

УДК 621.438:621.515

В. А. ШКАБУРА*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТУРБИННОЙ И КОМПРЕССОРНОЙ ЧАСТЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С ОБЩИМ РАБОЧИМ КОЛЕСОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

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 формулы для определения мощности и коэффициента мощности компрессорной части ТКО. Для верификации методик газодинамического расчета компрессорной проточной части разработана и изготовлена опытная модель ТКО и проведены ее исследования. Для определения эффективности применения ТКО в составе малоразмерного ГТД представлены результаты термодинамического расчета.

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

Введение

Известно, что основным направлением 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 и в малоразмерных ГТД, 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 применять новые технические решения на основе всестороннего анализа и проводить их оптимизацию.

1. Формулирование проблемы

При малых размерах лопаток турбин проблематично размещение внутренних каналов охлаждения, так как при попадании пыли в проточную часть имеется опасность их за-

сорения. А утолщение выходной кромки для охлаждения задней части лопаток приводит к большим потерям энергии в закруточных следах. Пленочное охлаждение существенно улучшает тепловую защиту лопаток, но является причиной дополнительных потерь и снижения КПД турбин, особенно малоразмерных ГТД [2], а при попадании пыли выходные каналы засоряются.

2. Решение проблемы

Одним из способов решения данной проблемы является применение в составе газотурбинных двигателей нового типа турбомашин – турбокомпрессоров с общим рабочим колесом (ТКО) [3-5]. 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 [3-5]. Однако для применения ТКО в составе ГТД необходимы детальные исследования и проработка их конструктивных элементов.

Турбокомпрессоры с общим рабочим колесом в зависимости от направления движения газовых потоков могут иметь две схемы течения в межлопаточном пространстве РК – прямоточную и противоточную [3]. Если направления газового и воздушных потоков совпадают относительно оси вращения РК, то схема течения

в ТКО прямоточная (рис. 1), при противоположном движении потоков – противоточная.

Для осуществления той или иной схемы течения в РК необходимо подбирать соответствующую форму лопаток рабочего колеса и расположение соплового, выпускного, всасывающего и нагнетательного каналов относительно друг друга.

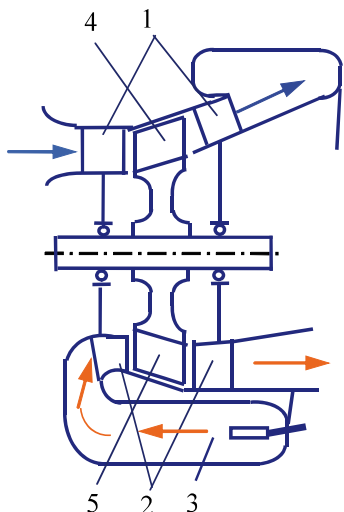


Рис. 1. Схема турбокомпрессора с общим рабочим колесом в качестве простого ГТД:
1 – компрессорная часть; 2 – турбинная часть; 3 – камера сгорания; 4 – компрессорный рабочий канал;
5 – турбинный рабочий канал

При работе ТКО некоторая часть воздуха переносится в межлопаточном пространстве РК через разделитель из компрессорного рабочего канала 4 в турбинный 5 (рис. 1). Соответственно часть горячего газа, оставшегося в межлопаточном пространстве РК, поступает из турбинной части в компрессорную часть. Это является основной особенностью турбокомпрессоров данного типа.

Турбокомпрессор с общим рабочим колесом уже прошел первую стадию исследований. Это позволило проработать конструкцию ТКО и основные положения теории его расчета. Для дальнейшего ее развития после газодинамических расчетов проточной части турбокомпрессора с общим рабочим колесом, проверки их результатов и апробации созданной методики расчета разработано и изготовлено несколько опытных моделей турбокомпрессора, общий вид одной из них показан на рис. 2. В силу малой осевой протяженности ТКО рабочее колесо в модели расположено на валу электродвигателя, который используется при исследовании компрессорной части.

Так как расход воздуха на входе в компрессорную часть и выходе из нее вследствие перетекания через разделители различный, то

выражение для определения мощности компрессорной части РК имеет вид

$$N_{\text{ук}} = G_{B2} C_{2\text{ук}} u_{2\text{к}} - G_{B1} C_{1\text{ук}} u_{1\text{к}}, \quad (1)$$

где G_{B1} – расход воздуха на входе в компрессорный рабочий канал (КРК);

$C_{1\text{ук}}$ – окружная составляющая абсолютной скорости потока на входе в КРК;

$u_{1\text{к}}$ – окружная скорость РК на входе в КРК;

G_{B2} – расход воздуха на выходе из КРК;

$C_{2\text{ук}}$ – окружная составляющая абсолютной скорости потока на выходе из КРК;

$u_{2\text{к}}$ – окружная скорость РК на выходе из КРК.

Как показали расчетные исследования, при рациональном проектировании проточной части ТКО перетекание и перенос среды можно свести к минимуму [5].



Рис. 2. Опытная модель ТКО

Окружная протяженность разделителя зависит от густоты решетки. Чтобы он выполнял свою функцию, ее целесообразно принимать равной $L_{\text{разд}} = 2t$ (двум шагам лопаток). Иначе увеличение $L_{\text{разд}}$ уменьшает рабочий участок проточной части: компрессорного и турбинного рабочих каналов, что снижает их КПД.

Чтобы увеличить частоту вращения РК, к валу опытной модели через муфту был подсоединен более мощный электродвигатель с регулятором оборотов. Результаты испытаний компрессорной части опытной модели ТКО с помощью более мощного электродвигателя показаны на рис. 3.

Для определения влияния турбинной части на работу компрессорной части ТКО были проведены дополнительные исследования модели,

когда привод рабочего колеса осуществлялся от турбинной части при подаче в нее сжатого воздуха. На рис. 3 показаны результаты исследований.

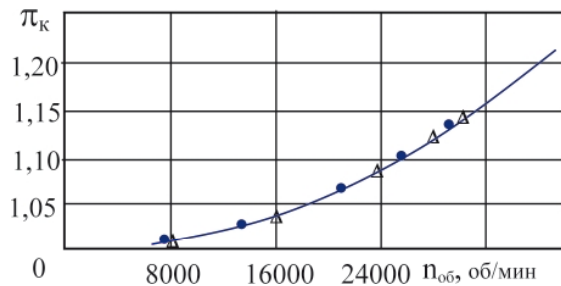


Рис. 3. Зависимости степени повышения давления компрессорной части опытной модели ТКО от оборотов РК: ● – при работе турбинной части;

При создании опытной модели не предполагалось, что ее опоры будут работать при довольно высоких оборотах, поэтому частота вращения колеса ограничена.

В итоге проводимых исследований, в частности компрессорной части ТКО, установлено, что ее коэффициент мощности зависит, кроме указанных ранее факторов, и от параметров газа в турбинном рабочем канале

$$\mu_k = \mu K_s K_\tau K_L K_T, \quad (2)$$

где K_s – коэффициент, учитывающий влияние величины зазора между корпусом и лопатками;

K_L – коэффициент, учитывающий геометрические особенности лопаток компрессорной части;

K_τ – коэффициент нестационарности, учитывающий влияние периодичности на работу РК;

K_T – коэффициент, учитывающий влияние параметров газа в турбинном рабочем канале.

Результаты испытаний компрессорной части опытной модели ТКО показали хорошее совпадение расчетных и опытных значений.

Для определения эффективности применения ТКО в составе ГТД в качестве исходного варианта выбран малоразмерный газотурбинный двигатель (МГТД) АИ-450.

Предыдущие исследования показали [4-5], что турбинная часть ТКО может эффективно работать при довольно больших перепадах давления $\pi_\tau = 3...3,5$. Поэтому для привода компрессора с $\pi_k^* = 9...12$ достаточно лишь турбинной части ТКО.

Модернизация двигателя АИ-450 с помощью ТКО позволила разгрузить центробежный

компрессор и увеличить его КПД: $\pi_{k1} = 5,44$; $\eta_{k1} = 0,825$.

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

в компрессорной части: $\pi_{k2} = 2,21$; $\eta_{k2} = 0,807$;

в турбинной части $\pi_{T1} = 3,35$; $\eta_{T1} = 0,825$.

Таким образом, достигнуто $\pi_k^* = 12$; $\eta_k^* = 0,792$.

Вследствие периодичности работы лопаток РК ТКО увеличена температура газа перед турбиной $T_T = 1600$ К; $\eta_{Tc} = 0,88$; $\pi_{Tc} = 3,2$.

В итоге $N_e = 560$ кВт; $c_e = 0,242$ кг/(л.с.ч).

Заключение

Проведенные исследования показали, что турбокомпрессор с общим рабочим колесом может быть использован в составе малоразмерных газотурбинных двигателей в качестве замыкающей ступени компрессора для существенного увеличения степени повышения давления и температуры газа перед турбиной.

Проведенные исследования опытных моделей позволили доработать методики газодинамического расчета проточных частей ТКО.

По уточненной методике определена степень повышения компрессорной части ТКО для МГТД.

Модернизация двигателя с помощью ТКО позволяет увеличить термодинамические параметры цикла и тем самым повысить удельную тягу двигателя и понизить удельный расход топлива.

Литература

- 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.
- Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
- Пат. №84679 України. МКИ⁷. F02 K3/00. Газотурбинний двигун і спосіб його роботи / Шкабура В.А. (Україна). Заявл. 01.12.2004. Опубл. 25.11.2008.
- Шкабура В.А. Исследование компрессорной и турбинной частей турбокомпрессора с общим рабочим колесом для применения в составе газотурбинных двигателей [Текст] / В.А. Шкабура // – Вісник двигунобудування. – 2015. – №2/2015 – С.215-217.
- Шкабура В.А. Исследование влияния перетекания части газовых потоков на эффек-

тивность работы турбокомпрессора с общим рабочим колесом применительно к ГТД [Текст] /В.А. Шкабура // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №7/94. – С.114-118.

Поступила в редакцию 26.07.2017 г.

В. А. Шкабура. Результаты досліджень турбінної та компресорної частин турбокомпресорів із спільним робочим колесом для застосування у малорозмірних газотурбінних двигунах

У рамках розвитку двигунів та енергетичних установок висвітлено питання удосконалення газотурбінних двигунів ГТД шляхом використання в їх складі нових типів турбомашин, наприклад, турбокомпресора із спільним робочим колесом (ТКС). Наведено формули для розрахунку потужності та коефіцієнта потужності компресорної частини ТКС. Для верифікації методики газодинамічного розрахунку компресорної проточної частини розроблено та виготовлено дослідну модель ТКС та проведено її дослідження. 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 малорозмірних ГТД наведено результати термодинамічного розрахунку.

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

V. A. Shkabura. Results of analysis of turbine zone and compressor zone of turbo-compressor with general impeller for small 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, experiment model.