

УДК 621. 452:621.515

Е.С. Барышева

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СТУПЕНИ НА ЕЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Исследованы различные варианты геометрических параметров центробежной ступени компрессора авиационного двигателя с помощью метода поверочного расчета и соответствующего программного комплекса АхСВт, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ». Показано влияние радиальной протяженности и ширины безлопаточного участка диффузора, а также угла установки лопатки лопаточного диффузора на структуру течения и суммарные характеристики ступени. Представлены подходы к улучшению согласования элементов центробежной ступени и расширение ее рабочего диапазона.

Ключевые слова: центробежная ступень компрессора, лопаточный диффузор, геометрические параметры, метод расчета осесимметричного до- и трансзвукового течения, суммарные характеристики, структура течения

Введение

В конструкции современных авиационных двигателей широкое применение находят центробежные ступени компрессоров. Такие ступени при достаточно высоком уровне КПД характеризуются высокими значениями степени повышения давления и большими расходами рабочего тела, что в свою очередь определяет появление транс- и сверхзвуковых скоростей в межлопаточных каналах рабочих колес (РК) и лопаточных диффузоров (ЛД).

Взаимодействие между этими элементами центробежной ступени во многом определяет характер течения и существенно влияет на характеристики данных узлов компрессора, что в свою очередь создает проблему согласования РК и ЛД и обеспечения достаточного диапазона работы всей ступени в целом.

Возможность численного моделирования течения в центробежных ступенях позволяет повысить качество их проектирования, а также снизить сроки и затраты, необходимые для создания новых объектов, их доводку и дальнейшую модернизацию.

На этих этапах большую роль играют варианты расчеты [1, 2, 3], включающие анализ влияния изменения геометрических параметров на газодинамические характеристики ступени и позволяющие определить направление совершенствования ее конструкции для повышения эффективности.

В данной статье представлены некоторые результаты параметрических исследований центробежной ступени компрессора высокого давления авиационного двигателя [4], проведенных в про-

блемной лаборатории газотурбинных двигателей и установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», и направленных на определение влияния различных конструктивных факторов, таких как изменение ширины и угла установки лопатки ЛД, а также радиальной протяженности безлопаточного участка диффузора на суммарные характеристики ступени и структуру течения в ней.

1. Метод расчета и постановка задачи

Для проведения вариантных расчетов использован разработанный в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» метод поверочного расчета параметров осесимметричного течения в высоконапорных центробежных компрессорных ступенях с осерадиальными лопатками рабочих колес [5]. Данный метод и соответствующий ему программный комплекс (ПК) АхСВт собственной разработки позволяют определять суммарные характеристики ступени и структуру осредненного в окружном направлении трансзвукового течения, учитывать влияние отбора рабочего тела из проточной части и поля параметров потока на входе.

Данный ПК АхСВт верифицирован на различных объектах [5] и показана его пригодность для решения задач совершенствования центробежных ступеней [3, 6].

В процессе проектирования и доводки центробежных компрессорных ступеней авиационных ГТД для осуществления выбора рациональных значений геометрических параметров лопаток и проточных частей для до- и трансзвуковых режимов работы используются варианты расче-

ты, позволяющие определить влияние различных геометрических параметров на суммарные характеристики ступеней.

В данной работе представлены результаты исследования влияния изменения ширины и угла установки лопатки ЛД, а также радиальной протяженности безлопаточного участка диффузора.

2. Проведение численных исследований

В работе [4] представлены результаты численного исследования трансзвукового течения в центробежной ступени компрессора авиационного двигателя.

Исследуемая ступень включает в себя РК, ЛД, поворотное колено и спрямляющий аппарат в соответствии со схемой [4]. Как показали предыдущие исследования данной ступени, причиной сужения ее рабочего диапазона является лопаточный диффузор.

В процессе выполнения представленных ниже исследований геометрические параметры лопаток, как рабочего колеса, так и лопаточного диффузора не изменяются.

Для исключения влияния поворотного канала и спрямляющих аппаратов на течение в ЛД параметрические исследования проведены для участка 1-4 (РК+ЛД).

2.1. Влияние радиальной протяженности безлопаточного участка диффузора

Для определения влияния радиальной протяженности безлопаточного участка диффузора на структуру течения и суммарные характеристики рассматриваемой ступени при фиксированной геометрии профиля лопатки ЛД рассмотрены два варианта положения входной кромки ЛД относительно выхода из РК (рис.1), то есть

$$\bar{D}_3 = D_3 / D_2 :$$

- «исходный» вариант $\bar{D}_3 = 1,1$;
- «модернизированный» вариант с $\bar{D}_3 = 1,13$.

На рис. 2 представлена суммарная характеристика участка ступени с различными \bar{D}_3 . Уменьшение загромождения межлопаточного канала при увеличении \bar{D}_3 ($\bar{D}_3 = 1,13$) по сравнению с исходным вариантом $\bar{D}_3 = 1,1$ при высоких уровнях скоростей привело к увеличению проходного сечения межлопаточного канала и, как следствие, к расширению рабочего диапазона ступени при смещении максимума КПД в сторону больших расходов. При этом на режиме $\bar{G}_{впр} = 1,0$, $\bar{n}_{пр} = 1,0$ степень повышения полного давления π_{1-4}^* возросло на 2.5% и η_{1-4}^* – на 2.6% по сравнению с «исходным» вариантом.

На рис. 3 представлены распределения чисел Маха в абсолютном движении вдоль средней по высоте лопатки продольной линии сетки на режиме $\bar{G}_{впр} = 0,96$, $\bar{n}_{пр} = 1,0$. На этом режиме в «исходном» варианте ЛД наблюдается сверхзвуковая зона с $M_{max} > 1,2$ и замыкающий ее скачок уплотнения. Для «модернизированного» варианта ЛД на этом же режиме сверхзвуковые скорости отсутствуют.

Проведенные исследования показали, что при равных условиях более выгодным с точки зрения обеспечения заданного напора и КПД ступени является лопаточный диффузор максимально удаленный от выходных кромок РК, что качественно согласуется с результатами, представленными в [7].

2.2. Влияние b_3/b_2 лопаточного диффузора

Одним из геометрических параметров лопаточного диффузора, оказывающим влияние на газодинамические параметры ступени, является относительное расширение диффузора $\bar{b}_3 = b_3 / b_2$. Для исследования его влияния зафиксированы параметры лопаточных венцов РК и ЛД, а ширина на входе в лопаточный диффузор является переменной $\bar{b}_3 = \text{var}$ при $\bar{n}_{пр} = 1,0$.

На рис. 4 представлены результаты расчетного исследования элемента ступени с лопаточными диффузорами, имеющими разную ширину на входе: $\bar{b}_3 = 0,905$ («исходный») и 1,1 («модернизированный»).

При «исходном» варианте лопаточного диффузора ($\bar{b}_3 = 0,905$) ступень имеет самую узкую зону рабочих режимов по расходу при заданной частоте вращения.

Расчетное исследование показало, что при увеличении b_3/b_2 суммарная характеристика ступени на данной частоте вращения становится более пологой. При этом происходит ее смещение в область больших расходов, а зона рабочих режимов расширяется. Более высокое значение КПД достигнуто при $b_3/b_2 = 1,1$, т.е. при меньшей скорости потока на входе в лопаточный диффузор. При малых b_3/b_2 увеличивается крутизна характеристик, уменьшается область рабочих режимов по расходу и оптимальный режим приближается к левой границе.

Следует отметить, что рост \bar{b}_3 вызывает повышение диффузорности безлопаточного участка диффузора, что может привести к росту потерь.

Результаты расчетного исследования влияния относительного расширения диффузора на характеристику удовлетворительно согласуются с имеющимися в литературе данными, полученные для стационарных центробежных машин [7, 8].

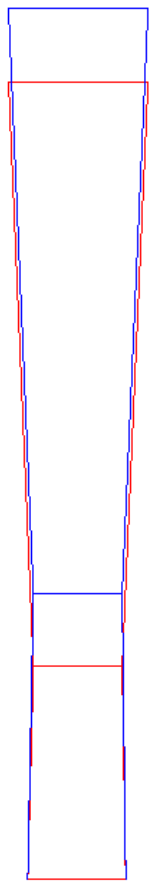


Рис. 1. Изменения расположения ЛД в проточной части

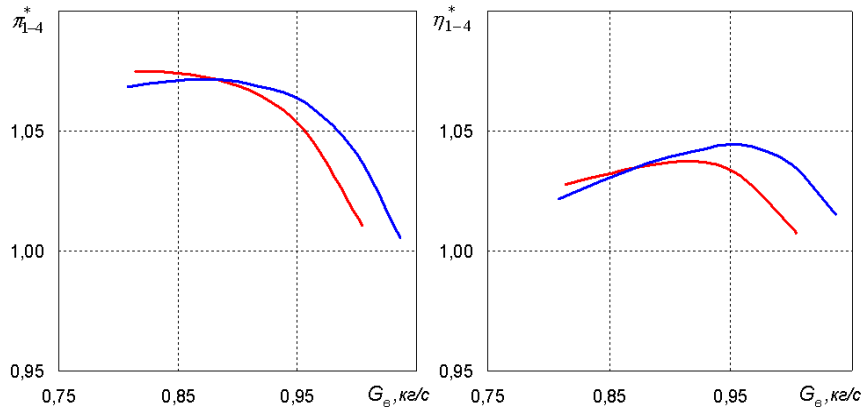


Рис. 2. Суммарная характеристика участка ступени с различными \bar{D}_3

- "исходный" вариант ($\bar{D}_3 = 1,1$);
- "модернизированный" вариант ($\bar{D}_3 = 1,13$)

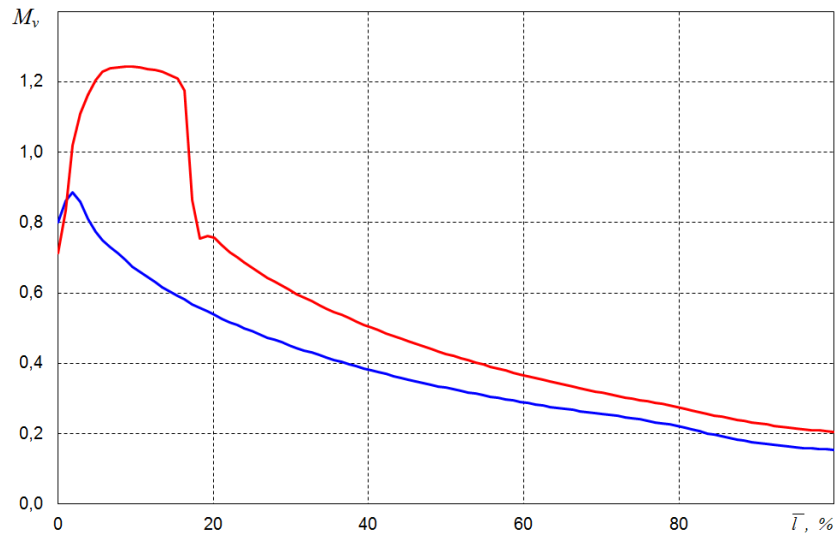


Рис. 3. Распределения чисел Маха в абсолютном движении в ЛД вдоль средней по высоте лопатки продольной линии сетки на режиме $\bar{G}_{впр} = 0,96$

- "исходный" вариант ($\bar{D}_3 = 1,1$);
- "модернизированный" вариант ($\bar{D}_3 = 1,13$)

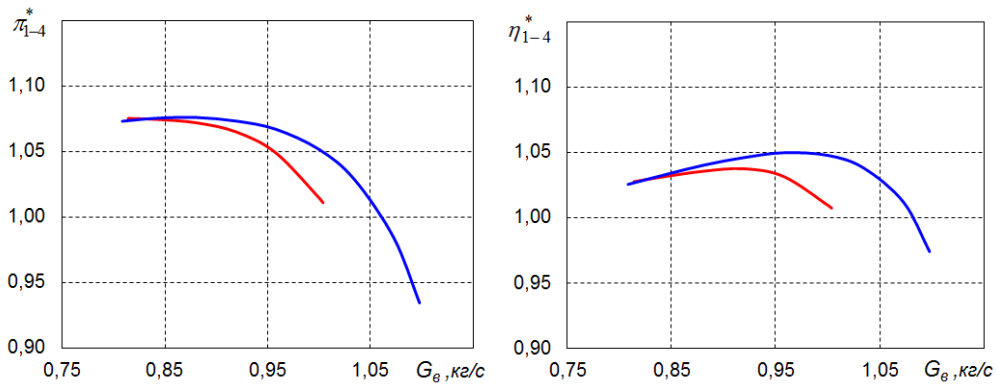


Рис. 4. Суммарная характеристика участка ступени с различными b_3/b_2

- "исходный" вариант ($\bar{b}_3 = 0,905$);
- "модернизированный" вариант ($\bar{b}_3 = 1,1$)

2.3. Влияние угла установки лопаток ЛД

Ниже представлены результаты численного моделирования течения в исследуемой ступени при изменении угла установки лопаток ЛД. Изменение угла установки лопаток диффузора $\Delta\gamma$ составило один градус от исходного положения. Профиль лопатки ЛД поворачивался вокруг точки, лежащей в центре ее носика (рис. 5). Это привело к изменению не только геометрических углов профиля на входе и выходе, но и диаметра D_4 .

Проведенные расчеты показали, что изменение положения лопаток диффузора оказывает значительное влияние на суммарную характери-

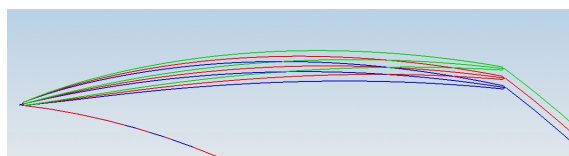


Рис. 5. Схема изменения угла установки ЛД

- $\Delta\gamma_3 = 0$ град;
- $\Delta\gamma_3 = 1$ град;
- $\Delta\gamma_3 = -1$ град

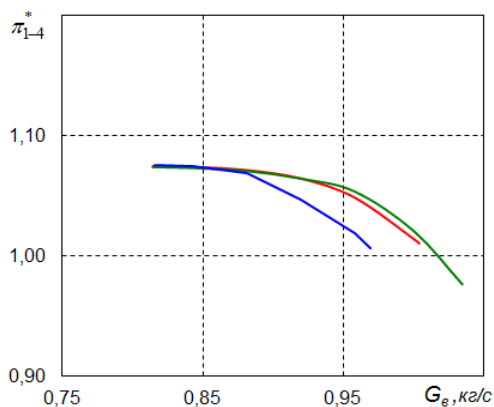


Рис. 6. Суммарная характеристика участка ступени с различными углами установки лопаток ЛД

- $\Delta\gamma_3 = 0$ град;
- $\Delta\gamma_3 = 1$ град;
- $\Delta\gamma_3 = -1$ град

стику участка ступени (рис. 6), смещая ее по расходу и меняя уровни максимальных значений КПД и степени повышения полного давления.

Увеличение угла установки приводит к росту входного угла лопаток ЛД $\alpha_{3л}$, а, следовательно, и к повышению значений напора и КПД и расширению рабочего диапазона в сторону больших расходов, что вызвано возрастанием площади горла межлопаточного канала лопаточного диффузора (рис.7). Существенным недостатком такого способа является увеличение радиального размера D_4 , что может быть недопустимым для данной ступени.

После поворота лопаток ЛД на 1 град в сторону меньших углов $\alpha_{3л}$ пропускная способность ступени, определяемая диффузором, снижается, что приводит к уменьшению максимального расхода на $\approx 0,2 \text{ кг/с}$, и сужается диапазон рабочих режимов (см. рис.6). Более резко сужение области рабочих режимов при уменьшении угла установки профиля вызвано как уменьшением площади горла межлопаточного канала (см. рис.7), так и увеличением в этом случае загромождения канала.

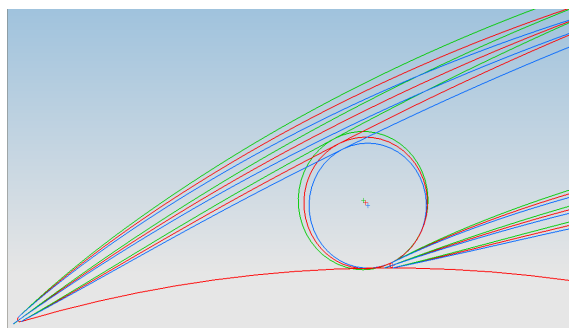


Рис. 7. Схема изменения горла межлопаточного канала лопаточного диффузора

- $\Delta\gamma_3 = 0$ град;
- $\Delta\gamma_3 = 1$ град;
- $\Delta\gamma_3 = -1$ град

Заключение

В статье представлены результаты вариантных расчетов трансзвукового течения в центробежной ступени компрессора авиационного двигателя. Показана возможность модернизации таких ступеней путем изменения геометрических параметров лопаточных венцов с помощью ПК АхСВм.

Полученные результаты показывают, что вариантные расчеты могут служить основой для совершенствования как ступени в целом, так и отдельных ее элементов.

Проведенные исследования показали, что для данной ступени изменения геометрических параметров лопаточного диффузора, таких как уве-

личение угла установки, расширение входной части ЛД либо рост радиальной протяженности безлопаточного участка диффузора позволят повысить параметры ступени и расширить ее рабочий диапазон без существенных изменений в процессе производства.

Литература

1. Русанов А.В. Проблемы численного моделирования трехмерных вязких течений в осевых и центробежных компрессорах [Текст] / А.В. Русанов, С.В. Ершов // XIII Междунар. науч.-техн. конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». – Сумы, 2004. – С. 108-117.
2. Сравнение эффективности центробежных компрессорных ступеней с лопаточными и безлопаточными диффузорами [Текст] / [Ю.Б. Галеркин, Л.И. Козаченко, В.П. Митрофанов, В.И. Зарав, А.Ю. Прокофьев] // XIII Междунар. науч.-техн. конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». – Сумы, 2004. – С. 142-155.
3. Газодинамическое совершенствование высоконапорной центробежной компрессорной ступени современного авиационного двигателя

[Текст] / Барышева Е.С., Бойко Л.Г., Дрынов О.Н., Кубакин В.В. // Вестник двигателестроения. – 2010.- №2 – С. 86-90.

4. Барышева Е.С. Исследование структуры течения в центробежной ступени компрессора авиационного двигателя [Текст] / Е.С. Барышева, Л.Г. Бойко, В.С. Борисов, О.Н. Дрынов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008.- №3(50) – С.56-62.

5. Барышева Е.С. Метод расчета течения в центробежных компрессорах с осерадиальными пространственными лопатками [Текст] / Е.С. Барышева, Л.Г. Бойко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007.- №1(37) – С.45-51.

6. Бойко Л.Г. Исследование трансзвукового течения в высоконапорном центробежном рабочем колесе [Текст] / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева // Вестник двигателестроения. – 2011.- №2 – С. 203-207.

7. Селезнев, К.П. Центробежные компрессоры [Текст] / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин. – Л.: Машиностроение, 1982.– 271с.

8. Лившиц С.П. Аэродинамика центробежных компрессорных машин [Текст] / С.П. Лившиц – Л.: Машиностроение, 1966.– 340с.

Поступила в редакцию 18.06.2012

О.С.Барышева. Дослідження впливу геометричних параметрів відцентрового ступеня на його газодинамічні характеристики

Досліджено різні варіанти геометричних параметрів у відцентровому ступені компресора авіаційного двигуна за допомогою методу перевірного розрахунку та відповідного програмного комплексу AxСВт, розроблених в Національному аерокосмічному університеті «ХАІ». Показано вплив радіальної протяжності та ширини безлопаткової ділянки диффузора, а також кута установки лопатки лопаткового диффузора на структуру течії та сумарні характеристики ступеня. Представлені підходи до поліпшення узгодження елементів відцентрового ступеня і розширення його робочого діапазону.

Ключові слова: відцентровий ступінь компресора, лопатковий дифузор, геометричні параметри, метод розрахунку осьосиметричної до- і трансзвукової течії, сумарні характеристики, структура течії.

H.Barysheva. The research of influence of centrifugal stage geometrical parameters on its gasdynamic performances

Different variants of geometrical parameters of aviation engine compressor centrifugal stage were explored with assistance of the test prediction calculation method and proper software AxСВт, developed in the National aerospace university «KhAI». Influence of radial length and width of diffuser vaneless part and also stagger angle of vaned diffuser vane on the flow structure and stage summary performances. Approaches to the improvement of centrifugal stage elements agreement and expansion of its working range are presented.

Key words: compressor centrifugal stage, vaned diffuser, geometrical parameters, sub- and transonic axisymmetric flow calculation method, summary performances, flow structure.