

УДК 621.515

Л. Г. БОЙКО, К. В. ФЕСЕНКО, А. Ю. САМОЙЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

С помощью метода поверочного расчета и соответствующего программного комплекса АхСВ, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете "ХАИ", проведено моделирование течения в ступени центробежного компрессора (ЦБК) газоперекачивающего агрегата. Целью расчетного исследования является совершенствование газодинамических параметров ЦБК, направленное на повышение значения коэффициента напора и политропического КПД исходной ступени, а также расширение диапазона рабочих режимов по расходу. Показано влияние изменения различных геометрических параметров: формы средней линии и геометрического угла на выходе из рабочего колеса, а также толщины входной и выходной кромок лопатки рабочего колеса на структуру течения и суммарные характеристики ступени.

Ключевые слова: ступень центробежного компрессора, метод поверочного расчета, суммарная характеристика, расчетное исследование, модернизация геометрических параметров, повышение эффективности.

Введение

Совершенствование и развитие компрессорного оборудования, работающего на предприятиях газотранспортной и газодобывающей отраслей Украины, является одной из приоритетных задач, решение которой определяет их устойчивую и эффективную работу. В плане решения этой задачи важное место занимают работы по модернизации уже действующего оборудования, что обеспечивает значительную экономию материальных и финансовых средств по сравнению с полной его заменой.

Модернизация центробежных компрессоров направлена, прежде всего, на повышение их КПД, увеличение напора, а также расширение зоны рабочих режимов. Использование численного моделирования течения в ступенях ЦБК позволяет сократить усилия, средства и время, затрачиваемые на проектирование. При этом большую роль играют варианты расчетов, включающие анализ влияния изменения геометрических параметров на газодинамические характеристики ступени и позволяющие определить направление совершенствования её конструкции [1 – 3].

В настоящее время большой объем численных исследований проточной части и лопаточных венцов ступени ЦБК приходится на двумерные методы расчета, которые адекватно описывают течение в таких объектах и могут быть относительно легко применены в инженерной практике.

1. Метод расчета и постановка задачи

Для проведения вариантных исследований использован метод поверочного расчета, разработанный на кафедре Теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», позволяющий определять структуру осесимметричного течения и суммарные характеристики ступени центробежного компрессора [4]. В его основе лежит решение системы уравнений движения невязкого нетеплопроводного сжимаемого газа, дополненное учетом проявления вязких эффектов на основании обобщенных полуэмпирических зависимостей.

Данный метод и соответствующий ему программный комплекс (ПК) АхСВ предназначены для анализа течения в ступенях центробежных компрессоров с радиальными лопатками, имеющими произвольную форму средней линии, в дозвуковом диапазоне режимов работы.

ПК АхСВ верифицирован на различных объектах [5, 6], показана целесообразность его применения для решения задач совершенствования ступеней центробежных компрессоров [7].

Целью данной работы является модернизация ступени ЦБК газоперекачивающего агрегата (ГПА), направленная на повышение ее эффективности и напора. Для этого необходимо исследовать исходный вариант ступени, рассмотреть влияние изменения геометрических параметров лопаточных венцов на ее суммарную характеристику и внести рекомендации по ее совершенствованию.

2. Проведение численных исследований

Исходная ступень ЦБК состоит из рабочего колеса (РК), лопаточного диффузора (ЛД), обратного направляющего аппарата (ОНА) и каналов между ними. Твердотельная модель ступени компрессора представлена на рис. 1.

С помощью ПК АхСВ проведен расчет структуры течения и суммарных характеристик ступени. Моделирование течения осуществлено на режиме по частоте вращения $M_{u2} = 0,6$, где M_{u2} – число Маха, определяемое по окружной составляющей скорости на выходе из рабочего колеса.

Одним из путей совершенствования параметров ступени ЦБК является модернизация формы лопаток рабочего колеса. В преобладающем большинстве случаев средняя линия лопаток рабочих

колес (в исходной ступени в том числе) очерчивается дугами окружности. Для повышения коэффициента напора и КПД, а также получения широкой зоны устойчивой работы колеса необходимо осуществлять рациональный выбор величины выходного угла и формы средней линии лопатки во фронтальной плоскости, включая использование S-образной средней линии лопаток РК.

На рис. 2 представлены сечения лопаток рабочего колеса во фронтальной плоскости с различными формами средней линии и геометрическими углами на выходе β_{2r} .

Проведено расчетное исследование течения в ступени ЦБК с различным исполнением лопаток рабочего колеса, результаты которого отражены на рис. 3 в виде суммарных характеристик ступени компрессора.

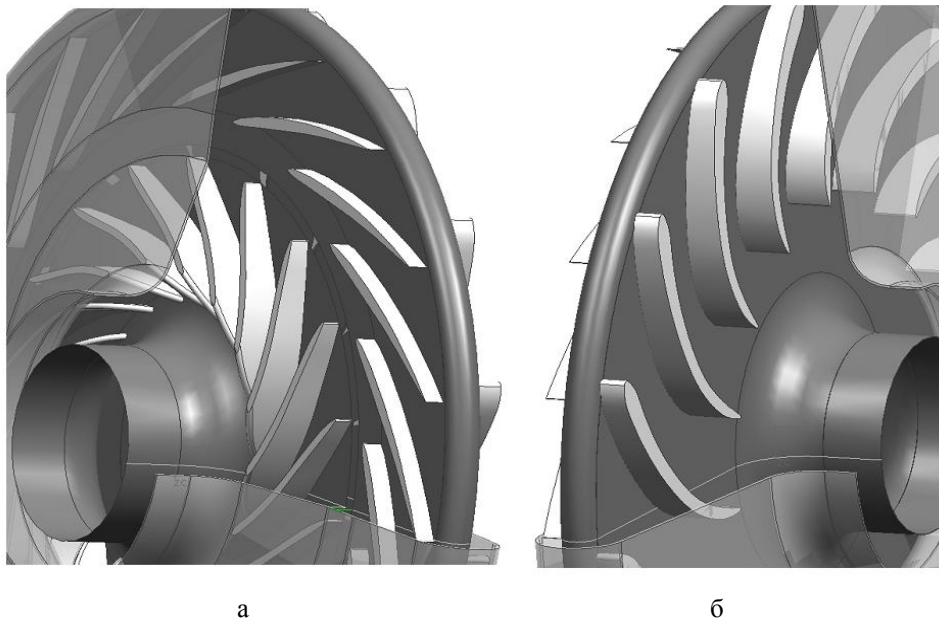


Рис. 1. Твердотельная модель ступени ЦБК: а – РК и ЛД, б – ОНА

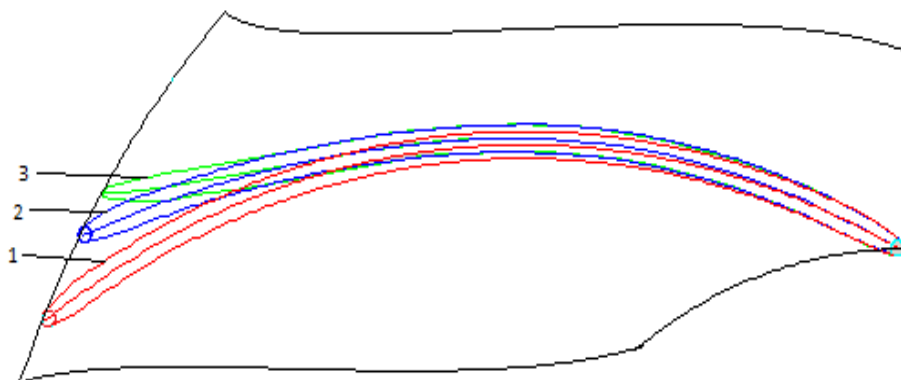


Рис. 2. Варианты сечений лопаток РК с разными формами средней линии и значениями углов выхода:

- 1 вариант – средняя линия – дужка окружности, $\beta_{2r} = 28$ град (исходная лопатка);
- 2 вариант – средняя линия – дужка окружности, $\beta_{2r} = 39$ град;
- 3 вариант – S-образная средняя линия, $\beta_{2r} = 55$ град

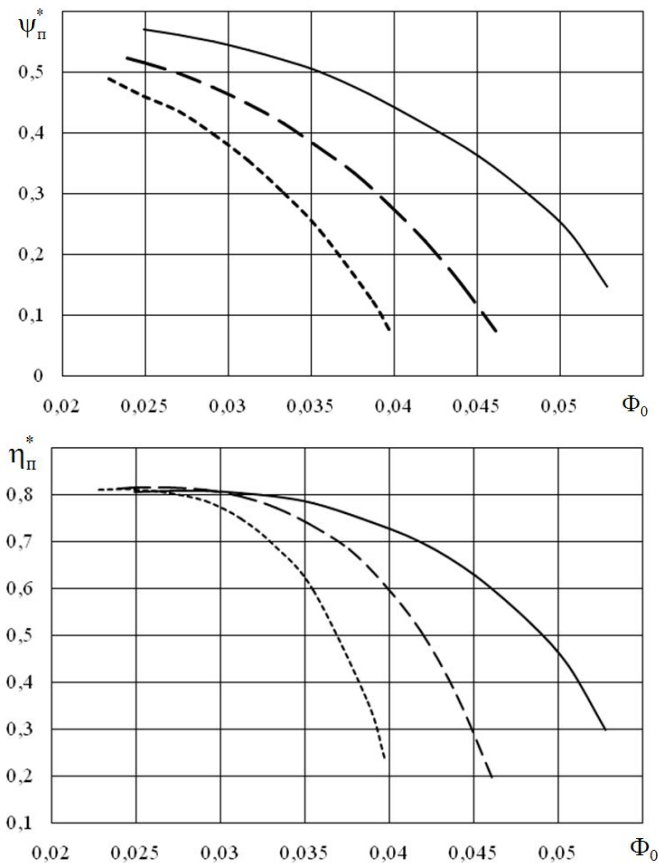


Рис. 3. Суммарные характеристики ступени ЦБК:

----- - РК с исполнением лопаток по 1 варианту;
 ----- - РК с исполнением лопаток по 2 варианту;
 _____ - РК с исполнением лопаток по 3 варианту

Здесь и далее характеристики ступени ЦБК даны в безразмерных величинах

$$\Psi_{\Pi}^* = f(\Phi_0) \text{ и } \eta_{\Pi}^* = f(\Phi_0),$$

где $\Psi_{\Pi}^* = h_{\Pi}^*/U_2^2$ – коэффициент политропического напора,

h_{Π}^* – политропический напор по заторможенным параметрам,

U_2 – окружная скорость концов лопаток на выходе из рабочего колеса,

$\eta_{\Pi}^* = h_{\Pi}^*/h_T^*$ – политропический КПД по параметрам заторможенного потока,

h_T^* – теоретический напор.

$$\Phi_0 = \frac{4Q_0}{\pi \cdot D_2^2 \cdot U_2} \text{ – условный коэффициент расхода}$$

да,

Q_0 – объемный расход на входе в ступень.

Из представленных результатов расчета можно сделать вывод о том, что ступень ЦБК с лопатками рабочего колеса, имеющими S-образную среднюю линию, обеспечивает наибольшие значения из трех рассмотренных вариантов коэффициента политро-

пического напора. При этом преимущество лопаток подобного типа проявляется с увеличением коэффициента условного расхода во всем диапазоне рабочих режимов. Модернизированная лопатка РК имеет более пологую характеристику, что важно при эксплуатации ЦБК в составе ГПА.

Взаимодействие между рабочим колесом и лопаточным диффузором во многом определяет характер течения и существенно влияет на характеристики данных узлов ЦБК, что в свою очередь создает проблему согласования РК и ЛД и обеспечения достаточного диапазона работы всей ступени в целом.

На рис. 4 показаны полученные с помощью ПК *AxSV* изолинии чисел Маха в проточной части ступени ЦБК на участке, включающем щелевой и лопаточный диффузоры. При использовании лопаток РК со средними линиями и конструктивными углами выхода по первому и второму вариантам, в лопаточном диффузоре наблюдается ударный вход на лопатки, который на рис. 4, а, б отражен в виде сгущения изолиний. При использовании лопаток рабочего колеса, имеющих S-образную среднюю линию, в диффузоре на том же режиме работы течение носит безударный характер (рис. 4, в).

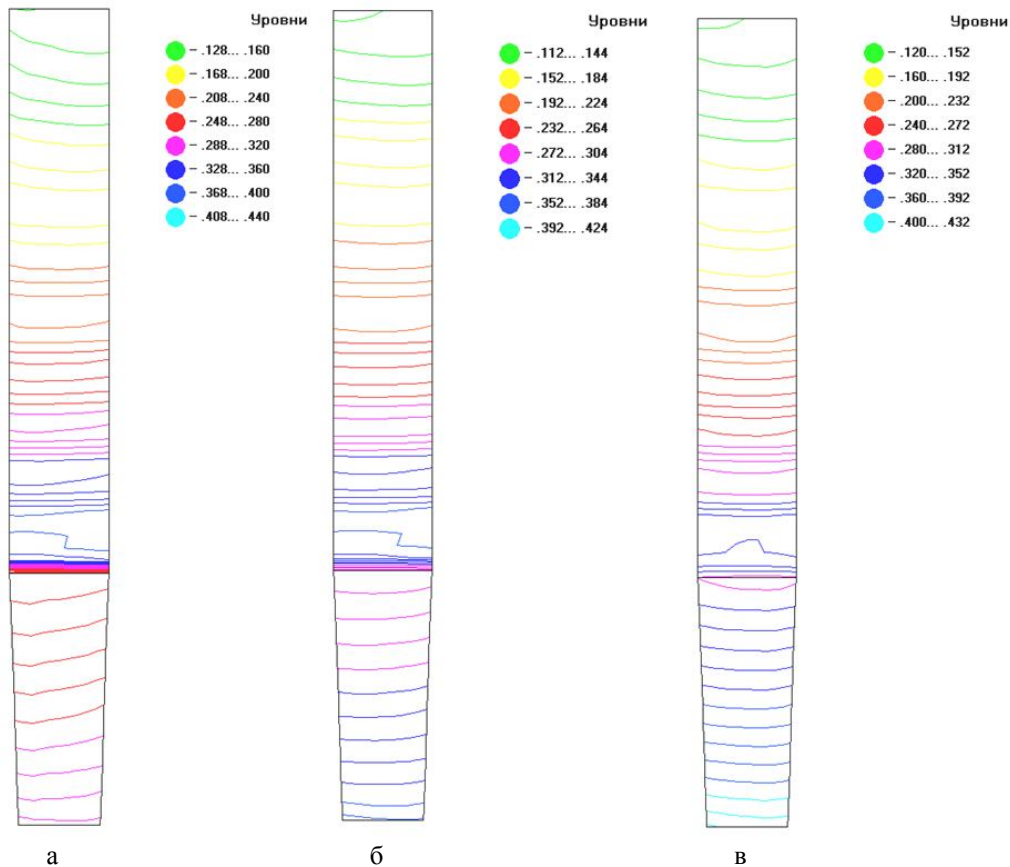


Рис. 4. Изолинии чисел Маха в проточной части щелевого и лопаточного диффузоров при различных вариантах исполнения лопатки РК ($\Phi_0 = 0,031$): а – 1 вариант, б – 2 вариант, в – 3 вариант

На рис. 5 показано распределение углов натекания на лопатки ЛД по высоте проточной части в зависимости от используемого варианта исполнения лопаток рабочего колеса.

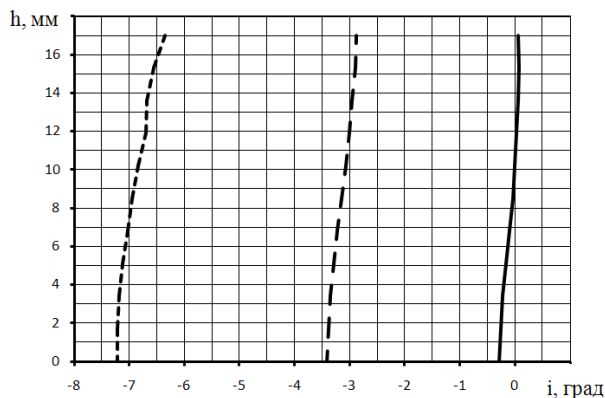


Рис. 5. Распределение угла натекания на лопатки ЛД по высоте проточной части при различных вариантах исполнения лопатки РК ($\Phi_0 = 0,031$)

- - - - - лопатка РК по 1 варианту;
- · - · - лопатка РК по 2 варианту;
- лопатка РК по 3 варианту

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что при использовании третьего варианта лопатки РК обтекание лопаточного диффузора стано-

вится безударным (угол натекания на «расчетном» режиме снижает свое значение до 0 град на средней по высоте канала линии тока), что дает возможность снизить потери в ЛД и тем самым повысить КПД ступени в целом.

Толщина лопаток РК выбирается с учетом газодинамических и конструктивных требований. Практическое применение находят лопатки постоянной толщины с тем или иным заострением входных и выходных кромок.

Исходная лопатка РК – постоянной толщины, выполнена без заострения входной и выходной кромок. У модернизированной лопатки заострение обеих кромок сделано симметрично, согласно рекомендациям [8], (рис. 6).

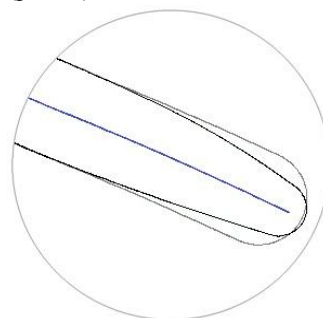


Рис. 6. Форма входной и выходной кромок исходной и модернизированной лопатки РК ЦБК

Литература

1. Галеркин, Ю. Б. Исследование и совершенствование неподвижных элементов центробежных ступеней методами вычислительной газодинамики [Текст] / Ю. Б. Галеркин, Л. Н. Маренина // Труды XVI Междунар. науч.-техн. конф. по компрессоростроению, 23-25 сентября 2014. – СПб, 2014. – Т. 1. – С. 195-203.

2. О влиянии геометрии проточной части центробежного компрессора на выбор режимов работы ГПА с газотурбинным приводом [Текст] / В. П. Парафейник, И. Н. Тертышный, А. Н. Нефедов, В. Е. Евдокимов // Труды XV Междунар. науч.-техн. конф. по компрессоростроению, 19-20 июля 2011. – Казань, 2011. – Т. 1. – С. 400-413.

3. Galerkin, Y. B. Centrifugal Compressor Efficiency Types and Rational Application [Text] / Y. B. Galerkin, K. V. Soldatova // Conference "Compressors and Their Systems". – London, 2013. – P. 533-542.

4. Метод поверочного расчета течения в проточной части центробежного компрессора и его апробация [Текст] / Л. Г. Бойко, А. Е. Демин, Е. С. Барышева, К. В. Фесенко и др. // Авиационно-

космическая техника и технология. – 2005. – № 2 (18). – С. 42-48.

5. Численное исследование двумерного течения в проточной части ступени центробежного нагнетателя [Текст] / Л. Г. Бойко, Е. С. Барышева, К. В. Фесенко и др. // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 8-13.

6. Методы расчетного исследования течений в осевых и центробежных компрессорах и результаты их практического использования [Текст] / Л. Г. Бойко, А. Е. Демин, Е. С. Барышева, Ю. П. Максимов, К. В. Фесенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10(87). – С. 63-69.

7. Фесенко, К. В. Повышение эффективности центробежного нагнетателя путем модификации геометрии проточной части и лопаточных венцов [Текст] / К. В. Фесенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2014. – Вып. 66. – С. 20-26.

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

Поступила в редакцию 22.04.2015, рассмотрена на редколлегии 15.05.2015

МОДЕРНІЗАЦІЯ СТУПЕНЯ ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Л. Г. Бойко, К. В. Фесенко, О. Ю. Самойлов

За допомогою методу перевірного розрахунку та відповідного програмного комплексу AxCB, розроблених в Національному аерокосмічному університеті "ХАІ", проведено моделювання течії в ступені відцентрового компресора (ВЦК) газоперекачувального агрегату. Метою розрахункового дослідження є вдосконалення газодинамічних параметрів ВЦК, спрямоване на підвищення значення коефіцієнта напору і політропічного ККД вихідного ступеня, а також розширення діапазону робочих режимів по витраті. Показано вплив зміни різних геометричних параметрів: форми середньої лінії і геометричного кута на виході з робочого колеса, а також товщини вхідної та вихідної кромок лопатки робочого колеса на структуру течії і сумарні характеристики ступеня.

Ключові слова: ступінь відцентрового компресора, метод перевірного розрахунку, сумарна характеристика, розрахункове дослідження, модернізація геометричних параметрів, підвищення ефективності.

GAS-PUMPING UNIT CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE MODERNIZATION

L. G. Boyko, K. V. Fesenko, A. Yu. Samoilov

Using the checking calculation method and the corresponding software AxCB, developed in the National Aerospace University "KhAI" flow modeling in the centrifugal compressor stage of pumping unit was simulated. The aim of the research is improving of the design gas-dynamic parameters of centrifugal compressor to increase pressure ratio and polytropic efficiency of the initial stage, as well as to expand the range of operating conditions by mass flow rate. The influence of various geometric parameters changes: the blade mean line shape and geometric angle at the exit of the impeller, and the thickness of the leading and trailing edges of the impeller blades on the flow structure and overall characteristics of the stage was shown.

Keywords: centrifugal compressor stage, the checking calculation method, the overall characteristics, design research, geometrical parameters modernization, improving the efficiency.

Бойко Людмила Георгиевна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.

Фесенко Ксения Владимировна – старший преподаватель кафедры теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.

Самойлов Александр Юрьевич – магистр кафедры теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.