

УДК 621.45.037: 533.6

Бойко Л.Г.¹, Демин А.Е.¹, Максимов Ю.П.¹, Пижанкова Н.В.¹, Басов Ю.Ф.²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков,
²ОАО «Мотор Сич», г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОНАПОРНОГО РАБОЧЕГО КОЛЕСА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ЕГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлены результаты численного исследования с помощью программного комплекса AxSym_M влияния на структуру течения в высоконапорном рабочем колесе (РК) осевого компрессора стреловидности лопатки и формы меридиональных обводов проточной части. Показано, что смещение линии центров тяжести профилей периферийного сечения вдоль линии хорды в направлении противоположном течению позволяет уменьшить по сравнению с исходным вариантом РК значение M_w на входе и его максимальное значение в межлопаточном канале, что приводит к повышению КПД. Использование конической и S-образной формы поверхности втулки дает возможность повысить нагруженность втулочных сечений, а поджатие потока за счет формы поверхности корпуса позволяет изменить положение скачка уплотнения в межлопаточном канале и степень диффузорности течения.

Ключевые слова: высоконапорное рабочее колесо осевого компрессора, численное исследование, стреловидность лопатки, меридиональные обводы.

Введение

Проектирование компрессорных ступеней, имеющих высокие степени повышения давления, является сложной инженерной задачей. Подходы, используемые при их проектировании, не позволяют сделать общие выводы о влиянии изменения геометрических параметров лопаточных венцов на интегральные значения газодинамических параметров ступеней: степени повышения полного давления ($\pi_{ст}^*$), изоэнтропического коэффициента полезного действия ($\eta_{ст}^*$), запаса устойчивости (ΔK_v) и т.д. Поэтому в целях накопления такой информации в каждом конкретном случае целесообразно проведение численных параметрических исследований.

Разработанный на кафедре теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е.Жуковского «ХАИ» метод поверочного расчета до-, транс- и сверхзвукового течения в ступени осевого компрессора и соответствующий программный комплекс (ПК) AxSym_M [1, 2] использованы для проведения вычислительных экспериментов.

В статье представлены результаты численного исследования влияния изменения геометрических параметров высоконапорного рабочего коле-

са осевого компрессора: стреловидности лопатки и формы меридиональных обводов проточной части на структуру течения и суммарные газодинамические параметры. В качестве объекта для проведения численных экспериментов выбран венец рабочего колеса высоконапорной компрессорной ступени и создана его математическая модель.

1. Математическая модель исходного лопаточного венца

Под математической моделью лопаточного венца понимается совокупность геометрических параметров исследуемого объекта, представленных в виде исходных данных для проведения поверочного расчета с помощью используемого комплекса программ, и результатов расчета суммарных характеристик и структуры течения в широком диапазоне режимов работы по расходу и частоте вращения.

Геометрические параметры лопаточного венца, выбранного для проведения численного исследования с помощью ПК AxSym_M, полученные с помощью твердотельного моделирования.

Исходными данными при построении математической модели пера лопатки являются ко-

ординаты средней линии профиля и распределение толщины вдоль хорды в сечениях, расположенных на различных радиусах, углы установки, радиусы входных и выходных кромок, координаты меридиональных обводов проточной части и входных кромок лопаточного венца, а также величина радиального зазора.

Математическая модель содержит в себе результаты расчета суммарных газодинамических характеристик в широком диапазоне режимов по частотам вращения и расходу, сведения о структуре течения в виде изолиний параметров осредненного в окружном направлении течения: чисел Маха, давлений, температур, распределения параметров потока вдоль линий сетки в продольном и поперечном направлениях, в том числе на входных и выходных кромках лопаток.

Удобство использования данной математической модели состоит в том, что при необходимости с ее помощью оперативно могут быть проведены численные эксперименты, в том числе и параметрические исследования. Далее данный лопаточный венец может быть использован в качестве начального приближения в процессе проектирования.

2. Параметрические исследования

2.1 Объект исследования

Численные эксперименты проведены на тестовом рабочем колесе, получившем название РК0. Данное колесо обеспечивает на «расчетном» режиме по расходу при $\bar{n}_{пр} = 1$ степень повышения давления $\pi_{рк}^* = 2.6$. На рис. 1 показана твердотельная модель лопатки, выполненная с использованием современного CAD пакета.

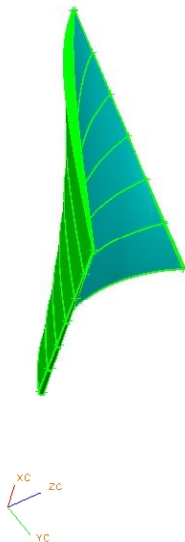


Рис. 1. Твердотельная модель лопатки тестового рабочего колеса

Рассматриваемое перо лопатки построено с помощью перемещения прямой линии по контурам двух «опорных» сечений – втулочного и периферийного. Изменение геометрических параметров одного из сечений приводит к изменению формы лопатки в целом. Исследования проводились на «расчетном» режиме по расходу и частоте вращения ротора ($\bar{G}_{пр} = 1, \bar{n}_{пр} = 1$).

2.2. Исследование влияния изменения стреловидности лопатки РК

На «расчетном» режиме по расходу и частоте вращения исследовано влияние на течение в тестовом РК выноса профиля лопатки против потока вдоль хорды (его стреловидности). Входная кромка профиля каждого сечения смещена относительно исходного положения вдоль линии установки в направлении противоположном течению, см. рис. 2. Величины выноса для различных сечений по высоте определялись периферийным сечением и линейной зависимостью осевой проекции выноса от радиуса. Величины смещения профилей периферийного сечения для рассмотренных вариантов лопаточных венцов приведены в таблице 1.

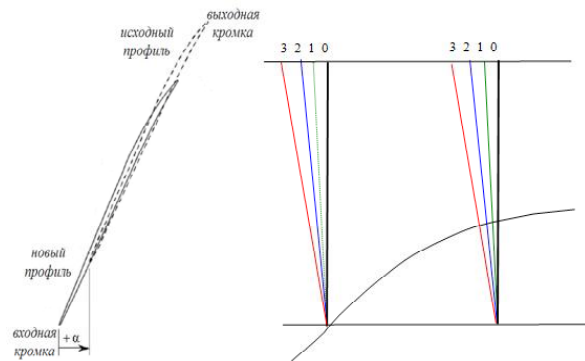


Рис. 2. Изменение стреловидности лопатки РК

Таблица 1
Смещение профилей периферийного сечения

	Смещение периферийного сечения лопатки, %	
	вдоль хорды	осевое
РК0	0.0	0.0
РК01	4.31	2.29
РК02	8.62	4.62
РК03	12.93	6.93

На рис. 3а показано смещение профиля периферийного сечения лопатки РК для представленных вариантов. На рис. 3б приведены соответствующие распределения углов натекания и осевой составляющей скорости на входе в РК по радиусу. Из рисунков следует, что при пере-

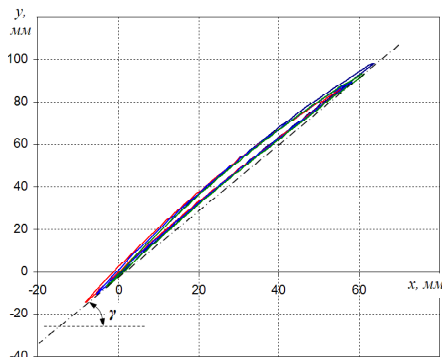
мещении пера лопатки вдоль линии хорды против течения меняется поле скоростей потока, набегающего на лопатку. В связи с этим изменяются углы натекания, причем, чем больше смещается входная кромка лопатки, тем больше наблюдаемые отличия по углу натекания от варианта РК0. Рост углов натекания ведет к увеличению степени повышения полного давления, диффузорности течения как в периферийном, так и в среднем сечениях и, как следствие, к снижению запасов газодинамической устойчивости лопаточного венца. Кроме того, с ростом стреловидности снижается число Маха на входе в решетку периферийного сечения исследуемой лопатки и максимальное его значение внутри межлопаточного канала, следствием чего является некоторое увеличение КПД. Результаты расчета суммарных газодинамических параметров рабочего колеса: степени повышения полного давления π^* и КПД, числа Маха в относительном движении и угла натекания на входе в решетку, числа Маха потока в абсолютном движении вблизи втулки на выходе их РК, а также максимальное значение числа Маха в межлопаточном канале в среднем (ср) и периферийном (н) сечениях представлены в таблице 2.

Таблица 2

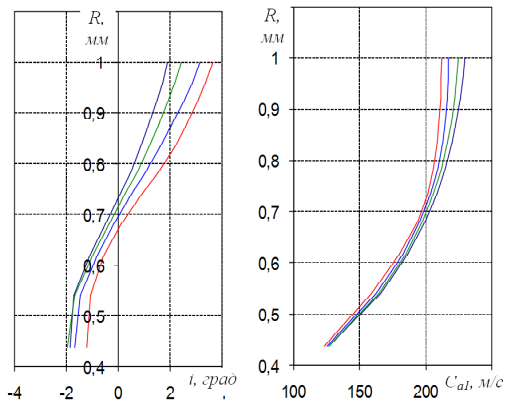
Газодинамические параметры рабочих колес с различной стреловидностью

	π^*	η^*	$M_{w1н}$	i_n , град	$M_{с2}$	M_{wmax}
РК0	2.62	0.88	1.647	1.913	0.945	1.658
РК01	2.65	0.887	1.637	2.44	0.97	1.62
РК02	2.71	0.893	1.622	3.17	0.978	1.6
РК03	2.76	0.9	1.61	3.67	0.982	1.6

С целью сохранения угла натекания на лопатку близким к варианту РК0 проведена корректировка углов установки периферийных сечений РК РК02 и РК03, в результате чего получены варианты рабочего колеса, названные ниже РК02m и РК03m соответственно.



а) профили периферийного сечения пера лопатки



б) угол натекания и меридиональная составляющая скорости

Рис.3. Влияние стреловидности лопатки РК на структуру течения в лопаточном венце:
 — РК0, — РК01,
 — РК02, — РК03.

На рис. 4 б) представлено распределение чисел Маха вдоль периферийной линии тока для рассмотренных вариантов стреловидности (при наличии и отсутствии подворота периферийного сечения). Схема, приведенная на рис. 4 а, позволяет оценить характер смещения скачка уплотнения в межлопаточном канале.

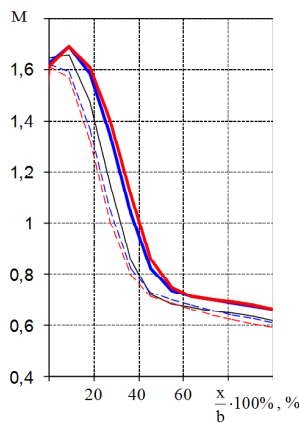
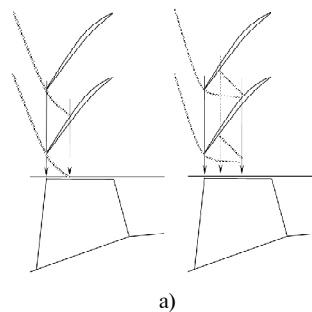


Рис. 4. Распределение чисел Маха вдоль линии тока в периферийном сечении РК на «расчетном» режиме

— РК0,
 — РК03 с коррекцией (ПК03m),
 - - - РК03 без коррекции,
 — РК02 с коррекцией (ПК02m),
 - - - РК02 без коррекции

Использование стреловидности профиля периферийного сечения при его подвороте под угол натекания (РК02м, РК03м), близкий к соответствующему углу в исходном варианте колеса (РК0), позволяет сместить скачок внутрь канала, а кроме того, весьма существенно снизить степень диффузорности течения как на периферии, так и на среднем радиусе при некотором увеличении максимального числа M_W по сравнению с вариантами без подворота профиля.

2.3. Влияние формы поверхности втулки

Проведено численное исследование влияния формы втулочной поверхности на характер течения в рабочем колесе. На рис. 5 а показаны различные варианты исполнения втулочной поверхности: 1 — выпуклая (РК0), 2 — коническая (РК0С), 3 — вогнуто-выпуклая (РК0S). Геометрические параметры пера лопатки оставались неизменными (соответствующими базовому варианту РК0). На рис. 5б приведены распределения углов натекания на лопатку РК по высоте, соответствующие этим вариантам. Из рисунка видно, что изменение исходной формы втулочной поверхности на коническую и вогнуто-выпуклую существенно догружает втулочные сечения, увеличивая углы натекания в этой области, а также по всей высоте лопатки. Такое изменение обтекания втулочной поверхности является следствием перестроения потока на входе в РК.

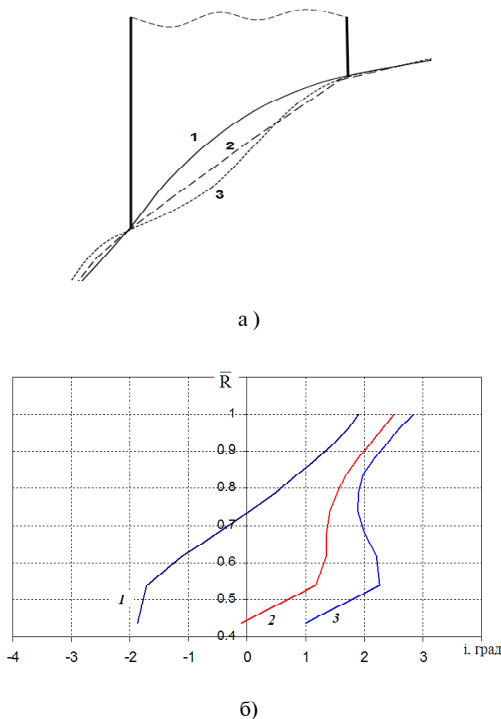


Рис. 5. Варианты исполнения втулочной поверхности РК (а) и соответствующие им распределения углов натекания потока на лопатку по высоте РК (б)

Очевидно, что при изменении формы втулочной поверхности меняется поле скоростей набегающего потока. В связи с увеличением нагрузки во втулочных сечениях разгружаются сечения у концов лопатки. Поэтому в вариантах РК0С и РК0S при одном и том же расходе уменьшаются максимальные значения M_W в межлопаточном канале на периферии по сравнению с вариантом РК0.

На рис. 6 представлены распределения чисел Маха вдоль периферийной (рис. 6а) и втулочной (рис. 6б) линий тока. Следует отметить, что для вариантов РК0С и РК0S скорость на втулке — дозвуковая на всем протяжении РК.

При этом максимальные значения относительной скорости на периферии смещаются ко входу в межлопаточный канал, что на основании принятого допущения об осесимметричности течения позволяет предположить наличие выбитого скачка уплотнения и, соответственно, снижение запасов устойчивости колеса.

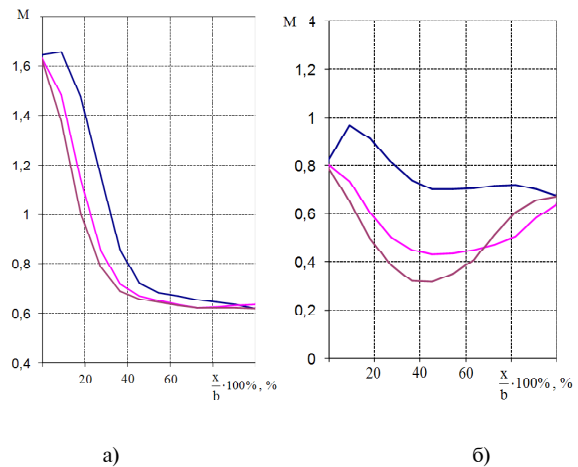


Рис. 6. Распределение чисел Маха вдоль линии тока в периферийном (а) и втулочном (б) сечениях при различных формах втулочной поверхности проточной части
— РК0, — РК0С, — РК0S

Таким образом, для высоконапорных ступеней осевых компрессоров, имеющих малые удлинения, выбор формы втулочной поверхности оказывает существенное влияние на структуру течения по всей высоте лопатки. При этом увеличение нагрузки на втулочные сечения и радиальное перестроение потока приводят к снижению π^* в области периферии. На основании анализа значений интегральных параметров ступени можно сделать вывод о том, что для обеспечения наибольших запасов газодинамической устойчивости исследуемого рабочего колеса целесообразным является использование выпуклой формы втулочной поверхности (вариант РК0).

2.4. Влияние формы поверхности корпуса

Проведено численное исследование влияния формы поверхности корпуса на характер течения в тестовом рабочем колесе. Представленные выше расчеты выполнены для цилиндрической формы проточной части на периферии РК (вариант РК0). На рис. 7 показаны различные варианты формы поверхности корпуса РК, отличающиеся от исходного увеличением высоты лопатки по входной или выходной кромкам на 1,5% при неизменной величине радиального зазора.

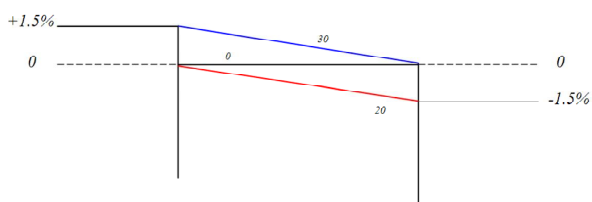


Рис. 7. Форма проточной части на периферии РК

На рис. 8 представлены распределения чисел Маха вдоль периферийной линии тока на «расчетном» режиме для рассмотренных вариантов. Из рисунков следует, что форма поверхности корпуса оказывает существенное влияние на положение скачка уплотнения. Так в варианте РК20 скачок смещается в глубь межлопаточного канала.

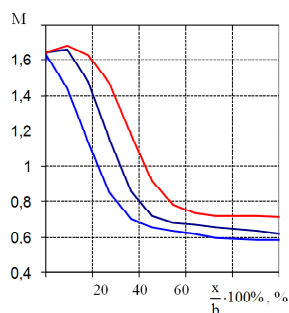


Рис. 8. Распределение чисел Маха вдоль линии тока в периферийном сечении при различных формах проточной части корпуса
— РК0, — РК20, — РК30

Снижение значений степени диффузорности течения в варианте РК20 по сравнению с другими вариантами иллюстрирует рис. 9. Однако, явное увеличение запасов устойчивости в этом же

колесе приводит к некоторому снижению (на 5,7%) интегральной степени повышения давления. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что наличие поджатия на периферии благоприятно сказывается на устойчивости течения в этой области, однако снижает энергообмен в лопаточном венце.

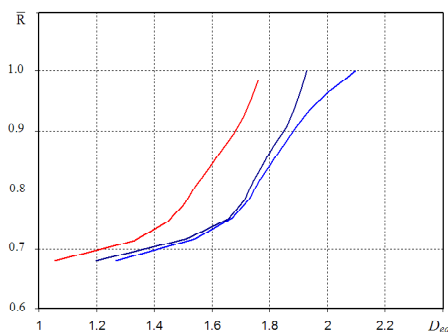


Рис. 9. Распределение степени диффузорности течения в РК по радиусу
— РК0, — РК20, — РК30

Заключение

С помощью ПК AxSym_M [1] проведено исследование влияния изменения стреловидности лопаток и формы меридиональных обводов втулочной и периферийной поверхности. Относительная простота схематизации течения при отключении влияния концевых эффектов позволяет оценить влияние изменения формы втулочной и периферийной поверхностей на перестроение течения в различных по высоте лопатки сечениях на «расчетном» режиме и определить целесообразное направление совершенствования существующих рабочих колес. Для более точной оценки параметров течения при модификации геометрии лопатки может быть использован алгоритм, позволяющий получить более детальное описание течения.

Перечень ссылок

1. Басов Ю.Ф. Совершенствование метода расчета течения в высоконапорной компрессорной ступени / Ю.Ф. Басов, Л.Г. Бойко, А.Е. Демин // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2009. — №2/59. — С. 63–68
2. Басов Ю.Ф. Расчетное исследование течения в сверхзвуковом рабочем колесе / Ю.Ф. Басов, Н.В. Пижанкова // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2009. — №2/59. — С. 77–81.

Поступила в редакцию 01.06.2011

Л.Г. Бойко, О.Е. Дьомін, Ю.П. Максимов, Н.В. Піжанкова, Ю.Ф.Басов. Вплив зміни геометричних параметрів високонапірного робочого колеса осьового компресора на його газодинамічні характеристики

Представлені результати чисельного дослідження за допомогою програмного комплексу AxSym M впливу на структуру течії у високонапірному робочому колесі (РК) осьового компресора стрілоподібності лопатки і форми меридіональних обводів проточної частини. Показано, що зсув лінії центрів ваги профілів периферійного перетину уздовж лінії хорди в напрямі, протилежному течії, дозволяє зменшити в порівнянні з початковим варіантом РК значення M_w на вході і його максимальне значення в міжлопатковому каналі, що приводить до підвищення ККД. Використання конічної та S-подібної форми поверхні втулки дозволяє підвищити навантаженість навколотовулочних перетинів, а підтискання потоку за рахунок форми поверхні корпусу дозволяє змінювати положення стрибка ущільнення значення в міжлопатковому каналі і ступінь дифузності течії.

Ключові слова: високонапірне робоче колесо осьового компресора, чисельне дослідження, стрілоподібність лопатки, меридіональні обводи.

L.G. Boyko, A.E. Diomin, Yu.P. Maximov, N.V. Pizhankova, Yu.F. Basov. Axial compressor high pressure rotor blade geometrical parameters change influence on its gasdynamics performances

Results of numeral research by the program complex of AxSym_M influence on the high-pressure axial compressor rotor flow structure the sweep rotor blade and forms of its meridional setting are presented. It is shown, that displacement of line of tip section profile gravity centers along the chord line in the flow opposite direction allows to decrease on comparison with by the initial rotor variant value M_w on the entrance and its maximal value in the blade to blade passage, that results in the rise of efficiency. The use of conical and S-shaped forms of hub surface allows to increase hub sections loading, and the flow prepressure due to the form of the case surface allows to change position of compression shock in the blade to blade passage and diffuse flow degree.

Keywords: high-pressure axial compressor rotor, numerical research, sweep rotor blade, meridional setting.