

Повышение эффективности центробежного нагнетателя путем модификации геометрии проточной части и лопаточных венцов

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

С помощью метода поверочного расчета осесимметричного течения и соответствующего программного комплекса, позволяющего определять поля параметров потока в проточной части, а также суммарные характеристики центробежного нагнетателя (ЦБН), исследовано течение в ступени нагнетателя. Анализ течения дал возможность выделить места, отрицательно влияющие на эффективность процесса сжатия. Проведена модернизация проточной части ступени центробежного нагнетателя и последующее совершенствование геометрических параметров лопаточного диффузора, позволившие увеличить суммарные параметры ЦБН.

Ключевые слова: проточная часть центробежного нагнетателя, лопаточный диффузор, суммарная характеристика.

1. Введение, постановка задачи исследования

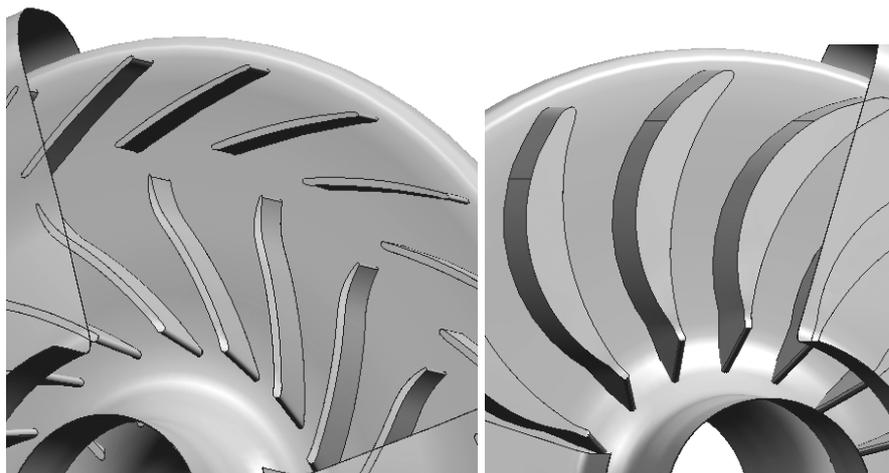
Развитие существующих технологических процессов, обслуживаемых центробежными нагнетателями, приводит к необходимости постоянной модернизации ЦБН, направленной, прежде всего, на повышение их эффективности. Создание новых и совершенствование существующих ЦБН возможны только с применением современных расчетных методов, позволяющих моделировать течение газа с высокой точностью и надежностью. Использование таких подходов дает возможность существенно сократить усилия, средства и время, затрачиваемые на проектирование и проведение дорогостоящих экспериментальных работ.

Одним из важных вопросов при проектировании и доводке ступеней ЦБН является модернизация геометрических параметров проточной части и лопаточных венцов при изменении эксплуатационных режимов работы центробежного нагнетателя. Исследованием влияния различных геометрических параметров проточной части и лопаточных венцов ЦБН на суммарную характеристику нагнетателя занимаются такие известные в области стационарного компрессоростроения организации, как ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», ЗАО "Невский завод", СПбГТУ, ОАО «Казанькомпрессормаш» (Россия) [1-3], а также авторы работ [4,5].

Целью настоящей работы является численное исследование течения в ступени ЦБН и совершенствование ее газодинамических параметров путем модификации геометрии проточной части и угла входа профиля лопаточного диффузора (ЛД).

2. Основные результаты исследования

Объектом исследования выбрана ступень ЦБН, состоящая из рабочего колеса (РК), ЛД и обратного направляющего аппарата (ОНА). Лопаточные венцы данной ступени имеют радиальные лопатки, образованные цилиндрическими поверхностями со средней линией произвольной формы. Твердотельная модель ступени ЦБН показана на рисунке 1, а, б.



а

б

Рис. 1. Ступень центробежного нагнетателя: а – РК и ЛД; б – ОНА

Для проведения расчетного исследования использован разработанный в Проблемной научно-исследовательской лаборатории газотурбинных двигателей и установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" метод расчета и соответствующий программный комплекс (ПК) АхСВ [6, 7]. Данный метод предназначен для анализа осесимметричного течения в центробежных нагнетателях различной конструкции и позволяет определять их суммарные характеристики.

В качестве исходных данных для расчета необходимо задать меридиональные обводы проточной части, а также границы расчетных подобластей (РК, ЛД и ОНА). Схема проточной части ступени с нанесенной на нее расчетной сеткой показана на рисунке 2.

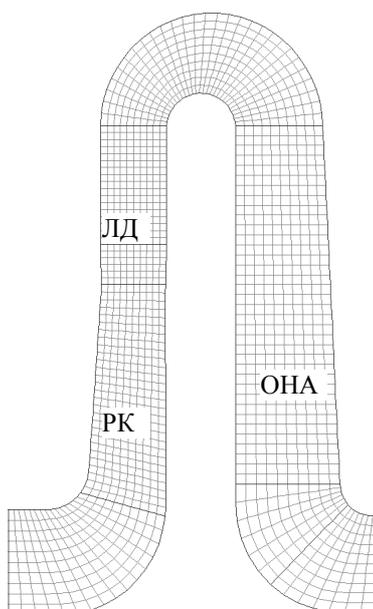


Рис. 2. Схема проточной части ступени ЦБН

Кроме того, заданы геометрические параметры лопаточных венцов (конструктивные углы на входе и выходе, форма средней линии, толщина лопатки вдоль средней линии, количество лопаток и др.), а также параметры рабочего тела по высоте проточной части на входе в ступень (в данном расчетном исследовании – воздуха) и режим работы нагнетателя по расходу и частоте вращения ротора.

На основе проведенных расчетов исследуемой ступени ЦБН и анализа параметров потока на «расчетном» режиме были выявлены возможные пути совершенствования геометрических параметров проточной части и лопаточных венцов. В связи с изменившимися условиями эксплуатации исходной ступени (переход на пониженные расходы рабочего тела при неизменной частоте вращения ротора) появилась необходимость коррекции формы проточной части ступени в целях обеспечения необходимого уровня скоростей и требуемых суммарных параметров.

На первом этапе модернизации ступени ЦБН для повышения коэффициента политропического напора и политропического КПД на «расчетном» режиме проанализировано влияние формы меридиональных обводов проточной части центробежного нагнетателя на характеристики рабочего колеса и участка ступени, содержащего РК, ЛД и поворотный канал к ОНА.

Из рассмотрения линий тока в проточной части исходной ступени, показанных на рисунке 3, а, видно, что на участках, где осуществляется поворот потока в меридиональном направлении, наблюдается разрежение линий тока, что свидетельствует о снижении меридиональной скорости и может быть причиной возникновения отрывных явлений в угловых зонах проточной части.

Для ликвидации этих эффектов внесены корректировки в геометрию меридиональных обводов ступени ЦБН: изменены площади проходных сечений проточной части с их поджатием и увеличением скорости течения в местах предполагаемого отрыва. Линии тока в проточной части модифицированной ступени изображены на рисунке 3, б.

На рисунках 4 и 5 показаны характеристики рабочего колеса и участка ступени нагнетателя, состоящего из РК, ЛД и поворотного канала к ОНА, где штриховой линией изображена характеристика ЦБН с исходной проточной частью, а сплошной линией – с модифицированной проточной частью.

Суммарные характеристики ступени ЦБН приведены в безразмерных величинах $\psi_n^* = f(\Phi_0)$ и $\eta_n^* = f(\Phi_0)$, где ψ_n^* – коэффициент политропического напора, η_n^* – политропический КПД, Φ_0 – условный коэффициент расхода.

Как видно из рисунков 4 и 5, выполненная модификация проточной части позволила получить прирост коэффициента политропического напора ψ_n^* и политропического КПД η_n^* как отдельно рабочего колеса, так и РК вместе с ЛД, что особенно проявилось в области малых расходов. Кроме того, проведенная модификация дала возможность расширить рабочий диапазон характеристики ЦБН.

Работа ЛД на пониженных расходах происходит при больших положительных углах натекания, которые для данной ступени ЦБН составили порядка 10 град.

В целях улучшения обтекания лопаток ЛД на втором этапе модернизации ступени исследовали два варианта исполнения его лопаток, т.е. предполагалось уменьшить конструктивный угол профиля на входе в лопаточный диффузор α_3 на 10 град и рассмотреть влияние изменения угла на структуру течения и суммарные характеристики центробежного нагнетателя.

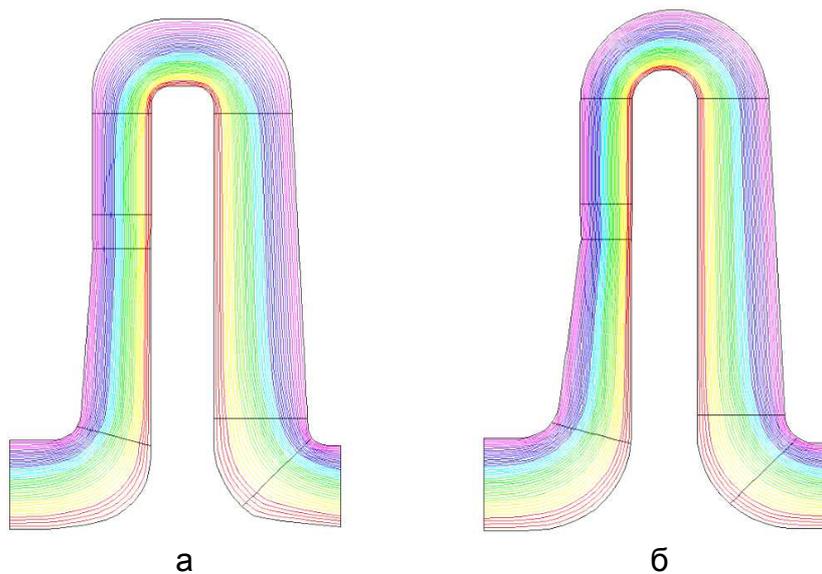


Рис. 3. Изолинии функции тока в ступени центробежного нагнетателя с исходной (а) и модернизированной (б) проточной частью

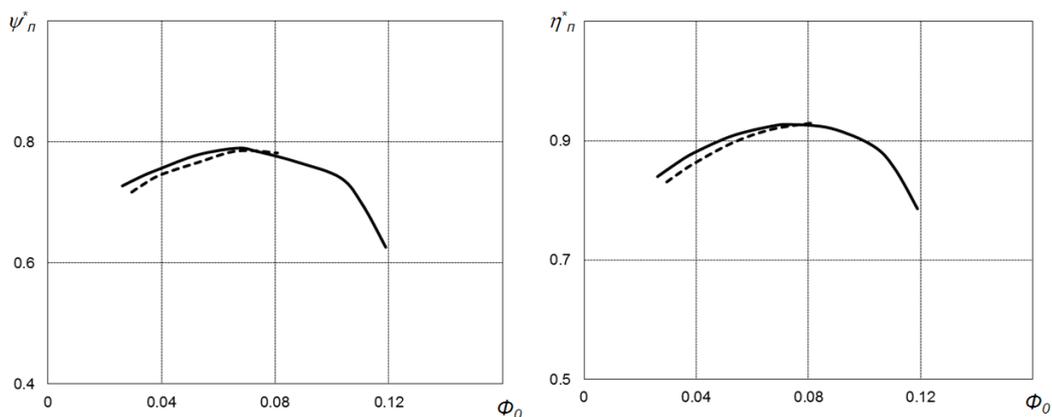


Рис. 4. Характеристика РК ЦБН:

----- — исходная проточная часть;
 ————— — модифицированная проточная часть

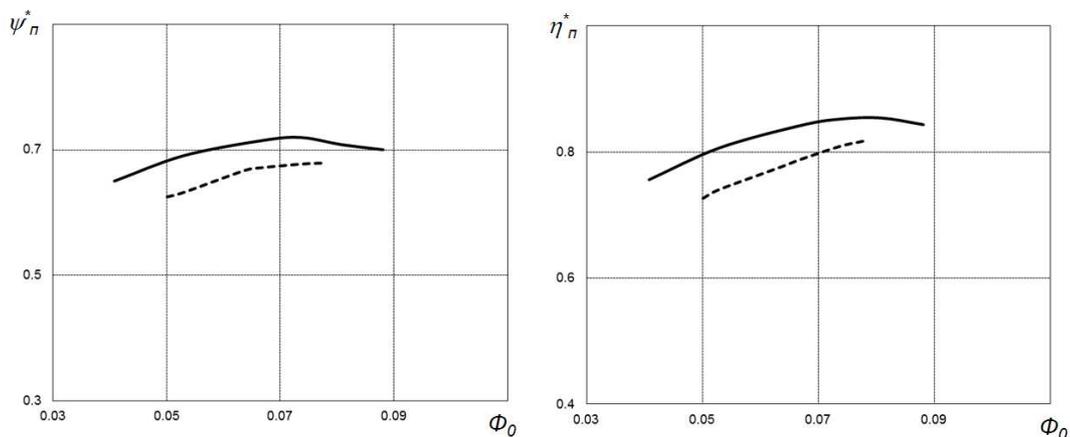


Рис. 5. Характеристика участка ступени нагнетателя, состоящего из РК и ЛД:

----- — исходная проточная часть;
 ————— — модифицированная проточная часть

На рисунке 6 показаны полученные с помощью ПК *АхСВ* изолинии чисел Маха в проточной части ЦБН с различными углами лопаток на входе в диффузор на «расчетном» режиме. В исходном лопаточном диффузоре наблюдается ударный вход на лопатки, который на рисунке 6, а отражен в виде сгущения изолиний. В модифицированном диффузоре на том же режиме работы течение носит безударный характер.

На рисунке 7 показаны распределения по высоте проточной части чисел Маха в абсолютном движении и углов натекания на входе в лопаточный диффузор при различных геометрических углах α_3 . Анализ приведенных графиков позволяет сделать вывод о том, что после модификации лопаточного диффузора при практически одинаковом уровне скоростей на входе его обтекание становится безударным (угол натекания на «расчетном» режиме снижает свое значение с 10 до 0 град на средней линии тока), что дает возможность снизить потери в ЛД и тем самым повысить КПД ступени в целом.

Далее на рисунке 8 изображена характеристика ступени ЦБН с различными вариантами геометрического угла входа профиля ЛД. Так как эксплуатационные режимы данного ЦБН лежат на левой ветке его характеристики, то уменьшение угла позволило увеличить максимальные значения напора и КПД нагнетателя в этом диапазоне.

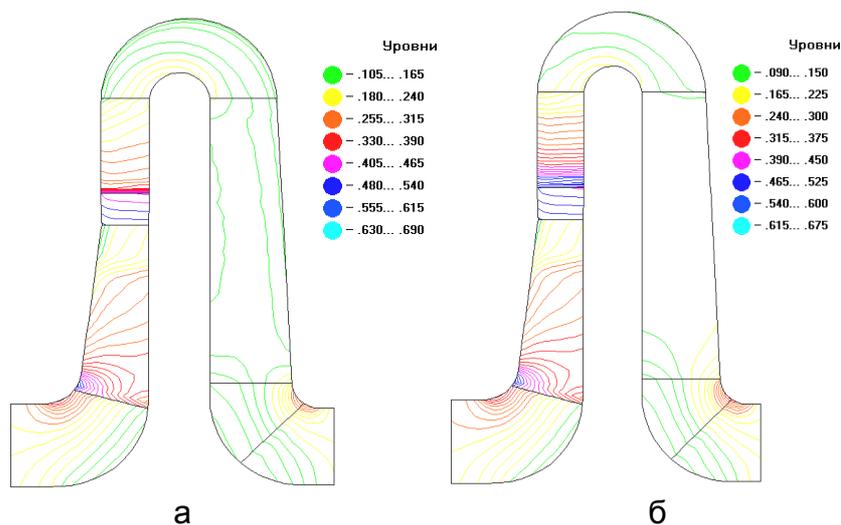


Рис. 6. Изолинии чисел Маха в проточной части ступени ЦБН с различными геометрическими углами на входе в ЛД на «расчетном» режиме: а – исходный ЛД, б – модифицированный ЛД

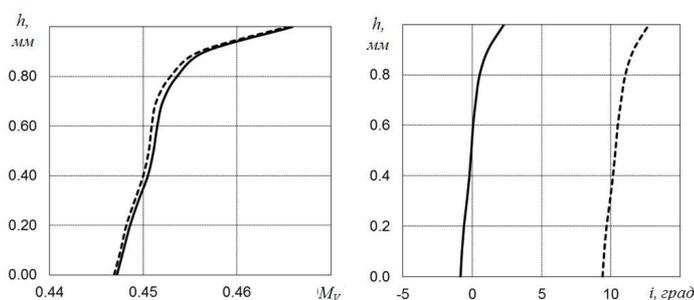


Рис. 7. Распределения чисел Маха и углов натекания на входе в лопаточный диффузор по высоте проточной части:
 - - - - - – исходный геометрический угол;
 ———— – модифицированный геометрический угол

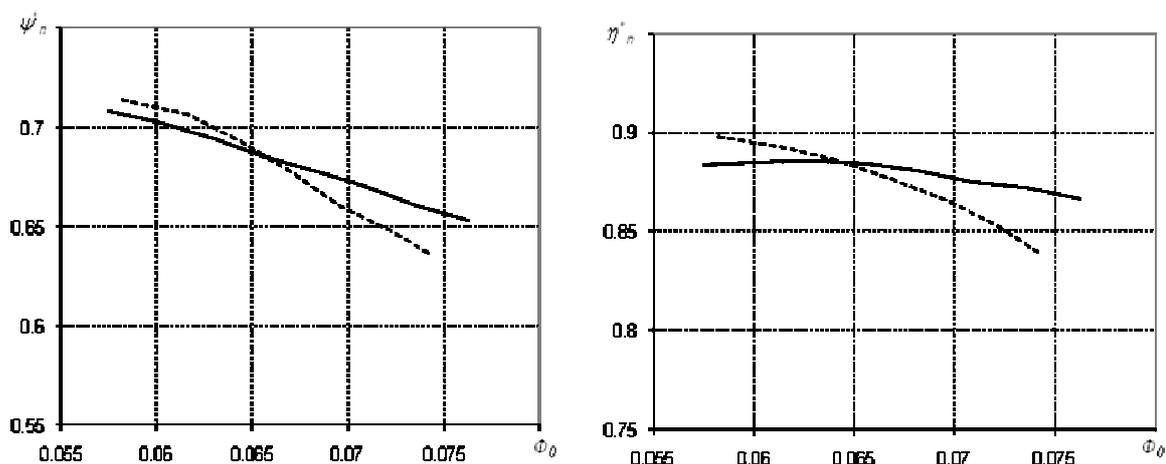


Рис. 8. Характеристика ступени центробежного нагнетателя:
 ———— — исходный геометрический угол входа профиля ЛД;
 - - - - - модифицированный геометрический угол входа профиля ЛД

3. Заключение

Исследована структура течения в проточной части ступени ЦБН, получены его суммарные характеристики. Анализ течения дал возможность выделить места, отрицательно влияющие на эффективность процесса сжатия в нагнетателе. Проведена модернизация проточной части ступени и последующее совершенствование геометрических параметров лопаточного диффузора, позволившие увеличить коэффициент политропического напора и политропический КПД на «расчетном» режиме по расходу и частоте вращения.

Данный подход к модернизации центробежного нагнетателя дает возможность рассматривать различные варианты конструктивного исполнения, определять направления повышения эффективности и выбирать наилучший вариант геометрических параметров в процессе создания конкурентоспособной компрессорной техники.

Список литературы

1. Опыт модернизации и восстановления центробежных компрессоров и нагнетателей в ОАО «Казанькомпрессормаш» и ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» [Текст]/ А.М. Ахмедзянов, А.Т. Лунев, И.Р. Грохотов и др.// Труды XV Междунар. научно-техн. конф. по компрессорной технике. – 2011. – Т.1. – С.378–383.
2. Селезнев, К.П. Центробежные компрессоры [Текст]/ К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин. – Л.: Машиностроение, 1982. – 271 с.
3. Хенталов В.И. Исследование лопаточных диффузоров [Текст]/ В.И. Хенталов// Труды научной школы компрессоростроения СПбГТУ. – С.Пб., 2005. – С.132–149.
4. Багдади Влияние следов за рабочими лопатками на параметры диффузора центробежного компрессора. Сравнительный эксперимент [Текст]/ Багдади// Тр. америк. общ. инж.-мех.: Сер. Энергетические машины и установки.– 1977. – Т.99, №1.– С.137–145.

5. Kai U. Ziegler, Heinz E. Gallus, Reinhard Niehuis A Study on Impeller-Diffuser Interaction: Part 1 – Influence on the Performance [Text]// ASME TURBOEXPO 2002. – GT-2002-30381. – 12 p.

6. 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.

7. 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.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

Поступила в редакцию 16.12.2014

Підвищення ефективності відцентрового нагнітача шляхом модифікації геометрії проточної частини і лопаткових вінців

За допомогою методу перевірного розрахунку вісесиметричної течії і відповідного програмного комплексу, що дозволяє визначати поля параметрів потоку в проточній частині, а також сумарні характеристики відцентрового нагнітача (ВЦН), досліджено течію в ступені нагнітача. Аналіз течії дав можливість виділити місця, що негативно впливають на ефективність процесу стиснення. Проведено модернізацію проточної частини ступеня відцентрового нагнітача та подальше вдосконалення геометричних параметрів лопаткового дифузора, що дозволили збільшити сумарні параметри ВЦН.

Ключові слова: проточна частина відцентрового нагнітача, лопатковий дифузор, сумарна характеристика.

Efficiency improving of centrifugal supercharger by modifying the geometry of the air flow path and blade rows

Using the 2D flow testing calculation method and the corresponding program code, which allows to determine the flow field parameters in the air flow path and the total performances of a centrifugal supercharger, the air flow study in the supercharger stage was performed. Flow analysis has allowed identifying the flow path places which negatively affects the efficiency of the compression process. The centrifugal supercharger stage air flow path was upgraded, the subsequent improvement of the geometric parameters of the vaned diffuser was done, that allowed to increase the summary parameters.

Keywords: centrifugal supercharger air flow path, vaned diffuser, total performance.