

УДК 621.438:621.515-047.37

doi: 10.32620/aktt.2019.4.07

В. А. ШКАБУРА*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПРЕССОРНОЙ И ТУРБИННОЙ ЧАСТЕЙ
ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С ОБЩИМ РАБОЧИМ КОЛЕСОМ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

В целях развития двигателей и энергетических установок рассмотрены вопросы совершенствования малоразмерных двигателей путём применения в их составе нового типа турбомашин – турбокомпрессоров с общим рабочим колесом (ТКО). Например, показана схема наиболее простого малоразмерного газотурбинного двигателя с применением ТКО. Для систематизации сравнительно эффективных схем ТКО, разработана, и приведена в статье, классификация возможных схем турбокомпрессора с общим рабочим колесом. В основу классификации положены 5 возможных направлений движения рабочей среды в лопаточном аппарате – осевое (параллельно оси вращения машины), центробежное, центро-стремительное, диагональное и тангенциальное. 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. Турбокомпрессоры с общим рабочим колесом в зависимости от направления движения газовых потоков могут иметь две схемы течения в межлопаточном пространстве РК – прямоточную и противоточную. Если направления газового и воздушных потоков совпадают относительно оси вращения РК, то схема течения в ТКО прямоточная, при противоположном движении потоков – противоточная. Для проведения укрупнённого газодинамического расчёта ТКО приведены формулы, позволяющие вычислить окружное усилие, возникающее на лопатках рабочего колеса в компрессорном и в турбинном рабочих каналах ТКО. Также приведены формулы, с поправочными коэффициентами, для расчета коэффициента мощности компрессорной части и коэффициента нагрузки турбинной части. В процессе расчётных и экспериментальных исследований получена характеристика компрессорной части опытной модели ТКО. Результаты испытаний компрессорной части опытной модели ТКО показали хорошее совпадение расчётных и опытных значений. Проведенные исследования показали, что турбокомпрессор с общим рабочим колесом может быть использован в составе малоразмерных газотурбинных двигателей и в системе турбонаддува ДВС небольшой мощности с не высоким наддувом.

Ключевые слова: турбокомпрессор с общим рабочим колесом; турбинная часть; компрессорная часть; малоразмерный двигатель.

Введение

Известно, что основным направлением развития двигателей, в том числе и малоразмерных, является повышение параметров цикла их работы и эффективности происходящих в них процессов [1, 2]. 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 малоразмерных газотурбинных двигателей и в системе турбонаддува ДВС небольшой мощности, где использование лишь осевых компрессоров и турбин в турбокомпрессоре, вследствие слишком малых размеров лопаток последних ступеней, затруднительно. Всё это вынуждает проводить исследования, направленные на совершенствование новых типов турбомашин для ГТД и турбонаддува ДВС небольшой мощности.

1. Постановка задачи

С уменьшением размеров двигателей и их турбокомпрессорной части снижается эффективность работы осевых и радиальных ступеней компрессора и турбины. Кроме того, при малых размерах лопаток турбин ГТД проблематично размещение внутренних каналов охлаждения, так как при попадании пыли в проточную часть имеется опасность их засорения. А утолщение выходной кромки для охлаждения задней части лопаток приводит к большим потерям энергии в закрывочных следах. Плёночное охлаждение существенно улучшает тепловую защиту лопаток, но является причиной дополнительных потерь и снижения КПД турбин, особенно малоразмерных ГТД [1].

Одним из способов решения данной проблемы является применение в составе малоразмерных газотурбинных двигателей и для турбонаддува ДВС нового типа турбомашин – турбокомпрессоров с

общим рабочим колесом (ТКО) [4-6]. 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 объёмных расходах газа и, следовательно, малых размерах лопаток. Кроме того, благодаря периодичности работы лопаток РК ТКО могут работать при более высоких температурах газа перед турбиной [5, 6]. Однако для успешного применения ТКО в составе ГТД и турбонаддува ДВС необходимо систематизировать возможные схемы ТКО, развить теорию их.

2. Решение задачи

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

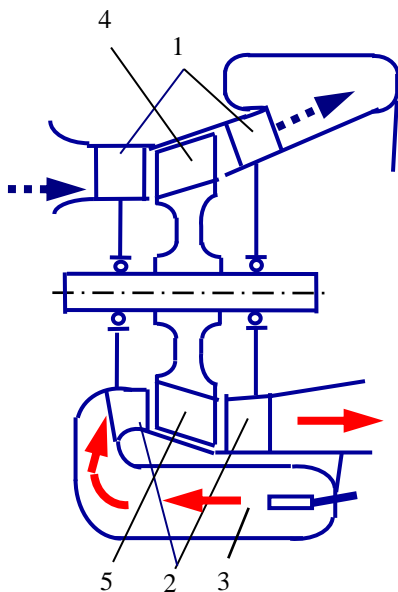


Рис. 1. Схема турбокомпрессора с общим рабочим колесом в качестве простого ГТД:
1 – компрессорная часть; 2 – турбинная часть;
3 – камера сгорания; 4 – компрессорный рабочий канал; 5 – турбинный рабочий канал

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.

Для систематизации возможных вариантов сравнительно эффективных конструктивных схем

турбокомпрессоров с общим рабочим колесом разработана их классификация схем, представленная на рис. 2. В частности, на рис. 1 показана конструктивная схема с диагональной компрессорной частью и с осевой турбинной частью.



Рис. 2. Классификация возможных схем турбокомпрессора с общим рабочим колесом:
К – компрессорная часть; Т – турбинная часть

Все варианты ТКО объединяет то, что расширение одного газа и сжатие другого газа происходит в межлопаточном пространстве одного РК. Причём эти процессы осуществляются на разных угловых частях РК (парциальный подвод) или на разных частях лопаток (по длине или ширине).

В основу классификации положены 5 возможных направлений движения рабочей среды в лопаточном аппарате – осевое (параллельно оси вращения машины), центробежное, центростремительное, диагональное и тангенциальное.

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.

Для работы ТКО, как самостоятельного агрегата, важно, чтобы турбинный рабочий канал вырабатывал необходимую мощность для работы компрессорного рабочего канала. Величину энергообмена между газом и рабочим каналом РК определяет окружное усилие, которое возникает при их взаимодействии. При незначительном изменении среднего диаметра в компрессорном рабочем канале колеса ТКО, окружное усилие, создаваемое на лопатках компрессорной части можно определить по формуле

$$F_{\text{ук}} = G_{\text{в2}} C_{2\text{ук}} - G_{\text{в1}} C_{1\text{ук}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{в1}}$ – расход воздуха на входе в компрессорный рабочий канал (КРК);

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

$G_{\text{в2}}$ – расход воздуха на выходе из КРК;

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

По аналогичной формуле можно вычислить окружную силу воздействия потока газа на лопатки РК в турбинном рабочем канале при незначительном изменении среднего диаметра

$$F_{\text{ит}} = G_{\text{г1}} C_{1\text{ит}} - G_{\text{г2}} C_{2\text{ит}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{г1}}$ – расход газа на входе в турбинный рабочий канал (ТРК);

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

$G_{\text{г2}}$ – расход газа на выходе из ТРК;

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

Вследствие небольшого перетекания газа и воздуха через разделители расход газа на входе в турбинный рабочий канал и на выходе различный.

Для развития теории газодинамических расчётов проточных частей ТКО и апробации созданных методик расчёта разработана и изготовлена опытная модель турбокомпрессора [5]. Чтобы увеличить частоту вращения РК, к валу опытной модели через муфту был подсоединён более мощный электродвигатель с регулятором оборотов. Мощность электродвигателя и обороты ротора ограничены, поэтому для испытания компрессорной части на оборотах 35000 об/мин пришлось привод ротора осуществлять от турбинной части, в которую для её работы подавался сжатый воздух. Результаты исследований компрессорной части опытной модели ТКО показаны на рис. 3.

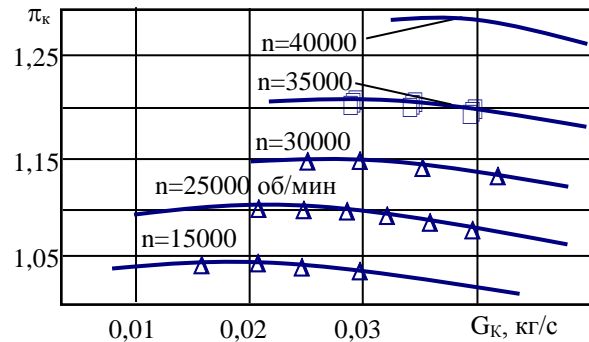


Рис. 3. Характеристика компрессорной части опытной модели ТКО:

Δ – привод РК от электродвигателя;

□ – привод от турбинной части; – – расчёт

Результаты исследований компрессорной части опытной модели ТКО показали хорошее совпадение расчётных и опытных значений.

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

$$\mu_{\text{к}} = \mu \ K_{\text{с}} K_{\text{ε}} K_{\text{L}} K_{\text{Т}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{с}}$ – коэффициент, учитывающий влияние величины зазора между корпусом и лопатками;

$K_{\text{ε}}$ – коэффициент, учитывающий степень парциальности компрессорной части;

K_{L} – коэффициент, учитывающий геометрические особенности лопаток компрессорной части;

$K_{\text{Т}}$ – коэффициент, учитывающий влияние параметров газа в турбинном рабочем канале.

Проведенные исследования турбинной части опытной модели показали, коэффициент нагрузки турбинной части ТКО, в отличие от коэффициента нагрузки осевой ступени турбины, зависит от дополнительных параметров, которые можно учесть с помощью поправочных коэффициентов

$$\mu_{\text{Тк}} = \mu_{\text{Т}} K_{\text{ε}} K_{\text{L}} K_{\text{К}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ε}}$ – коэффициент, учитывающий степень парциальности турбинной части;

K_{L} – коэффициент, учитывающий геометрические особенности лопаток турбинной части;

$K_{\text{К}}$ – коэффициент, учитывающий влияние параметров воздуха в компрессорном рабочем канале.

Проведённые ранее исследования [5, 6] показали, что ТКО наиболее вероятно будет использоваться в малоразмерных ГТД или там, где необходимо иметь наиболее простую конструкцию ГТД.

Предыдущие исследования показали [6], что турбинная часть ТКО может эффективно работать при довольно больших перепадах давления $\pi_T = 3...3,5$. Поэтому для привода компрессора ГТД с $\pi_K^* = 9...12$ достаточно лишь турбинной части ТКО.

Заклучение

Проведенные исследования показали, что турбокомпрессор с общим рабочим колесом может быть использован в составе малоразмерных газотурбинных двигателей и в системе турбонаддува ДВС небольшой мощности с не высоким наддувом.

Наличие переходных каналов между традиционными турбомашинами и ТКО несколько усложняет применение ТКО в составе ГТД. Хотя РК ТКО по сравнению с РК с охлаждаемыми лопатками значительно проще конструктивно и дешевле в изготовлении. Использование ТКО в составе газотурбинных двигателей целесообразно в качестве замыкающей ступени компрессора для существенного повышения температуры газа перед турбиной и увеличения степени повышения давления.

По уточнённой методике определена степень повышения компрессорной части ТКО для применения в малоразмерном газотурбинном двигателе и для наддува ДВС небольшой мощности.

Проведенные расчётные и экспериментальные исследования опытной модели ТКО позволили доработать методики газодинамического расчёта его компрессорной и турбинной частей.

Литература

1. Кулагин, В. В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Кн.3. Основные проблемы [Текст] / В. В. Кулагин. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.
2. Автомобильные двигатели с турбонаддувом [Текст] / Н. С. Ханин, Э. В. Аболтин, Б. Ф. Лямцев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.
3. Холщевников, К. В. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
4. Пат. № 84679 України. МКІІ⁷. F02 K3/00. Газотурбінний двигун і спосіб його роботи / Шкабура В. А. (Україна); Заявлено 01.12.2004; Опубл. 25.11.2008.

бура В. А. (Україна); Заявлено 01.12.2004; Опубл. 25.11.2008.

5. Шкабура, В. А. Результаты исследований турбинной и компрессорной частей турбокомпрессоров с общим рабочим колесом для применения в малоразмерных газотурбинных двигателях [Текст] / В. А. Шкабура // Вісник двигунобудування. – 2017. – № 2/2017 – С. 118-121.

6. Шкабура, В. А. Исследование влияния перетекания части газовых потоков на эффективность работы турбокомпрессора с общим рабочим колесом применительно к газотурбинным двигателям [Текст] / В. А. Шкабура // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7(94). – С. 114-118.

References

1. Kulagin, V. V. Teoriya, raschyot i proektirovanie aviacionnyh dvigatelej i energeticheskikh ustanovok: Kn.3. Osnovnye problemy [Theory, calculation and design of aviation engines and power stations: Book 3. Main problems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 464 p.
2. Hanin, N. S., Aboltin, E. V., Lyamcev, B. F., Zajcev, E. N. Avtomobil'nye dvigateli s turbonaddvom [Automobile engines with turbocharging]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 336 p.
3. Holshchevnikov, K. V., Emin, O. N., Mitrokhin, V. T. Teoriya i raschyot aviacionnyh lopatochnykh mashin [Theory and calculation of aviation impeller machines]. Moscow. Mashinostroenie, 1986. – 432 p.
4. Shkabura, V. A. Gazoturbinnij dvigun i sposib jogo roboti [Gas turbine engine and how it works] Patent UA, № 84679, 2008.
5. Shkabura, V. A. Rezul'taty issledovanij turbinnoj i kompressornoj chastej turbokompressorov s obshhim rabochim kolesom dlja primenenija v malorazmernih gazoturbinnnyh dvigateljah [Results of analysis of turbine zone and compressor zone of turbo-compressor with the general driving wheel for small gas turbine engines]. Visnyk dvyhynobuduvannia – Bulletin engine, 2017, no. 2, pp. 118-121.
6. Shkabura, V. A. Issledovanie vlijanija peretekanija chasti gazovyh potokov na jeffektivnost' raboty turbokompressora s obshhim rabochim kolesom primentel'no k gazoturbinnym dvigateljam [Analysis gas overflowing of turbo-compressor with general impeller for gas turbine engines]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology, 2012, no. 7(94), pp. 114-118.

Поступила в редакцию 25.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТУРБІННОЇ ТА КОМПРЕСОРНОЇ ЧАСТИН ТУРБОКОМПРЕСОРА ІЗ СПІЛЬНИМ РОБОЧИМ КОЛЕСОМ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ У МАЛОРОЗМІРНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ

В. А. Шкабура

З метою розвитку двигунів і енергетичних установок розглянуті питання вдосконалення малорозмірних двигунів шляхом застосування в їх складі нового типу турбомашин – турбокомпресорів із спільним робочим колесом (ТКС). Наприклад, показана схема найбільш простого малорозмірного газотурбінного двигуна із застосуванням ТКС. Для систематизації порівняно ефективних схем ТКС, розроблена, і приведена в статті, класифікація можливих схем турбокомпресора із спільним робочим колесом. В основу класифікації покладено 5 можливих напрямків руху робочого середовища у лопатковому апараті – осьовий (паралельно осі обертання машини), відцентрове, доцентрове, діагональне і тангенціальне. Для здійснення тієї чи іншої схеми течії в РК необхідно підбирати відповідну форму лопаток робочого колеса і розташування соплового, випускного, всмоктуючого і нагнітального канали місцями. Турбокомпресори із спільним робочим колесом в залежності від напрямку руху газових потоків можуть мати дві схеми течії в міжлопатковій просторі РК – прямооточну і протитечіну. Якщо напрямки газового і повітряних потоків збігаються щодо осі обертання РК, то схема течії в ТКС прямотечіна, при протилежному русі потоків – протитечіна. Для проведення укрупненого газодинамічного розрахунку ТКС наведені формули, що дозволяють обчислити окружне зусилля, що виникає на лопатках робочого колеса у компресорному і у турбінному робочих каналах ТКС. Також наведені формули, з поправочними коефіцієнтами, для розрахунку коефіцієнта потужності компресорної частини і коефіцієнта навантаження турбінної частини. В процесі розрахункових і експериментальних досліджень отримана характеристика компресорної частини дослідної моделі ТКС. Результати випробувань компресорної частини дослідної моделі ТКС показали хороший збіг розрахункових і дослідних значень. Для роботи ТКС, як самостійного агрегату, важливо, щоб турбінний робочий канал виробляв необхідну потужність для роботи компресорного робочого каналу. Проведені дослідження показали, що турбокомпресор із спільним робочим колесом може бути використаний у складі малорозмірних газотурбінних двигунів і у системі турбонаддуву ДВЗ невеликої потужності з невисоким наддувом.

Ключові слова: турбокомпресор із спільним робочим колесом; малорозмірний двигун; компресорна частина; турбінна частина.

RESULTS OF ANALYSIS OF TURBINE ZONE AND COMPRESSOR ZONE OF TURBO-COMPRESSOR WITH GENERAL IMPELLER FOR SMALL GAS TURBINE ENGINES

V. A. Shkabura

It is considered the issues of improving small-sized engines through the application of a new type of turbomachines – turbo-compressors with general impeller (TCG) to develop engines and power plants. For example, it is shown a diagram of the simplest small-sized gas turbine engine using TCG. For the systematization of relatively efficient TCG schemes, a classification has been developed and is given in the article, of possible schemes for a turbocharger with a common impeller. The classification is based on 5 possible directions of movement of the working medium in the blade apparatus – axial (parallel to the axis of rotation of the machine), centrifugal, centripetal, diagonal and tangential. To implement one or another flowing pattern in the impeller, it is necessary to select the appropriate shape of the impeller blades and the location of the nozzle, exhaust, suction and discharge channels relative to each other. Depending on the direction of movement of the gas flows, turbo-compressors with a common impeller may have two flow patterns in interscapular impeller space – direct-flow and counter-flow. If the directions of the gas and airflow coincide concerning the axis of rotation of the impeller, then the flow pattern in the TCG is direct-flow, with opposite flow flows it is countercurrent. For carrying out the enlarged gas-dynamic calculation of TCG, formulas are given that make it possible to calculate the circumferential force arising on the blades of the impeller in the compressor and turbine working channels of the TCG. Also, formulas are given, with correction factors, for calculating the power factor of the compressor part and the load factor of the turbine part. In the process of computational and experimental studies, the characteristic of the compressor part of the TCG experimental model was obtained. The test results of the compressor part of the TCG experimental model showed good agreement between the calculated and experimental values. Studies have shown that a turbocharger with a common impeller can be used as part of small-size gas turbine engines and in a turbo-supercharging system of a small-capacity internal combustion engine with not high supercharging.

Keywords: of turbo-compressor with general impeller; compressor zone; turbine zone; of small gas turbine engine.

Шкабура Владимир Анатольевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. № 205, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Shkabura Vladimir Anatolievich – Candidate of Technical Science, senior staff scientist of department № 205, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: shkabura_v_a@ukr.net.