

УДК 621. 452.3:621.515

*Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева**Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЫСОКОНАПОРНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ

Представлено исследование трансзвукового течения в модельном осерадиальном рабочем колесе высоконапорного центробежного компрессора с промежуточными лопатками с помощью метода поверочного расчета и соответствующего программного комплекса АхСВт, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ». Получена структура течения и суммарные характеристики рабочего колеса. Представлено сопоставление результатов расчета с опытными данными и результатами расчетов других авторов. Приведены результаты модернизации геометрических параметров модельного рабочего колеса.

Ключевые слова: высоконапорный центробежный компрессор, промежуточные лопатки, метод расчета осесимметричного до- и трансзвукового течения, суммарные характеристики, структура течения.

Введение

В современном газотурбостроении широкое применение находят центробежные ступени, имеющие пространственное профилирование осерадиальных лопаток рабочих колес. Ступени такого типа отличаются высокими значениями степени повышения давления, большими расходами рабочего тела, что определяет появление транс- и сверхзвуковых скоростей в межлопаточных каналах рабочих колес (РК) и лопаточных диффузоров.

Возможность численного моделирования течения в таких ступенях позволяет существенно снизить затраты на их проектирование, доводку и дальнейшую модернизацию.

В статье представлены результаты исследования трансзвукового течения в модельном осерадиальном рабочем колесе высоконапорного центробежного компрессора и его модернизации.

1. Метод расчета

Для проведения исследования использован метод поверочного расчета параметров осесимметричного течения в высоконапорных центробежных компрессорных ступенях с осерадиальными лопатками рабочих колес [1]. Данный метод и соответствующий ему программный комплекс (ПК) АхСВт разработаны в Национальном аэрокосмическом университете им.М.Е.Жуковского «ХАИ» и 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.

В основу метода положено решение системы уравнений Эйлера, записанной в стационарной форме с использованием представления о функции тока. Задача решается в обобщенной криволинейной системе координат. Дифференциальные уравнения для функции тока аппроксимируются конечно-разностными уравнениями второго порядка точности.

Для учета проявления вязких эффектов течения используются обобщенные полуэмпирические зависимости для определения значений углов отставания потока в решетках профилей и коэффициентов потерь, соответствующие исследуемому диапазону скоростей течения в высоконапорных ступенях.

Данный метод относится к новому поколению методов расчета осесимметричного течения. Его характерными особенностями являются использование разностных схем, обеспечивающих второй порядок точности, достаточно подробных расчетных сеток, позволяющих детально описывать поверхность лопаточных венцов и меридиональных обводов, проводить расчет течения в межлопаточных каналах, а также осуществлять учет влияния отбора рабочего тела из проточной части ступени.

2. Расчетное исследование трансзвукового течения

В качестве объекта исследования рассмотрено модельное осерадиальное рабочее колесо высоконапорного центробежного компрессора, представленное в работе [2].

На «расчетном» режиме при частоте вращения $n=50000$ об/мин и расходе рабочего тела

$G_B = 2,55 \text{ кг/с}$ это колесо обеспечивает степень повышения давления $\pi_{PK}^* = 6,1$ и изоэнтروпический КПД $\eta_{PK} = 0,84$. Рассматриваемое рабочее колесо имеет промежуточные лопатки (splitter), образованные путем укорачивания основных лопаток РК на 30% осевой протяженности от плоскости входа. Твёрдотельная модель компрессора представлена на рис.1.

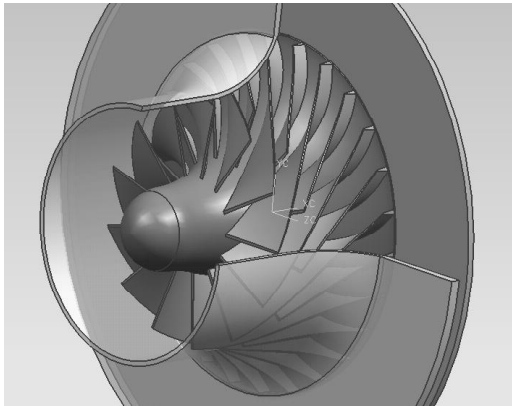


Рис.1. Пространственная модель исследуемого компрессора

Применение «сплиттеров» в таких РК обусловлено необходимостью обеспечения безотрывного обтекания лопаток колеса при высокой напорности, а также предотвращения запираания межлопаточных каналов на входном участке при больших скоростях потока.

С помощью ПК АхСВм проведено численное моделирование течения в рабочем колесе в широком диапазоне режимов по расходу. Все расчеты течения выполнены при стандартных атмосферных условиях на входе. На рис.2 представлена суммарная характеристика колеса в виде зависимостей степени повышения полного давления и КПД от расхода, полученная расчетным путем (сплошная линия), в сопоставлении с опытными данными (маркер) и результатами расчетов других авторов, приведенных в работе [2]. Сопоставление результатов эксперимента и расчетного исследования с помощью ПК АхСВм показало их удовлетворительное согласование.

Использование данного программного комплекса позволяет расчетным путем получать поля параметров потока в проточной части. Высокая степень повышения давления приводит к весьма сложной структуре течения в рабочем колесе. На рис.3 представлены изолинии чисел Маха в исследуемом РК на «расчетном» режиме $\bar{n}_{np} = 1,0$ и $G_B = 2,55 \text{ кг/с}$. На входной кромке вблизи покрывного диска наблюдается сверхзвуковая область с числами Маха, достигающими значения $M_{w1} = 1,34$. Аналогичная область меньшей интен-

сивности образуется и вблизи покрывного диска около входных кромок промежуточных лопаток. По характеру приведенных изолиний их входная граница (пунктирная линия) определяется достаточно точно: здесь имеет место локальное ускорение потока по всей высоте лопатки, а также его разгон до сверхзвуковых скоростей ($M_w \approx 1,1$) в периферийной области. На выходе из РК вблизи покрывного диска наблюдается область торможения, скорости падают, следствием чего является перекося потока (вблизи основного диска $M_{w2} = 0,67$, покрывного диска – $M_{w2} = 0,25$).

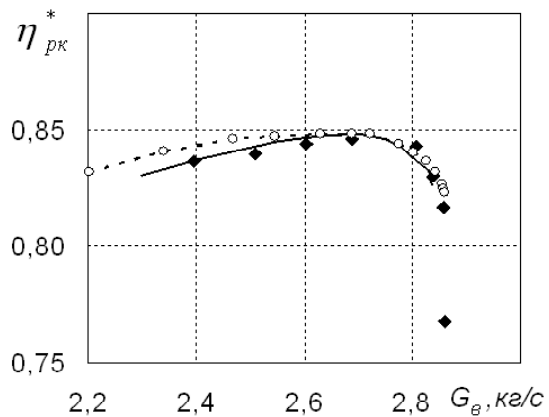
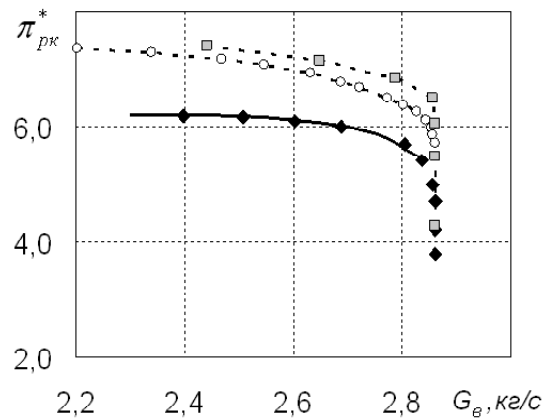


Рис. 2. Суммарная характеристика рабочего колеса при $\bar{n}_{np} = 1$

◆ – эксперимент, — расчет АхСВм, —○— расчет VISION, —□— расчет TASKflow

Описанный выше характер изменения скоростей подтверждается представленными на рис.4 распределениями чисел Маха вдоль продольных линий расчетной сетки вблизи основного ($\bar{h} = 0$) и покрывного ($\bar{h} = 1$) дисков, а также на середине высоты лопатки $\bar{h} = 0,5$.

На рис.5 представлены распределения по высоте лопатки углов потока на входе в рабочее колесо, полученные в эксперименте [2], в сопоставлении с результатами расчетов с помощью ПК АхСВм, а также с использованием 3D подходов, приведенными в работе [2]. Показанное на рисун-

ке распределение геометрических углов входа лопатки по высоте канала позволяет отметить наличие положительного угла натекания, который вблизи втулочной поверхности на «расчетном» режиме достигает 20 град, что может обуславливать отрыв потока и значительный рост потерь.

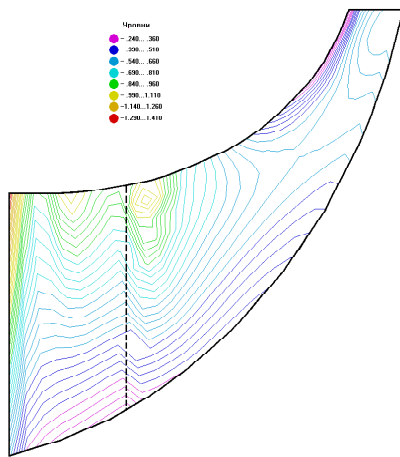


Рис. 3. Изолинии чисел Маха в проточной части рабочего колеса на «расчетном» режим

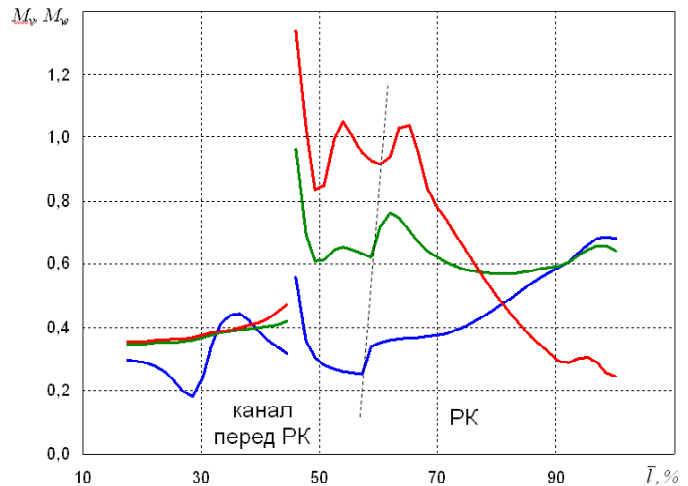


Рис. 4. Распределения чисел Маха вдоль продольных линий сетки на «расчетном» режиме

— $\bar{h} = 0$; — $\bar{h} = 0,5$; — $\bar{h} = 1$

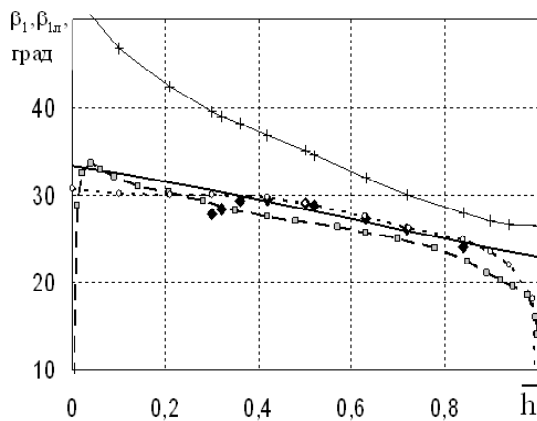


Рис. 5. Распределение углов потока на входе в РК по высоте канала на «расчетном» режиме

◆ — эксперимент, — геометрический угол,
— расчет АхСВм, ○ — расчет VISION,
□ — расчет TASKflow

С целью улучшения обтекания рабочего колеса проведена модернизация профиля лопатки. Уменьшение угла натекания достигнуто путем коррекции геометрического угла входа лопатки в привтулочной области на 10,2 град в сторону раскрытия межлопаточного канала и изменения

формы срединной поверхности лопатки. На рис. 6 представлены распределения геометрических углов вдоль обводов проточной части для модернизированного варианта (синий цвет) в сопоставлении с исходным (красный цвет). Сопоставление лопаток рабочих колес показано на рис. 7.

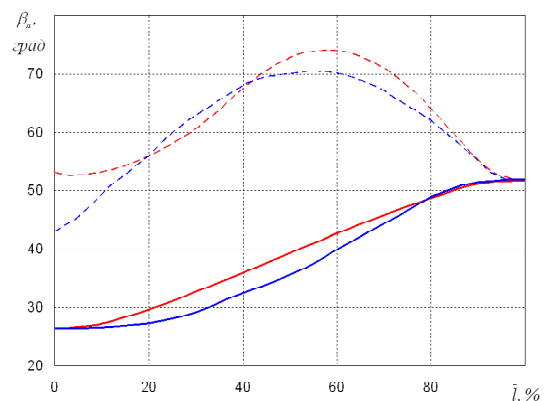


Рис. 6. Распределение геометрических углов вдоль средней линии для исходного (—) и модернизированного (—) профилей лопаток РК:

—, — по периферии;
- - -, - - - по втулке

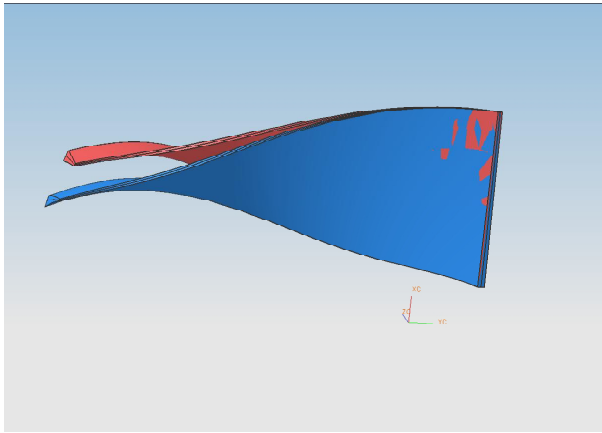


Рис. 7. Твёрдотельная модель основной лопатки рабочего колеса:

- — исходный вариант;
- — модернизированный вариант

На рис. 8 приведены суммарные характеристики исходного и модернизированного вариантов рабочего колеса. Следует отметить, что проведенная коррекция формы лопатки привела к смещению характеристики колеса в область меньших расходов при повышении КПД на 0,7% на «расчетном» режиме.

Коррекция геометрических углов профиля в привтулочной области на входе в рабочее колесо привело к существенному снижению угла натекания вблизи основного диска на «расчетном» режиме и улучшению обтекания входных кромок лопаток РК (см.рис.9). При этом уменьшение площади проходного сечения межлопаточного канала в области входных кромок промежуточных лопаток привело к перераспределению параметров потока, росту скоростей на периферии, а также определило смещение суммарных характеристик.

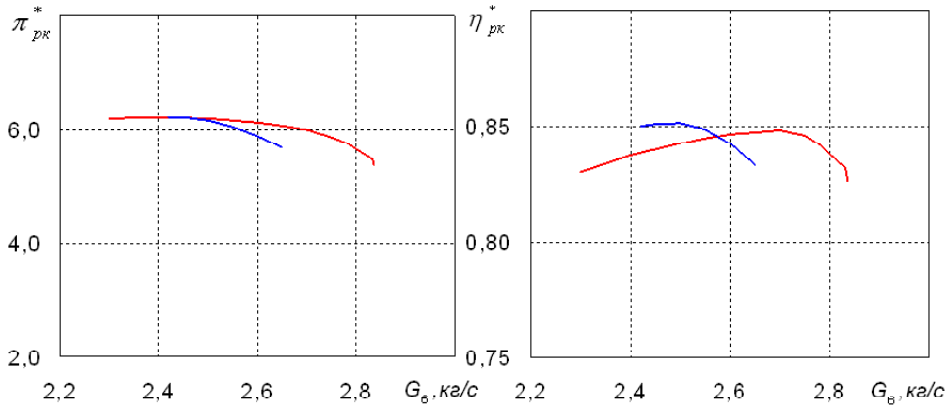


Рис. 8. Суммарная характеристика рабочего колеса

- — исходный вариант;
- — модернизированный вариант

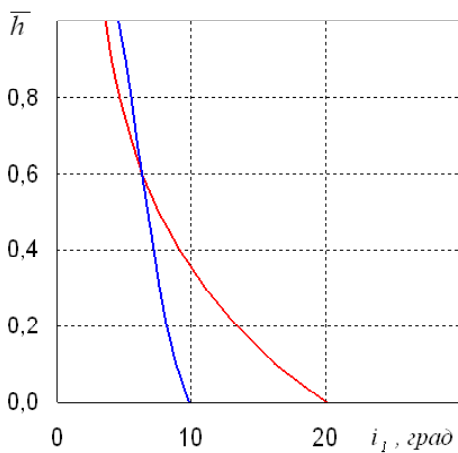


Рис. 9. Распределение углов натекания на лопатки РК по высоте канала на «расчетном» режиме

- — исходный вариант;
- — модернизированный вариант

Заключение

В статье приводится анализ течения в высоконапорном рабочем колесе центробежного компрессора. Результаты расчетов сопоставлены с опытными данными, получено их удовлетворительное согласование и показана возможность совершенствования ступеней путем модернизации геометрических параметров лопаток с помощью ПК АхСВм.

Перечень ссылок

1. Барышева Е.С. Метод расчета течения в центробежных компрессорах с осерадальными пространственными лопатками/ Е.С.Барышева, Л.Г. Бойко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2007.- №.1(37) — С.45-51.
2. EisenlohrG. Investigations of the Flow Through a High Pressure Ratio Centrifugal Impeller / G.Eisenlohr, H.Krain, F.-A.Richter, V.Tiede //

Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea and Air. – (June 3-6, 2002). – Amsterdam, The Netherlands. (GT2002-30394). – 9 p.

Поступила в редакцию 20.06.2011

Л.Г.Бойко, О.С.Баришева. Дослідження трансзвукової течії у високонапірному відцентровому робочому колесі

Представлено дослідження трансзвукової течії в модельному осьорадіальному робочому колесі високонапірного відцентрового компресора з проміжними лопатками за допомогою методу перевірного розрахунку та відповідного програмного комплексу AxСВm, розробленого в Національному аерокосмічному університеті «ХА». Отримана структура течії та сумарні характеристики робочого колеса. Представлено зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними та результатами розрахунків інших авторів. Наведені результати модернізації геометричних параметрів модельного робочого колеса.

Ключові слова: *високонапірний відцентровий компресор, проміжні лопатки, метод розрахунку осьосиметричної до- і трансзвукової течії, сумарні характеристики, структура течії.*

L.G.Boyko, E.S.Barysheva. Transonic flow research in high-pressure centrifugal impeller

Transonic flow research of in the high-pressure centrifugal compressor model axial-radial impeller with the splitters by the prediction calculation method and the proper program code AxСВm developed in the National Aerospace University «KhAI» is presented. The flow structure and summary performances of impeller are obtained. The comparison of computational results with the experimental data and other authors computational results is presented. The model impeller geometry parameters modernization results are shown.

Key words: *high-pressure centrifugal compressor, splitters, sub- and transonic axisymmetric flow calculation method, summary performances, flow structure.*