

УДК 629.735

О. В. КИСЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РЕЖИМА РАБОТЫ СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ КОНВЕРТИРОВАННОГО ГТД

Рассмотрены особенности выбора режима работы свободной турбины наземного ГТД, полученного конвертированием ТРДД путем исключения вентилятора. Показана зависимость режима работы свободной турбины конвертированного наземного ГТД от расчетной степени повышения давления вентилятора ТРДД. Оценена величина увеличения площади проходного сечения выходного устройства, необходимая для реализации режима перерасширения свободной турбины, и ее влияние на степень понижения давления свободной турбины. Показано, что при малых расчетных степенях повышения давления вентилятора ТРДД степень понижения давления свободной турбины выше расчетной, а при увеличении расчетной степени повышения давления вентилятора ТРДД она уменьшается и становится меньше расчетной. Выполнен анализ изменения приведенной окружной скорости свободной турбины конвертированного наземного ГТД и показаны пути повышения КПД турбины.

Ключевые слова: ТРДД, вентилятор, свободная турбина, степень понижения давления турбины, приведенная окружная скорость, КПД турбины.

Введение

Наземные ГТД часто получают конвертированием авиационных ТРДД путем исключения вентилятора при сохранении базового газогенератора (ГГ) [1-3]. В качестве свободной турбины может использоваться либо турбина вентилятора ТРДД, либо турбина, специально спроектированная для наземного ГТД. Эта схема конвертации показана на рис.1.

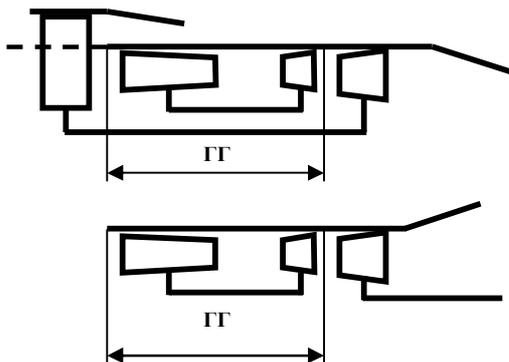


Рис. 1. Схема конвертации ТРДД в наземный турбовальный ГТД со свободной турбиной

В работе [4] рассмотрен вопрос выбора режима работы газогенератора конвертированного наземного турбовального ГТД со свободной турбиной.

Однако при удалении вентилятора изменяется не только режим работы газогенератора, но и режим работы свободной турбины. Отклонение режима работы свободной турбины от расчетного обуслов-

лено двумя причинами: изменением степени понижения давления свободной турбины $\pi_{тс}^*$ и приве-

денной окружной скорости $\lambda_{ц} \sim \frac{u_{тс}}{\sqrt{T_{тс}^*}}$. Изменение

$\pi_{тс}^*$ связано с исключением вентилятора и заменой выходного устройства в виде сопла на выходное устройство в виде диффузора, а изменение $\lambda_{ц}$ – либо с изменением частоты вращения ротора свободной турбины, либо с изменением полной температуры потока на входе в свободную турбину $T_{тс}^*$.

Изменение режима работы свободной турбины приводит к изменению ее КПД $\eta_{тс}^*$ и мощности $N_{тс}$.

В связи с этим, актуален вопрос оценки отклонения режима работы свободной турбины конвертированного ГТД от расчетного режима работы турбины вентилятора ТРДД и выбора режима работы свободной турбины.

Целью данной работы является обоснование режима работы свободной турбины конвертированного ГТД и оценка возможностей повышения ее КПД.

1. Расчетные соотношения

Степень понижения давления в свободной турбине $\pi_{тс}^*$ на докритических режимах работы выходного устройства зависит от степени понижения давления выходного устройства π_c , так как

$$\pi_{тс}^* = \left[\frac{\sigma_c F_c q(\lambda_c)}{\sigma_{сатс} F_{сатс} q(\lambda_{сатс})} \right]^{\frac{2n}{n+1}}, \quad (1)$$

$$q(\lambda_c) = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - P(\lambda_c) \frac{k-1}{k} \right]} P(\lambda_c)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (2)$$

$$P(\lambda_c) = \frac{p_c}{p_c^*} = \frac{p_n}{p_c^*} = \frac{1}{\pi_{тс} \cdot \sigma_c}. \quad (3)$$

Из анализа формул (1)...(3) следует, что при неизменной геометрии проточной части увеличение π_c приводит к возрастанию $\pi_{тс}^*$ и общей степени понижения давления в свободной турбине и выходном устройстве $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$.

В конвертированном ГТД при удалении вентилятора и сохранении режима работы газогенератора [4] общая степень понижения давления в свободной турбине и выходном устройстве $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$ уменьшается по сравнению с общей степенью понижения давления в турбине вентилятора и сопле внутреннего контура ТРДД $\pi_{тв}^* \cdot \pi_{с1}$, поскольку

$$\pi_{тв}^* \cdot \pi_{с1} = \sigma_{вх} \pi_{тв}^* \pi_{гт}^* \quad (4)$$

$$\pi_{тс}^* \cdot \pi_c = \sigma_{вх} \pi_{гт}^*. \quad (5)$$

Следовательно, при сохранении геометрии проточной части, величины степеней понижения давления в свободной турбине и в выходном устройстве, а также приведенная скорость истечения из сопла уменьшаются по сравнению с ТРДД.

Для обеспечения неизменности режима работы газогенератора необходимо обеспечить сохранение расчетной величины приведенной частоты вращения ротора газогенератора $\bar{n}_{ггпр} = 1$ и степени понижения давления турбины газогенератора $\pi_{гг}^*$ [3].

При использовании в качестве свободной турбины ГТД турбины вентилятора ТРДД условие $\pi_{гг}^* = idem$ выполняется само собой вследствие таких же, как в ТРДД, площадей горла сопловых аппаратов первых ступеней турбины газогенератора и свободной турбины.

Для поддержания $\bar{n}_{ггпр} = 1$ требуется уменьшение частоты вращения ротора газогенератора, поскольку при исключении вентилятора уменьшается температура воздуха перед газогенератором. Величины степени уменьшения температуры и относительной частоты вращения ротора газогенератора зависят от расчетных значений степени повышения полного давления $\pi_{вр}^*$ и КПД $\eta_{вр}^*$ вентилятора:

$$\bar{n}_{гг}^* = \frac{T_{вр}^*}{T_{ввдр}^*} = f(\pi_{вр}^*) = \left(1 + \frac{\pi_{вр}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{вр}^*} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$\bar{n}_{гг} = \sqrt{\frac{T_{вр}^*}{T_{ввдр}^*}} = \left(1 + \frac{\pi_{вр}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{вр}^*} \right)^{-0,5}. \quad (7)$$

Для анализа изменения приведенной окружной скорости $\lambda_u \sim \frac{u_{тс}}{\sqrt{T_{тк}^*}}$ необходимо знать, как изменяется при конвертации ТРДД температура перед свободной турбиной $T_{тк}^*$.

При сохранении расчетного режима работы газогенератора [3,4] $T_{тк}^*$ изменяется пропорционально температуре потока перед газогенератором, так как $\tau_{гт}^* = idem$, а

$$T_{ткр}^* = T_{вр}^* \cdot \tau_{ггпр}^* = T_{ввдр}^* \cdot \bar{n}_{гг}^* \cdot \tau_{ггпр}^*, \quad (8)$$

где $\tau_{ггпр}^* = \frac{T_{гвдр}^*}{T_{ввдр}^*}$ - степень повышения температуры в газогенераторе на расчетном режиме.

2. Анализ полученных результатов

На рис. 2 представлены зависимости, характеризующие уменьшение температуры потока перед газогенератором и потребное уменьшение частоты вращения газогенератора для обеспечения условия $\bar{n}_{ггпр} = 1$, вычисленные по формулам (6) и (7).

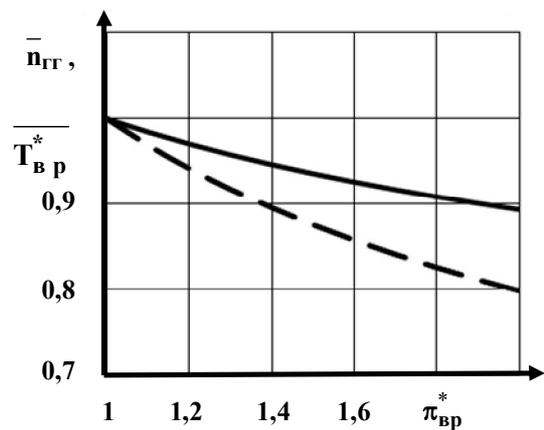


Рис. 2. Зависимости $T_{вр}^*$ и $\bar{n}_{гг}$ конвертированного наземного ГТД от $\pi_{вр}^*$:
 --- $T_{вр}^*$; — $\bar{n}_{гг}$

Из формулы (5) следует, что при расчетном режиме газогенератора общая степень понижения давления в свободной турбине и выходном устройстве $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$ также зависит от $\pi_{вр}^*$. Причем, при одинаковых параметрах цикла во внутреннем контуре ТРДД увеличение $\pi_{вр}^*$ приводит к увеличению $\pi_{твр}^* \cdot \pi_{сгр}^*$, а $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$ уменьшается. Соответствующие зависимости представлены на рис. 3 для цикла с $T_{гр}^* = 1500 \text{ К}$, $\pi_{кгр}^* = 25$, $\pi_{вп}^* / \pi_{впopt}^* = 0,90$, $L_{вп}^* / L_{впopt}^* = 0,55$.

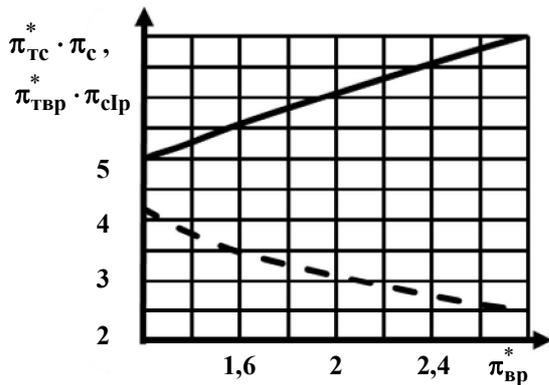


Рис. 3. Зависимости $\pi_{твр}^* \cdot \pi_{сгр}^*$ ТРДД и $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$ конвертированного наземного ГТД от $\pi_{вр}^*$:
 — $\pi_{твр}^* \cdot \pi_{сгр}^*$; — — $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$.

Решение системы уравнений (1)...(3) вместе с условием $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c = f(\pi_{вр}^*)$ позволяет найти зависимости $\pi_{тс}^*$ и π_c , а также λ_c от $\pi_{вр}^*$, которые приведены на рис. 4,5.

Кроме того, на рис. 4 приведены результаты расчета $\pi_{твр}^*$, полученные в результате решения системы уравнений (1)...(3) вместе с условием $\pi_{твр}^* \cdot \pi_{сгр}^* = f(\pi_{вр}^*)$, представленным на рис. 3.

Для данного примера видно, что $\pi_{тс}^* < \pi_{твр}^*$, а величина $\lambda_c > 0,5$. Это свидетельствует о высоких потерях с выходной скоростью и неприемлемо для наземных ГТД.

С целью уменьшения этих потерь в наземных ГТД обычно реализуется режим перерасширения газа в турбине. При этом рекомендуется $\lambda_c \approx 0,20$.

Для получения режима перерасширения газа необходимо перераспределить общую степень понижения давления в свободной турбине и выходном устройстве $\pi_{тс}^* \cdot \pi_c$ в пользу $\pi_{тс}^*$. Для этого, в соот-

ветствии с формулой (1), необходимо увеличить площадь проходного сечения на выходе из ГТД F_c .

Результаты расчета степени понижения давления свободной турбины при условии, что $\lambda_c = 0,20$, показаны на рис. 4.

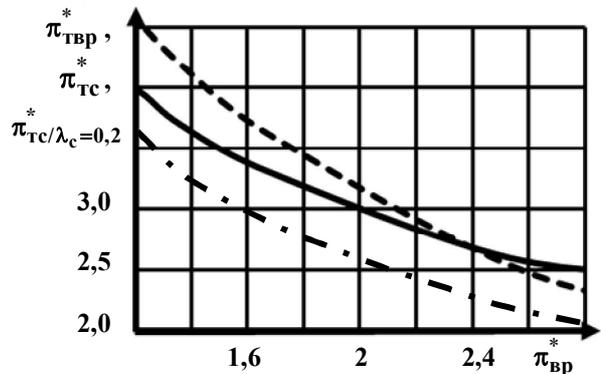


Рис. 4. Зависимости $\pi_{твр}^*$, $\pi_{тс}^*$ и $\pi_{тс}^* / \lambda_c=0,2$ конвертированного наземного ГТД от $\pi_{вр}^*$:
 — — $\pi_{твр}^*$; — $\pi_{тс}^* / \lambda_c=0,2$; — · — $\pi_{тс}^*$

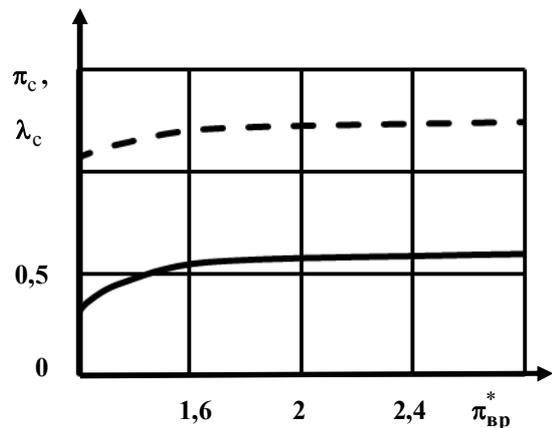


Рис. 5. Зависимости π_c и λ_c конвертированного наземного ГТД от $\pi_{вр}^*$:
 — λ_c ; — — π_c .

На рис. 6 представлены результаты расчета коэффициентов увеличения площади выходного сечения ГТД $k_{F_c} = \frac{F_c / \lambda_c=0,2}{F_{c1}}$ и степени понижения да-

вления в свободной турбине $k_{\pi_{тс}^*} = \frac{\pi_{тс}^* / \lambda_c=0,2}{\pi_{твр}^*}$ при условии $\lambda_c = 0,20$. В рассматриваемом случае степень понижения давления свободной турбины

$\pi_{тс}^*/\lambda_{с}=0,2$ может быть как ниже, так и выше $\pi_{твр}^*$.

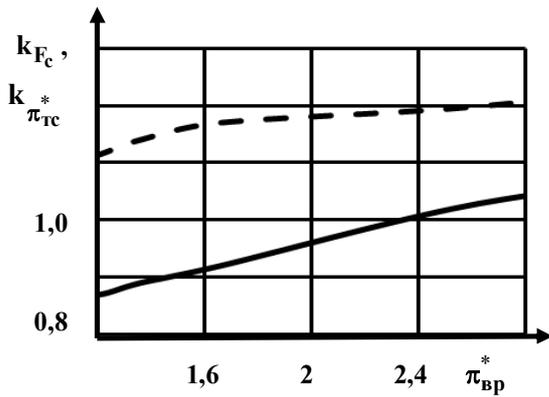


Рис. 6. Зависимости $k_{\pi_{тс}}^*$ и k_{F_c}

конвертированного наземного ГТД от $\pi_{твр}^*$:
 — $k_{\pi_{тс}}^*$; - - - k_{F_c}

Т.е., рабочая точка на характеристике свободной турбины может располагаться как правее, так и левее расчетной точки (рис. 7).

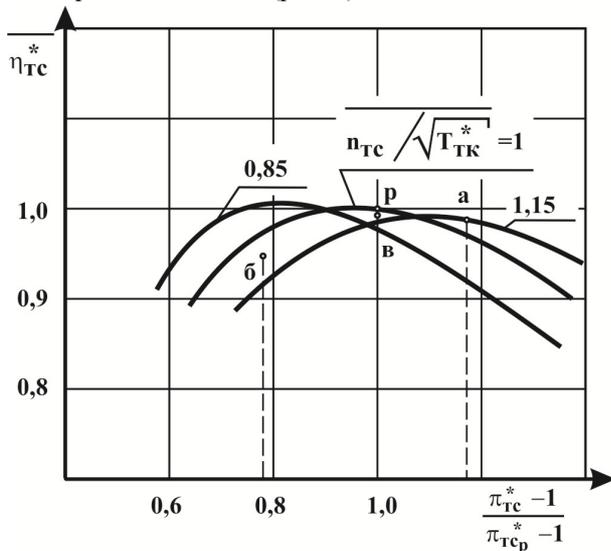


Рис. 7. Рабочие точки на характеристике свободной турбины

В конвертированном ГТД изменяется не только степень повышения давления свободной турбины, но и приведенная окружная скорость $\lambda_u \sim \frac{u_{тс}}{\sqrt{T_{тк}^*}}$.

При сохранении расчетного режима газогенератора, в соответствии с формулой (8), температура перед свободной турбиной уменьшается пропорционально степени уменьшения температуры воздуха перед газогенератором $\overline{T_{вр}^*}$, вычисляемой по

формуле (6). Поэтому, при обеспечении равенства частот вращения свободной турбины и турбины вентилятора $\lambda_u \sim \frac{u_{тс}}{\sqrt{T_{тк}^*}}$ возрастает тем сильнее, чем больше $\pi_{твр}^*$.

С учетом возможного изменения $\pi_{тс}^*$ и λ_u возможны три характерных случая:

- а) $\pi_{тс}^* > \pi_{твр}^*$, $\lambda_u \gg \lambda_{ур}$;
- б) $\pi_{тс}^* < \pi_{твр}^*$, $\lambda_u > \lambda_{ур}$;
- в) $\pi_{тс}^* \approx \pi_{твр}^*$, $\lambda_u > \lambda_{ур}$.

Положения рабочих точек на характеристике свободной турбины, соответствующие этим случаям, показаны на рис. 7.

Случай (а) реализуется при больших значениях $\pi_{твр}^*$. Режим работы свободной турбины отклоняется от расчетного, однако КПД турбины $\eta_{тс}^*$ уменьшается незначительно вследствие того, что уменьшение КПД из-за увеличения $\pi_{тс}^*$ компенсируется его ростом из-за увеличения λ_u .

Случай (б) реализуется при малых значениях $\pi_{твр}^*$. В отличие от случая (а), КПД свободной турбины $\eta_{тс}^*$ существенно уменьшается из-за уменьшения $\pi_{тс}^*$ и увеличения λ_u .

В случае (в) КПД свободной турбины $\eta_{тс}^*$ незначительно уменьшается из-за увеличения λ_u .

Из представленного анализа следует, что для сохранения высокого значения $\eta_{тс}^*$ требуется корректировка величины $\lambda_u \sim \frac{u_{тс}}{\sqrt{T_{тк}^*}}$. Поскольку величина $T_{тк}^*$ определяется температурой воздуха на входе в ГТД и режимом работы газогенератора, то корректировка λ_u возможна только путем изменения частоты вращения свободной турбины $n_{тс}$.

В случае (а) увеличение $n_{тс}$ для увеличения λ_u невозможно вследствие увеличения напряжений в рабочем колесе от действия центробежных сил. Поэтому целесообразно выбрать $n_{тс}$ такую же, как и частота вращения турбины вентилятора конвертируемого ТРДД.

В случаях (б) и (в) требуется уменьшение $n_{тс}$ для уменьшения λ_u . Это благоприятно влияет не

только на величину $\eta_{тс}^*$, но и на величину центробежных сил, действующих на рабочее колесо турбины, и, в конечном итоге, на ресурс свободной турбины. При этом недопустимого увеличения крутящего момента на валу турбины не произойдет, вследствие меньшей мощности свободной турбины по сравнению с мощностью турбины вентилятора (меньшая степень понижения давления, расход газа свободной турбины и температура газа перед турбиной).

Заключение

В работе показано изменение режима работы свободной турбины наземного ГТД, полученного конвертацией ТРДД путем исключения вентилятора. Даны рекомендации по корректировке частоты вращения ротора свободной турбины, обеспечивающие сохранение высокого КПД свободной турбины и удовлетворение основных требований по прочности и ресурсу наземного ГТД.

Поступила в редакцию 16.10.2014, рассмотрена на редколлегии 19.11.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теории авиационных двигателей В. П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ РЕЖИМУ РОБОТИ ВІЛЬНОЇ ТУРБИНИ КОНВЕРТОВАНОГО ГТД

О. В. Кіслов

Розглянуто особливості вибору режиму роботи вільної турбіни наземного ГТД, одержаного конвертуванням ТРДД шляхом виключення вентилятору. Показано залежність режиму роботи вільної турбіни конвертованого наземного ГТД від розрахункового ступеня підвищення тиску вентилятора ТРДД. Оцінено величину збільшення площі прохідного перерізу вихідного пристрою, що необхідна для реалізації режиму перерозширення вільної турбіни, та її вплив на ступінь зниження тиску вільної турбіни. Показано, що при малих розрахункових ступенях підвищення тиску вентилятора ТРДД ступінь зниження тиску вільної турбіни вище від розрахункової, а при зростанні розрахункового ступеня підвищення тиску вентилятора ТРДД він зменшується і становиться менше розрахункового. Виконано аналіз зміння швидкості вільної турбіни конвертованого наземного ГТД та показано шляхи підвищення ККД турбіни.

Ключові слова: ТРДД, вентилятор, вільна турбіна, ступінь зниження тиску турбіни, приведена колова швидкість, ККД турбіни.

FEATURES OF OPERATION MODE SELECTION OF CONVERTED GTE FREE TURBINE

O. V. Kislov

The features of the operation mode selection of the ground gas turbine engine free turbine are considered. The ground gas turbine engine is a result of converting turbofan by removing the fan. The dependence of the free turbine mode from the design pressure ratio turbofan fan are shown. The increasing magnitude of the output device flow area, necessary for realization of the overexpansion of the free turbine, are justified. Also, the dependence of the pressure ratio in the free turbine from the output device flow area, are justified. It is shown, that at low design fan pressure ratio the free turbine pressure ratio is higher than design free turbine pressure ratio, while increasing design fan pressure ratio the free turbine pressure ratio decreases and becomes less than the designed value. The analysis of the ground GTE free turbine corrected circular speed changes are done and the ways of increasing the efficiency of the free turbine are shown.

Keywords: turbofan, fan, free turbine, turbine pressure ratio, corrected circular speed, turbine efficiency.

Кислов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: OBKislov@mail.ru.

Литература

1. *Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) [Текст] / В. А. Скибин, В. И. Солонин, В. А. Палкин и др. ; под ред. В. А. Скибина, В. И. Солонина. – М. : ЦИАМ, 2004. – 424 с.*
2. *Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок : учебник в 3 кн. [Текст] / В. В. Кулагин, С. К. Бочкарев, И. М. Горюнов и др. ; под ред. В. В. Кулагина. – М. : Машиностроение, 2005. – Кн. 3: Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД. – 2005. – 464 с.*
3. *Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных двигателей [Текст] / Ю. Н. Нечаев. – М. : ВВИА, 1990. – 704 с.*
4. *Кислов, О. В. Особенности выбора режима работы газогенератора конвертированного ГТД [Текст] / О. В. Кислов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8 (105). – С. 78 – 81.*