

УДК 621.438:621.515

В. А. ШКАБУРА

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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТУРБИННОЙ И КОМПРЕССОРНОЙ ЧАСТЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРА С ОБЩИМ РАБОЧИМ КОЛЕСОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*В целях развития двигателей и энергетических установок рассмотрены вопросы совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД) путём применения в их составе новых типов турбомашин, в частности, турбокомпрессора с общим рабочим колесом (ТКО). Приведены результаты исследования ряда параметров на эффективности работы компрессорной и турбинной частей ТКО применительно к ГТД. Для более детального исследования турбинной части ТКО проведен трёхмерный вязкий расчёт течения газа в ней. Для определения эффективности применения ТКО в составе ГТД представлены результаты термодинамического расчёта.*

**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. Всё 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 совершенствовать как 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 – турбокомпрессо-

ров 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 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 [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 расчёта 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].

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

В прямоточной схеме ТКО направление газового и воздушного потоков в осевом направлении совпадает, что позволяет значительно уменьшить время перехода из одного режима работы лопаток РК в другой (из компрессорного режима в турбинный и наоборот).

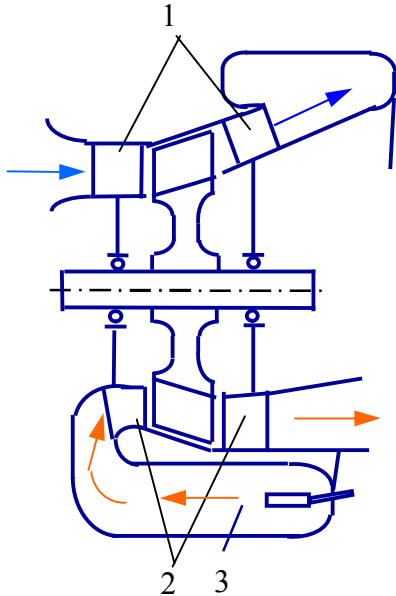


Рис. 1. Схема турбокомпрессора с общим рабочим колесом в качестве простого ГТД: 1 – компрессорная часть ТКО; 2 – турбинная часть ТКО; 3 – камера сгорания

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

Обеспечить близкие к оптимальной геометрии профили лопаток РК ТКО для компрессорного и турбинного режимов работы одновременно невозможно.

Осевые ступени компрессоров и турбин весьма чувствительны к геометрии профиля лопаток [9]. Радиальные и диагональные турбомашины по сравнению с осевыми машинами менее чувствительны к профилю лопаток. Для достижения приемлемой эффективности работы компрессорной части ТКО необходимо применять диагональное РК, чтобы в энергообмене между воздухом и лопатками РК участвовали кориолисовы силы [1, 2, 9]. Характер влияния изменения среднего диаметра в компрессорной части РК можно определить по коэффициенту

$$K_{\eta_d} = \eta_k^d / \eta_k.$$

На рисунке 2 показаны результаты исследований зависимости относительного КПД компрессорной части ТКО от изменения среднего диаметра в

РК. При сравнительно небольшой меридиональной кривизне рабочего канала в РК и  $D_2/D_1 = 1,35 \dots 1,5$  можно достигнуть наибольшей эффективности работы компрессорной части ТКО (напора и КПД).

Для использования центробежного эффекта при работе лопаток РК в компрессорном режиме и тем самым достижения их эффективной работы средний диаметр рабочего канала компрессорной части должен увеличиваться.

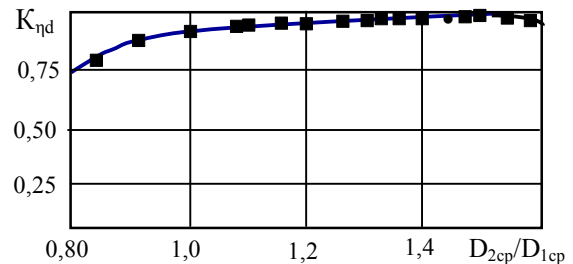


Рис. 2. Обобщённая зависимость относительного КПД компрессорной части ТКО от соотношения средних диаметров в РК

В основе модели для вычисления течения в РК использована система дифференциальных уравнений одномерного нестационарного течения газа.

На рисунке 3 показаны обобщённые результаты исследований влияния приведенной скорости  $\lambda_{c1}$  на выходе из соплового аппарата (СА) на величину относительного КПД турбинной части в ГТД. При небольших значениях  $\lambda_{c1} \leq 0,5$  энергообмен осуществляется неэффективно со значительным перетеканием газа через разделитель. При завышенной приведенной скорости  $\lambda_{c1}$  в турбинной части наблюдаются высокие гидравлические потери.

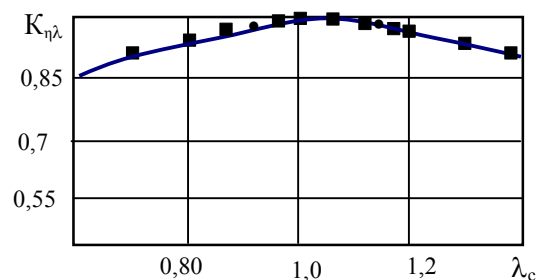


Рис. 3. Зависимость относительного КПД турбинной части ТКО от величины приведенной скорости на выходе из СА

Проведённые ранее исследования показали, что ТКО наиболее вероятно будет использоваться в малоразмерных ГТД или двигателях с высокой степенью повышения давления или там, где необходимо иметь простую конструкцию ГТД [5 - 8].

Для определения эффективности применения ТКО в составе ГТД в качестве исходного варианта выбран малоразмерный газотурбинный двигатель АИ-450. Компрессор двигателя – центробежный, высоконапорный, одноступенчатый. Турбина – осевая, реактивная, двухступенчатая, состоит из статора и ротора турбины компрессора, корпуса опор и ротора свободной турбины.

Исследования компрессора двигателя АИ-450 показали, что он довольно перегружен, и поэтому для достижения  $\pi_k^* = 10 \dots 12$  с КПД компрессора  $\eta_k^* = 0,78 \dots 0,8\%$  необходимо применять двухступенчатый центробежный компрессор, а для обеспечения работоспособности ГТД при температуре  $T_T^* = 1600 \dots 1650 \text{ К}$  целесообразно применить ТКО или надо значительно увеличить расход воздуха на охлаждение турбины. На рис. 4 показана схема размещения ТКО в газотурбинном двигателе.

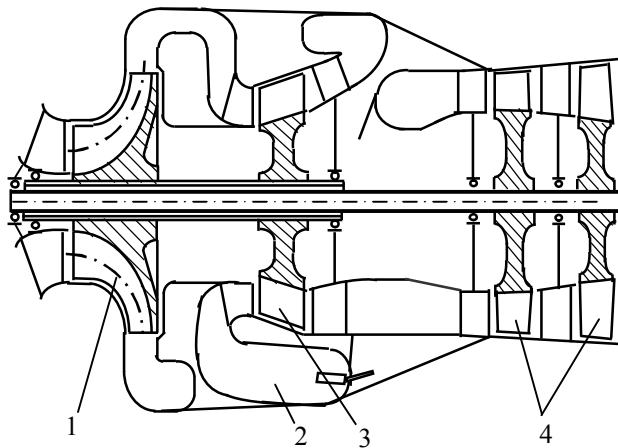


Рис. 4. Схема газотурбинного двигателя с ТКО:  
1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – ТКО;  
4 – силовая турбина

Предыдущие исследования показали [4 - 6], что турбинная часть ТКО может эффективно работать

при довольно больших перепадах давления  $\pi_T = 3 \dots 3,5$ . Поэтому для привода компрессора с  $\pi_k^* = 9 \dots 12$  достаточно лишь турбинной части ТКО.

Для более детального исследования движения газовых потоков в компрессорной и турбинной частях ТКО были проведены численные исследования. Для этого выполнен трехмерный вязкий расчет турбины компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя (рис. 5) и турбинной части ТКО (рис. 6) с помощью программного продукта FlowER.

На рисунке 5 показаны результаты расчета трехмерного течения вязкого газа в ступени турбины исходного ГТД, на рис. 6 приведены результаты расчета трехмерного течения вязкого газа в турбинной части ТКО в качестве турбины компрессора ГТД.

Для проведения сравнительных расчетов приняты одинаковые параметры газа перед турбиной:

$$T_T^* = 1422 \text{ К}; p_T^* = 7 \cdot 10^5 \text{ Па}; G_T = 1,60 \text{ кг/с}.$$

Согласно расчетам оба варианта турбины компрессора имеют одинаковую степень понижения полного давления  $\pi_{TK}^* = 3$ .

По результатам трехмерных расчетов изменение параметров (относительно исходной турбины) составили:

- угла атаки на рабочую лопатку –  $\Delta\beta_1 = +3,21$  град;
- степени реактивности –  $\Delta p = -0,0485$ ;
- угла выхода потока –  $\Delta\alpha_2 = +15,6$  град;
- КПД турбины (по полному давлению на выходе) –  $\Delta\eta_T^* = -0,0755$ .

По сравнению с исходной турбиной в проточной части РК ТКО есть область, где нет обтекания газом лопаток. Это является причиной увеличения потерь энергии и снижения КПД турбинной части.

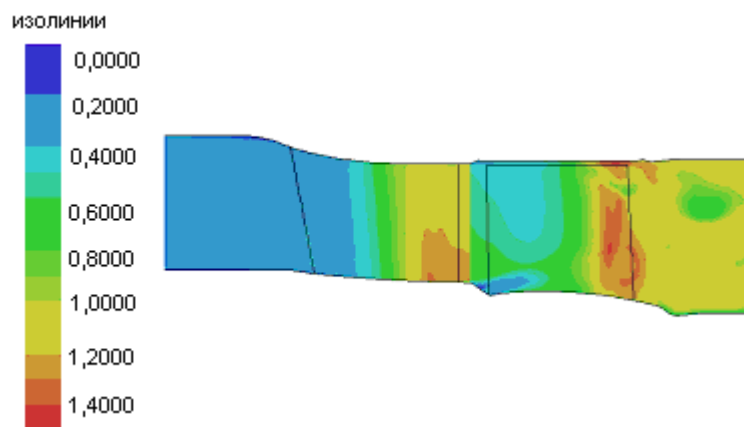


Рис. 5. Распределение чисел Маха в меридиональной плоскости турбины ГТД

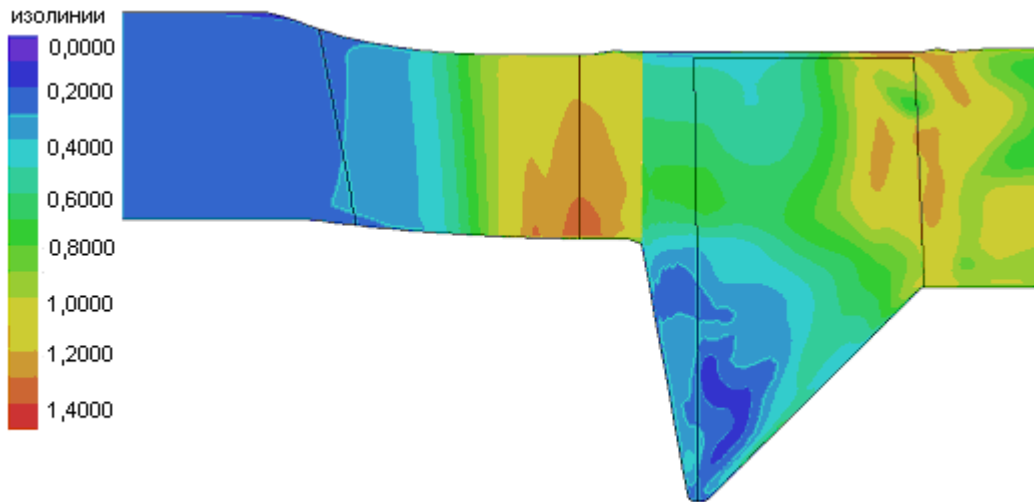


Рис. 6. Распределение чисел Маха в меридиональной плоскости турбинной части ТКО

С помощью формул, приведенных ранее [5, 10], определена средняя температура лопаток РК для ГТД с ТКО при  $\pi_K^* = 11,6$  и температуре газа перед турбиной  $T_T = 1600\text{ K}$ . В области входной кромки она составляет  $\bar{T}_{\text{вх.л}} = 950\text{ K}$ , у выходной кромки она немного ниже –  $\bar{T}_{\text{вых.л}} = 938\text{ K}$ .

В современных программных продуктах, как правило, предусмотрены средства оптимизации геометрических параметров расчетной области (в частности, модуль Optimus в пакете FlowER). При этом пользователь должен поставить задачу оптимизации, т.е. указать параметры оптимизации, допустимый диапазон их изменения, прочие ограничения и целевую функцию, а также метод оптимизации. На каждом шаге оптимизации программа полностью выполнит численный расчет течения в рабочей области с соответствующим набором геометрических параметров. К сожалению, время расчета при этом оказывается чрезвычайно большим, что затрудняет сегодня широкое использование такого подхода на практике.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что турбокомпрессор с общим рабочим колесом может быть использован в газотурбинных двигателях.

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 увеличения степени повышения давления и температуры газа перед турбиной.

При переходе лопаток РК из компрессорного режима работы и наоборот возникают потери энергии газа вследствие выравнивания полей скоростей и давлений в потоке газа.

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

При создании газотурбинного двигателя с ТКО приходится решать ряд принципиально новых и непростых задач, отличных от уже решенных в области авиационных двигателей с традиционными схемами и турбомашинами.

### Литература

1. Холщевников, К. В. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин [Текст] / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.
2. Кулагин, В. В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] : Кн. 3. Основные проблемы / В. В. Кулагин. – М. : Машиностроение, 2005. – 464 с.
3. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст] : учеб. / 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. МКІІ<sup>7</sup>. F02 K3/00. Газотурбинний двигун і спосіб його роботи [Текст] / Шкабура В. А. (Україна) ; Заявник та патентовласник Шкабура В. А. ; заявл. 01.12.2004 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. – 5 с.
5. Шкабура, В. А. Исследование вариантов

применения турбокомпрессора нового типа в газотурбинных двигателях на общих опорах качения [Текст] / В. А. Шкабура, С. И. Пшеничных // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8/44. – С. 103–106.

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. Исследование турбокомпрессоров с общим рабочим колесом для применения в малоразмерных газотурбинных двигателях [Текст] / В. А. Шкабура // *Вестник двигателестроения*. – 2011. – № 2(25). – С. 9–13.

9. Овсянников, Б. В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б. В. Овсянников, Б. И. Боровский. – М. : Машиностроение, 1986. – 376 с.

10. Локай, В. И. Газовые турбины двигателей ЛА: Теория, конструкция и расчёт [Текст] / В. И. Локай, М. К. Максимова, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.

*Поступила в редакцию 6.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. 202 В. Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

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

*В. А. Шкабура*

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 ГТД проведено розрахунково-конструкторські дослідження. У даній статті наведено результати розрахунків впливу співвідношення середніх діаметрів у робочому каналі на ефективність роботи компресорної частини ТКС і приведеної швидкості газу на виході із соплового апарату на ККД турбінної частини ТКС.

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

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

*V. A. Shkabura*

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.

**Шкабура Владимир Анатольевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. № 205, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: shkabura\_v\_a@mail.ru.