

УДК 621.438:621.515

В. А. ШКАБУРА

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССОРНОЙ И ТУРБИННОЙ ЧАСТЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРА С ОБЩИМ РАБОЧИМ КОЛЕСОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В целях развития двигателей и энергетических установок рассмотрены вопросы совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД) путем применения в их составе новых типов турбомашин, в частности турбокомпрессора с общим рабочим колесом (ТКО). Приведены результаты исследования влияния соотношения ширины лопаток к среднему диаметру рабочего канала на эффективность работы компрессорной и турбинной частей ТКО применительно к газотурбинным двигателям. При завышенном соотношении надо вводить поправочный коэффициент. Для определения эффективности применения ТКО в составе газотурбинного двигателя представлены результаты термодинамического расчета.

Ключевые слова: турбокомпрессор с общим рабочим колесом, турбинная часть, компрессорная часть, газотурбинный двигатель.

Введение

Известно, что основными направлениями развития газотурбинных двигателей является повышение параметров цикла их работы и эффективности происходящих в них процессов [1-3]. Однако традиционные подходы во многом себя уже исчерпали, и поэтому существенные сдвиги в этом направлении возможны лишь при использовании новых технических решений, подходов и технологий. Особенно актуально это для двигателей с высокой суммарной степенью повышения давления или ГТД небольшой тяги, где использование только осевых компрессоров в газогенераторе вследствие слишком малых размеров лопаток последних ступеней становится затруднительным, или там, где необходим двигатель с высокой удельной мощностью (тягой) и небольшой стоимостью изготовления. Все это вынуждает вести исследования, направленные на совершенствование новых типов турбомашин ГТД и конструктивных нетрадиционных схем двигателей.

Поэтому для повышения эффективности работы ГТД и расширения их возможностей необходимо как совершенствовать традиционные типы турбомашин, так и на основе всестороннего анализа применять новые технические решения и проводить оптимизацию.

1. Формулирование проблемы

Одним из способов решения данной проблемы является применение в составе газотурбинных двигателей нового типа турбомашин –

турбокомпрессоров с общим рабочим колесом (ТКО) [4-8]. В силу особенностей устройства и способа их работы они имеют в два раза большую высоту лопаток рабочего колеса (РК) по сравнению с остальными схемами турбомашин, что ценно при малых объемных расходах газа и, следовательно, малых размерах лопаток. Кроме того, благодаря периодичности работы лопаток РК ТКО могут работать при более высоких температурах газа перед турбиной [4-8].

Однако для применения ТКО в составе ГТД необходимы их детальные исследования и проработка конструктивных элементов. Течение в РК носит довольно сложный (периодически неустановившийся) характер. Данное обстоятельство затрудняет развитие теории газодинамического расчета проточных частей ТКО.

2. Решение проблемы

В ГТД, за редким исключением, после осевых ступеней компрессора применяют центробежную ступень, хотя компромиссной с точки зрения КПД, габаритных размеров и производительности является диагональная ступень [1-2].

Турбокомпрессоры с общим рабочим колесом в зависимости от направления движения газовых потоков могут иметь две схемы течения в межлопаточном пространстве РК – прямую и противочную. Если направления газового и воздушных потоков совпадают относительно оси вращения РК, то схема течения в ТКО прямая (рис. 1), при противоположном движении потоков – противочная [4].

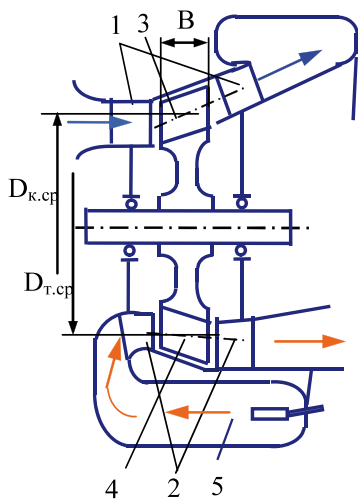


Рис. 1. Схема турбокомпрессора с общим рабочим колесом в качестве простого ГТД: 1 – компрессорная часть; 2 – турбинная часть; 3 – компрессорный рабочий канал; 4 – турбинный рабочий канал; 5 – камера сгорания

В процессе исследований первой опытной модели ТКО было установлено, что компрессорная часть довольно длинная, в результате чего часть воздуха не успевает за пол-оборота РК пройти весь компрессорный рабочий канал. Поэтому для ТКО существуют определенные ограничения на некоторые геометрические соотношения рабочего колеса.

Для данного типа турбокомпрессоров важно, чтобы воздух или газ, вошедший в компрессорный или турбинный рабочий канал, успел пройти по всей его длине. Поэтому для обеспечения эффективной работы для ТКО важны определенные параметры.

Характер влияния соотношения ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала РК можно определить по коэффициенту $K_{ВД}$.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента $K_{ВД}$ в компрессорной части ТКО при степени парциальности $\epsilon = 0,48$ от соотношения ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала РК.

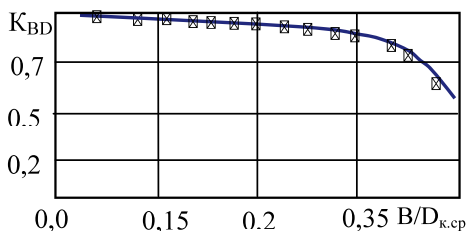


Рис. 2. Зависимость коэффициента $K_{ВД}$ в компрессорной части ТКО от соотношения ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала РК

При сравнительно небольшом соотношении $V/D_{к.ср} = 0,07...0,18$ можно достигнуть наи-

большей эффективности работы компрессорной части ТКО (напора и КПД). При особо малых соотношениях ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала РК (менее 0,07) исследования не проводились, так как создание такого РК ТКО для применения в ГТД проблематично и в нем происходит довольно низкий энергообмен между воздухом и лопатками РК. А при завышенном соотношении ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала РК газ или воздух не успевает пройти весь рабочий канал.

На рис. 3 показаны результаты исследований зависимости коэффициента $K_{ВД}$ в турбинной части от соотношения ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала РК на эффективность работы при степени парциальности 0,46. Турбинная часть по сравнению с компрессорной частью менее чувствительна к увеличению отношения ширины решетки РК к среднему диаметру рабочего канала.

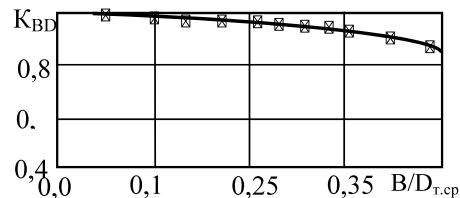


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K_{ВД}$ в турбинной части ТКО от соотношения ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала

В работе [11] приведена формула, которая определяет влияние степени парциальности на общий КПД турбины. Чтобы учесть влияние на КПД турбинной части соотношение ширины решетки к среднему диаметру рабочего канала, необходимо указанную формулу расчета дополнить поправочным коэффициентом

$$\eta_{\epsilon} = K_{ВД} \left(1 - 0,135 \frac{u}{c_{ад}} \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right) \right).$$

Известно, что последние ступени компрессора двигателей Д-36 и Д-436 имеют малые по высоте лопатки и большой относительный диаметр втулки $\bar{d} = 0,93$, поэтому дальнейшее увеличение степени повышения давления компрессора проблематично.

Для определения эффективности применения ТКО в составе полноразмерных ГТД в качестве исходного варианта выбран газотурбинный двигатель Д-436Т1. На взлетном режиме он имеет следующие значения основных параметров:

$$G_B = 254 \text{ кг/с}; \quad m = 4,9; \quad \pi_k = 22,75; \quad \eta_k = 0,81;$$

$$T_T = 1470 \text{ К}; \quad \eta_{ТВД} = 0,845; \quad \pi_{ТВД} = 2,75;$$

$$P = 7570 \text{ кгс}; \quad c_e = 0,377 \text{ кг/(кгс} \cdot \text{ч)}.$$

Применение ТКО в составе ГТД позволяет увеличить степень повышения давления компрессора π_k^* и температуру газа перед турбиной T_T^* за счет периодичности работы лопаток РК ТКО. На рис. 4 показана схема размещения ТКО в газотурбинном двигателе с осевым компрессором. Предлагается РК ТКО разместить на валу ротора высокого давления, чтобы разгрузить турбину компрессора высокого давления.

Чтобы упростить задачу сравнения двигателей и не определять тягу вентилятора модернизированного двигателя, ограничимся сравнением параметров силовых турбин.

По имеющимся данным силовая турбина двигателя Д-436Т1 имеет следующие параметры:

$$\pi_{TC} = 3,652; \quad \eta_{TC} = 0,91; \quad N_{TC} = 15500 \text{ кВт}.$$

Благодаря периодичности работы лопаток РК ТКО в модернизированном ГТД увеличена температура газа перед турбиной $T_T = 1800 \text{ К}$.

В результате газодинамического расчета ТКО в составе двигателя получены следующие параметры:

$$\begin{aligned} & \text{— в компрессорной части } \pi_{квд2}^* = 1,86; \\ & \eta_{квд2}^* = 0,81; \end{aligned}$$

$$\text{— в турбинной части } \pi_{твд1} = 3,35; \quad \eta_{твд1} = 0,825.$$

$$\text{В итоге достигнуто: } \pi_k^* = 42; \quad \eta_k^* = 0,78.$$

Силовая турбина модернизированного двигателя имеет следующие параметры:

$$\pi_{TC} = 5,366; \quad \eta_{TC} = 0,868; \quad N_{TC} = 22750 \text{ кВт}.$$

Таким образом, благодаря применению ТКО в составе ГТД мощность силовых турбин возросла почти в 1,5 раза, а эффективный КПД двигателя увеличился на 12%.

С помощью формул, полученных ранее [5], определена средняя температура лопаток РК ТКО, она составляет $\bar{T}_л = 1234 \text{ К}$. Нагрев воздуха от лопаток РК в ТКО равен 6° , в результате чего на 1% снизятся эффективный КПД двигателя и эффективная тяга, однако, отпадает необходимость в отборе воздуха от компрессора для охлаждения лопаток РК турбинной части ТКО.

Заключение

Для повышения степени повышения давления и температуры газа перед турбиной в газотурбинных двигателях предлагается применять в качестве замыкающей ступени компрессора и первой ступени турбины турбокомпрессор с общим рабочим колесом. Его использование в составе ГТД имеет смысл, когда применение традиционных ступеней проблематично.

Модернизация двигателей типа Д-436 и Д-36 с помощью ТКО позволяет повысить термодинамические параметры цикла и тем самым увеличить удельную тягу двигателя и понизить удельный расход топлива.

Течение газа и воздуха в рабочем колесе ТКО является периодически неустановившимся, поэтому до перехода из одного режима работы РК в другой газ и воздух должны успеть пройти соответствующий рабочий канал. Для этого отношение ширины решетки РК к среднему диаметру рабочего канала компрессорного рабочего канала не должно превышать 0,15, иначе часть воздуха сможет пройти всю длину рабочего канала. В вихревых компрессорах, как правило, соблюдается это соотношение [12].

Турбинная часть по сравнению с компрессорной частью менее чувствительна к увеличению отношения ширины решетки РК к среднему диаметру рабочего канала. Это связано с тем, что в турбинной части ТКО поток активный, и на входе в рабочее колесо он имеет большую скорость. Поэтому для обеспечения эффективной работы турбинной части данное отношение должно быть не выше 0,22.

Литература

1. Холщевников К. В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. — М.: Машиностроение, 1986. — 432 с.
2. Кулагин В. В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Кн.3. Основные проблемы [Текст] / В. В. Кулагин. — М.: Машиностроение, 2005. — 464 с.
3. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: учебник / Ю. М. Терещенко, Л. Г. Валянская, Н. С. Кулик, В.В. Панин/ под ред. Ю.М. Терещенко. — К.: Книжное изд-во НАУ, 2005. — 500 с.
4. Пат. № 84679 України. МКИ⁷. F02 K3/00. Газотурбинний двигун і спосіб його роботи / Шкабура В.А. (Україна). Заявлено 01.12.2004. Опубл. 25.11.2008.
5. Шкабура В. А. Исследование турбокомпрессоров с общим рабочим колесом для применения в малоразмерных газотурбинных двигателях [Текст] / В.А. Шкабура // Вісник двигунобудування. — 2011. — №2(25). — С.9-13.
6. Шкабура В. А. Исследование особенностей работы турбокомпрессора с общим рабочим колесом в газотурбинных двигателях [Текст] / В. А. Шкабура // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — №4/51. — С.57-60.

7. Шкабура В.А. Результаты исследований турбокомпрессоров с общим рабочим колесом для применения в газотурбинных двигателях [Текст] / В.А. Шкабура // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №7/64. – С. 66-70.

8. Шкабура В.А. Результаты исследований турбинной и компрессорной частей турбокомпрессора с общим рабочим колесом для применения в газотурбинных двигателях [Текст] / В.А. Шкабура // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – №9/116. – С. 63-67.

9. Дейч М.Е. Гидрогазодинамика / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. — М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.

10. Овсянников Б. В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.

11. Быков Н.Н. Выбор параметров и расчет маломощных турбин для привода агрегатов / Н.Н. Быков, О.Н. Емин. – М: Машиностроение, 1972. – 288 с.

12. Виршубский И.М. Вихревые компрессоры / И.М. Виршубский, Ф.С. Рекстин, А.Я. Шквар. – Л.: Машиностроение, 1988. – 271 с.

Поступила в редакцию 26.06.15

В. А. Шкабура. Дослідження турбінної та компресорної частин турбокомпресора із спільним робочим колесом для застосування у складі газотурбінних двигунів

У рамках розвитку двигунів та енергетичних установок висвітлено питання удосконалення газотурбінних двигунів шляхом використання в них перспективних і нових турбомашин, наприклад турбокомпресорів із спільним робочим колесом (ТКС). Розглянуто схему ГТД із ТКС, яка дозволяє підвищити температуру газу перед турбіною та ступінь підвищення тиску в компресорі, що при забезпеченні високого рівня їх ефективності приведе до підвищення питомої потужності й зниження витрат палива. Для визначення ефективності застосування ТКС у складі газотурбінних двигунів проведено розрахунково-конструкторські дослідження. Наведено розрахунки ТКС і результати впливу співвідношення ширини лопаток до середнього діаметра робочого каналу на ефективність роботи компресорної та турбінної частин. При завищеному співвідношенні у формули розрахунку треба вводити коефіцієнт поправлення.

Ключові слова: турбокомпресор із спільним робочим колесом, газотурбінний двигун, компресорна частина, турбінна частина.

V. A. Shkabura. Of analysis of turbine zone and compressor zone of turbo-compressor with general impeller for gas turbine engines

In the framework of development of the prospective and new types of turbo machines to broaden possibilities of gas turbine engines investigation flow of gas in of turbo-compressor with general impeller (TCG). Consideration scheme of gas turbine engines with of general impeller turbo-compressor, for rise gas turbine temperature and pressure ratio increase with aim of specific power elevation and specific fuel consumption reduction. Turbo-compressor with general impeller at presents not enough investigation. Given work elucidate especially function and complications of general impeller turbo-compressor, which beginnings by theirs successful application of gas turbine engines. Bring the results analysis gas overflowing of turbo-compressor with general impeller for gas turbine engines. For defining the efficiency of TCG application in the structure of gas turbine engines gas researches were conducted.

Key words: of turbo-compressor with general impeller, gas turbine engine, compressor zone, turbine zone.