

Исследование высокорасходных пространственных рабочих колес для современных центробежных компрессоров

А.Т. Лунев, Р.Ф. Муртазин, Ю.В. Дроздов, И.Ф. Хуснутдинов
(АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС)

В данной статье рассмотрены вопросы целесообразности применения высокорасходных пространственных рабочих колес в центробежных компрессорах. Описаны способы и методы проектирования рабочих лопаток различных типов высокорасходных колес, используемые в АО «НИИтурбокомпрессор», в зависимости от назначения.

Ключевые слова: центробежный компрессор, многоступенчатый центробежный компрессор, высокорасходные рабочие колеса, пространственные лопатки, цилиндрические лопатки, проектирование лопаток рабочего колеса.

Research of high-speed spatial impellers for modern centrifugal compressors

A. T. Lunev, R. F. Murtazin, Yu. V. Drozdov, I. F. Khusnutdinov

(JSC «NII turbokompressor named after V. B. Shnepp», HMS Group, Kazan, Russia)

In this article, questions on the expediency of using high-flow spatial impellers in centrifugal compressors are considered. The ways and methods of design of working blades of various types of high-flow impellers used in JSC «NII turbokompressor» are described, depending on the purpose.

Keywords: centrifugal compressor, multistage centrifugal compressor, high-flow impellers, spatial blades, cylindrical blades, design of impeller blades.

Рабочие колеса с пространственными лопатками известны и давно применяются как в центробежных насосах, так и в компрессорах. Оптимальное значение коэффициента расхода, т. е. область, где может быть достигнут максимальный КПД для рабочих колес с цилиндрическими лопатками, соответствует $\Phi_0 = 0,05-0,06$, при больших значениях используются колеса с пространственными лопатками, где: $\Phi_0 = 4V_u / (\pi D_2^2 U_2)$.

В области больших расходов КПД снижается. Однако, в некоторых случаях конструктор вынужден использовать высокорасходные ступени, например, для одноступенчатых машин, когда ограничен диаметр колеса или для многоступенчатых машин с рабочими колесами одного диаметра, когда имеет место большая степень сжатия. В последнем случае, чтобы избежать слишком узких колес, приходится уменьшать их диаметры, что приводит к повышению расходности первых колес до значения $\Phi_0 = 0,06-0,15$. Колеса при таких значениях Φ_0 характеризуются большой относительной шириной канала, а это, в свою очередь, приводит к увеличенной неравномерности потока при входе на лопатки; в этих условиях требуется переменный входной угол, что приводит к пространственной форме лопаток.

Характеристики рабочего колеса в общем виде можно представить следующим образом [1]:

$$\eta, \psi = f(\bar{F}, M_{u2}, Re, k),$$

где: ψ – коэффициент удельной работы;

η – политропный КПД;

Φ_0 – условный коэффициент расхода;

$\bar{F}$ – форма проточной части колеса, выраженная совокупностью безразмерных геометрических параметров;

M_{u2} – критерий Маха;

Re – критерий Рейнольдса;

k – показатель адиабаты.

Проектировщик проточной части должен решать обратную задачу, которая может быть записана в следующем виде:

$$\bar{F} = f(\Phi_0, \psi, \bar{W}, M_{u2}, Re, k).$$

В настоящее время у нас нет непосредственного решения обратной задачи в трехмерной постановке и вынуждены выполнять вариантные расчеты распределения скоростей потока

$$\bar{W} = f(\bar{F}, \Phi_0, M_{u2}, k),$$

оптимизируя $\bar{W}$ за счет изменения формы колеса $\bar{F}$.

Эта задача имеет бесконечное множество решений, если не ограничивать изменение формы рамками какой либо системы. Последняя должна удовлетворять с одной стороны требованиям аэродинамики, с другой стороны, рабочие колеса должны обеспечи-

вать достаточную прочность и быть технологичны в изготовлении.

В соответствии с методикой, используемой в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», меридиальные контуры и контуры средней линии эквивалентной прямой решетки задаются кривыми второго порядка. Кривые второго порядка имеет вид [2]:

$$\begin{aligned} Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F &= 0; \\ A &= -\chi Y_B^2 + Y_B Y_C - Y_C^2; \\ B &= X_C Y_C + \chi X_B Y_B - 0,5 X_C Y_B - 0,5 X_B Y_C \quad F = 0; \\ C &= -\chi X_B^2 + X_B X_C - X_C^2; \\ D &= 0,5 Y_C (X_B Y_C - X_C Y_B); \\ E &= 0,5 X_C (Y_B X_C - Y_C X_B); \end{aligned}$$

Применение системы кривых второго порядка для меридианных контуров ограничивающих поверхностей (основного и покрывного дисков) не вызывало вопросов как в смысле изготовления, так и в смысле организации потока.

Разработанная ранее и используемая нами система проектирования лопаток основана на применении линейчатой поверхности, получаемой перемещением прямой линии, концы которой соединяют два аэродинамических профиля, закоординированных на ограничивающих поверхностях, т.е. на поверхностях основного и покрывного дисков. При разработке этой методики предполагается изготавливать фрезерованием на пятикоординатных станках с ЧПУ. Колеса для ЦКОН и УЦКМ2.

Для колес с малым значением диаметра втулки и большим коэффициентом расхода лопатки с прямолинейной образующей получили большие углы атаки на средней линии входной кромки. Для определения формы лопатки необходимо задать положение входной кромки в меридианном сечении, угол лопатки β_2 на выходе и значения угла β_1 в трех точках входной кромки. Разработанная методика позволяет на основании указанных данных определить параметры поверхности вращения, из которой «вырезается» лопатка [3]. Из множества возможных решений рассмотрим только такие, в которых ось поверхности вращения параллельна оси колеса, поскольку только в этом случае упрощается его изготовление. По данной методике спроектирована серия колес для высокорасходных ступеней ГПА.

Оптимизация вышеизложенных колес производилась на основе анализа расчета квазитрехмерного течения газа. В начале рассчитываются скорости в меридиальном течении [4, 5]. На основе расчета скоростей в меридиальном сечении определяются скорости на профиле лопатки [6]. Форма колеса представлена на трехмерном рис. 1.

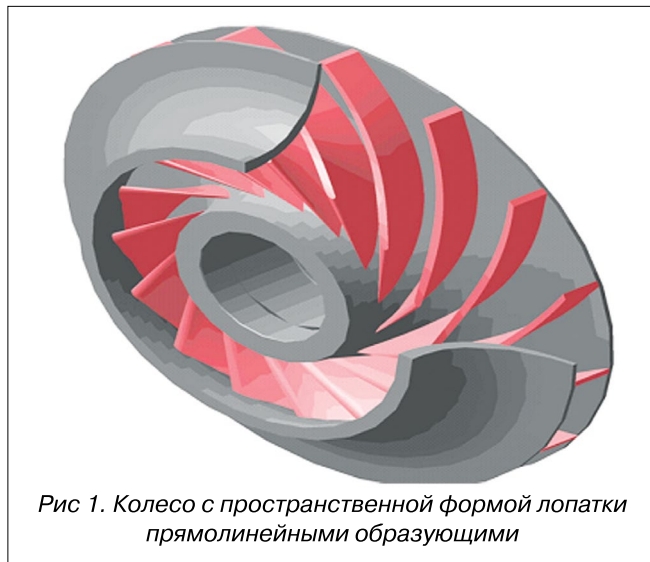


Рис 1. Колесо с пространственной формой лопатки прямолинейными образующими

Для МЦК были специально спроектированы составные колеса [7, 8, 9]

Разработанная форма меридианного сечения основного диска с кольцевой полостью решает проблему надежного соединения РК с валом при конической посадке. Наличие кольцевой полости в ступице обуславливает особенность радиальной деформации внутреннего кольца, в том числе, посадочной поверхности ступицы.

Цельно фрезерованные осерадиальные колеса спроектированы по специальной программе и проведено исследование на основе расчета трехмерного течения газа [10].

В ходе проектирования РК был проведен систематический анализ влияния параметров формы лопатки на основе численных решений множества вариантов моделей с применением конечно-элементной системы Flow Vision.

Форма колеса представлена на трехмерном рис. 2. Процесс изготовления колеса представлен на рис. 3.

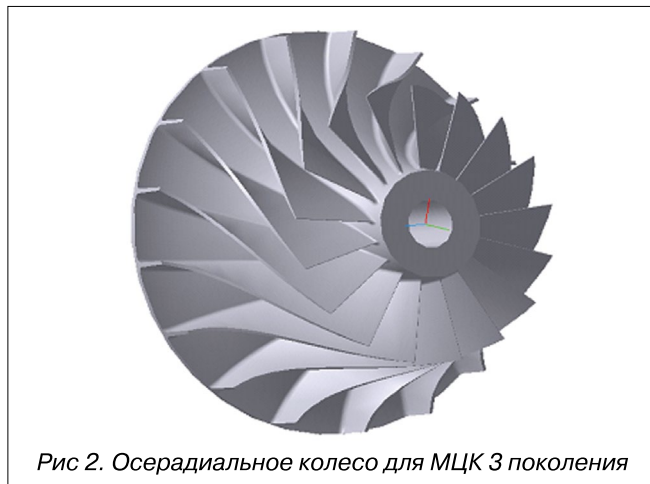


Рис 2. Осерадиальное колесо для МЦК 3 поколения

Основная часть модельных колес испытана на стенде в НИИтурбокомпрессор, проведена идентификация математической модели [11], колеса прошли экспериментальную проверку в действующих компрессорах.

В настоящее время в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», на основе многолетнего опыта проектирования осерадиальных рабочих колес, проводятся теоретические и экспериментальные исследования новых типов высокорасходных рабочих колес, которые должны найти применение в мультипликаторных и одновальных компрессорах. Использование данных ступеней, позволит в дальнейшем значительно расширить область применения компрессоров, проектируемых в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», а также повысит их конкурентоспособность на российском и мировом рынке.



Рис. 3. Изготовление осерадиального колеса на 5-ти координатном станке

Список литературы

1. Вячкилев О.А. Трехмерные рабочие колеса, разрабатываемые в АО «НИИтурбокомпрессор» для стационарных центробежных компрессоров. Проектирование и исследование компрессорных машин. Сборник научных трудов под ред. В.Б.Шнеппа. Казань, Вып. 3.1997. - С.77-80.
2. Вячкилев О.А. Аналитическое описание формы центробежных рабочих колес с пространственными лопатками. Проектирование и исследование компрессорных машин.-Сборник научных трудов под ред. В.Б. Шнеппа. Казань, 1982. - С.65-72.
3. Рабочее колесо центробежного компрессора. Патент РФ №2120568. / Вячкилев О.А. Ильин Б.А. Лебедев А.И. Лунев А.Т. 1998.- 4с.
4. Разработка методики и программы расчета на ЭВМ осесимметричного потока газа в аэродинамических каналах центробежных компрессоров конструкции СКБК. (Отчет СКБК №1376-80), Гос. рег. № 81032943, СКБК, Вячкилев О.А., Казань. 1980. - 65с.
5. Вячкилев О.А., Дроздов Ю.В., Лунев А.Т. Система проектирования проточной части центробежных компрессоров. Проектирование и исследование компрессорных машин: сборник науч. трудов под ред. В.Б. Шнеппа. Казань, Вып. 4. 1979. - С. 3-22.
6. Поташев А.В., Поташева Е.В. Разработка методики и программы расчета осерадиального осесимметричного потока с учетом переменности стеснения потока / Компрессорная техника и пневматика. 2005, №2. - С.8-12.
7. Муртазин Р.Ф., Русланов С.Л., Коханов С.Г. Разработка полуоткрытого рабочего колеса центробежного компрессора с уменьшенной деформацией его элементов / Проектирование и исслед. компр. машин: сборник науч. трудов, вып. 5. Казань.: ЗАО «НИИтурбокомпрессор», 2004.– 404 с.
8. Центробежный компрессор. Патент 2109172 RU. МПК F 04 D 17/08 / Муртазин Р.Ф., Сагитов Р.А., Коханов Г.С., Петросян Г.Г. / Б.И. 1998. №11.
9. Ротор центробежного компрессора. Патент 2174624 RU. МПК F 04 D 29/28 / Муртазин Р.Ф., Сагитов Р.А., Коханов Г.С., Петросян Г.Г. / Б.И. 2001. №28.
10. Футин В.А., Шубкин И.М. Особенности применения программного комплекса FljwVision для расчета проточной части турбомашин.
11. Дроздов Ю.В., Лунев А.Т. Усовершенствование математической модели осерадиального колеса центробежной ступени / Труды XIV Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. Том 1. Казань. 2007. - С. 323-326.