigma пр}$ и $\pi_{\text{вЛ}}^*$ для двигателя с модифицированным вентилятором по сравнению с аналогичными значениями для серийного двигателя может быть следствием только того, что КПД модифицированного вентилятора превышает КПД серийного вентилятора (более, чем на 7%).

ВЫВОДЫ

Сравнение характеристик серийного и модифицированного вентиляторов с широкохордными рабочими лопатками показало, что при одинаковых значениях приведенной частоты вращения модифицированный вентилятор обеспечивает прирост расхода воздуха на 8 и 10%, а степень повышения полного давления – 2,4 и 7,3% соответственно для сопла $F_c = 1,1 F_{c \text{ ном}}$ и $F_c = 1,05 F_{c \text{ ном}}$.

КПД модифицированного более чем на 7% превышает КПД серийного вентилятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Том. 2. /

А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – М. : Машиностроение, 2007. – 396 с.

- [2]. Перспективная технология изготовления полой широкохордной лопатки вентилятора. / А. А. Иноземцев, Р. Р. Мулюков, В. В. Сафиуллин и др. // Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края. Сб. статей. / Под. общ. редакцией академика В. Н. Анциферова. – Пермь: Пермский ЦНТИ. – 2009. – С. 61–65.
- [3]. Михалкин А. А. Рабочие лопатки вентилятора перспективных ТРДД / А. А. Михалкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 9 (106). – С. 97–100.
- [4]. Новиков А. С. Рабочие лопатки вентиляторов большой степени двухконтурности для перспективных ТРДД / А. С. Новиков, Т. Д. Каримбаев // Двигатель. – 2015. – №5 (101). – С. 6–11.
- [5]. Михалкин А. А. Экспериментальное определение эффективности широкохордного вентилятора / А. А. Михалкин, А. В. Бунчук, Ф. Г. Сорогин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 15–77.

Статья поступила в редакцию 13.04.2018

Березовський Є. К. аспірант кафедри технології авіаційних двигунів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД З ШИРОКОХОРДНИМИ РОБОЧИМИ ЛОПАТКАМИ

Мета роботи. Оцінювання ступеня впливу широкохордних робочих лопаток на експлуатаційні характеристики вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД).

Методи дослідження. Порівняльні експериментальні стендові випробування ТРДД з різними типами вентиляторів.

Отримані результати. Отримано експериментальні залежності наведеної витрати повітря через двигун і ступені підвищення повного тиску в зовнішньому контурі від наведеної частоти обертання ротора вентилятора при випробуваннях турбореактивного двоконтурного двигуна із серійним і модифікованим вентилятором.

Показано, що в діапазоні зміни частот обертання ротора вентилятора до ~5200 об/хв модифікований вентилятор забезпечує вимоги технічних умов на його проектування за витратою повітря через двигун і за ступенем підвищення повного тиску в зовнішньому контурі і тим самим забезпечує істотне підвищення цих параметрів над аналогічними параметрами серійного вентилятора при однакових частотах його обертання.

Встановлено, що при частотах обертання ротора вентилятора 4000 і 5200 об/хв заміна у двигуні серійного вентилятора на модифікований з широкохордними робочими лопатками приводить до підвищення витрати повітря через двигун на 9,511,4 % і підвищення ступеня повного тиску на 1,65,3% при соплі $F_{c2} = 1,1 F_{c2 \text{ ном}}$. При використанні у двигуні сопла $F_{c2} = 1,05 F_{c2 \text{ ном}}$ при зазначеній наведеній частоті обертання приріст витрати повітря становить 810,5%, а ступеня підвищення повного тиску до 2,4...7,3%. ККД модифікованого вентилятора більш ніж на 7% перевищує ККД вентилятора з робочими лопатками з антивібраційними полицями.

Наукова новизна. Встановлено ступінь впливу широкохордних робочих лопаток на експлуатаційні характеристики вентилятора ТРДД вітчизняного виробництва.

Практична цінність. На основі отриманих результатів можливе створення в авіадвигунобудуванні України ТРДД нового покоління з високими експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: вентилятор; широкохордні робочі лопатки; експлуатаційні характеристики; турбореактивний двоконтурний двигун; витрата повітря; повний тиск; коефіцієнт корисної дії.

Berezovsky Ye. K. Ph.D. candidate, Department of Aircraft Engine Technology, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: opt.ugt@motorsich.com

IMPROVEMENT OF WIDE-CHORD ROTOR BLADE FAN PERFORMANCE IN BYPASS TURBOJET ENGINE

Purpose. Evaluation of wide-chord rotor blade influence on fan performance in bypass turbojet engine.

Technique. Comparative experimental bench tests of bypass turbojet engine equipped with different fan types.

Obtained results. Testing of the bypass turbojet engine with standard and upgraded fan has revealed experimental dependences of the engine specific air flow and the bypass duct total pressure ratio on the fan rotor specific speed.

We have demonstrated that within the fan rotor speed range up to ~ 5200 rpm, the upgraded fan complies with Design Specifications on the engine air flow and the bypass duct total pressure ratio. Thus, it provides for substantial increase of these parameters as compared to similar parameters of standard fan at the same rotation speeds.

We have determined that at the fan rotor rotation speeds of 4000 and 5200 rpm, replacement of the engine standard fan with the upgraded one featuring wide-chord rotor blades results in the engine air flow increase by 9,5 to 11,4% and the total pressure ratio increase by 1,6 to 5,3% at nozzle $F_{c2} = 1,1 F_{c2nom}$. If the engine nozzle $F_{c2} = 1,05 F_{c2nom}$ is applicable at the indicated specific speed, the air flow is increased by 8 to 10,5%, and the total pressure is increased by 2,4 to 7,3%.

The upgraded fan efficiency coefficient exceeds the efficiency coefficient of the fan featuring rotor blades with antivibration platforms by more than 7%.

Scientific novelty. It is evaluated influence of wide-chord rotor blades on fan performance in Ukrainian-made bypass turbojet engine.

Practical importance. Based on the obtained results it is possible to build a new generation of Ukrainian-made high-performance bypass turbojet engines.

Keywords: fan, wide-chord rotor blades; performance; bypass turbojet engine; air flow; total pressure; efficiency coefficient.

REFERENCES

- [1]. Inozemtsev A. A., Nikhamkin M. A., Sandratskiy V.L. (2007). Gazoturbinnye dvigateli. Osnovy konstruirovaniya aviacionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. Tom. 2.: M.: Mashinostroenie, 396.
- [2]. Inozemcev A. A., Mulyukov V. V., Safiullin R. R. (2009). Perspektivnaya tekhnologiya izgotovleniya poloy shirokokhordnoy lopatki ventilyatora. nanoteknologii i nanomaterialy permskogo kraya. sb. statej.: Perm: Permskiy CNTI, 61–65.
- [3]. Mikhalkin A.A. (2013). Rabochie lopatki ventilyatora perspektivnykh TRDD. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 9(106), 97–100.
- [4]. Novikov A. S., Karimbaev T. D. (2015). Rabochie lopatki ventilyatorov bolshoj stepeni dvukhkturnosti dlya perspektivnykh TRDD. Dvigatel, 5(101), 6–11.
- [5]. Mikhalkin A. A., Bunchuk A. V., Sorogin F. G. (2011). Eksperimentalnoe predelenie effektivnosti shirokokhordnogo ventilyatora. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 10(87), 15–77.