

УДК 621.515.1

**Г.А. БОНДАРЕНКО**, канд. техн. наук; проф. СумГУ, Сумы;  
**И.В. ЮРКО**, аспирант СумГУ, Сумы

### **МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕРАДИАЛЬНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ СО ВХОДНЫМ РЕГУЛИРУЮЩИМ АППАРАТОМ**

Представлены результаты численного расчета течения в осерадиальном рабочем колесе центробежного компрессора методами *CFD* с использованием пакета программ *ANSYS CFX*. Приведена методика компьютерного расчета газодинамических характеристик при изменении закрутки потока перед рабочим колесом, создаваемой поворотом лопаток входного регулирующего аппарата (ВРА). На основании теоретических исследований проведена оптимизация закона регулирования центробежного компрессора. Сделаны выводы об эффективности использования ВРА перед осерадиальным рабочим колесом.

**Ключевые слова:** осерадиальное колесо, регулирование, оптимизация, золотое сечение.

**Введение.** С развитием энергетики, машиностроения и других областей народного хозяйства возрастает необходимость в эффективных центробежных компрессорах. В настоящее время зарубежными фирмами, которые занимаются созданием центробежных компрессоров (*Atlas Copco, Cameron, Siemens, GE, Ingersoll Rand* и др.) накоплен значительный опыт проектирования и использования рабочих колёс (РК) с пространственными лопатками [1, 2]. В отличие от РК с цилиндрическими лопатками пространственные рабочие колеса при больших условных коэффициентах расхода  $\Phi = 0,08-0,15$  позволяют снизить скорости при входе на лопатки, обеспечить оптимальные углы атаки по всей высоте кромки на входе и использовать меридиональные контуры с непрерывно и плавно изменяющейся кривизной. Это дает возможность оптимальным образом распределить скорости, как по ширине канала, так и вдоль профиля лопатки. Высокая расходность пространственных РК существенно снижает радиальные габариты компрессора. Все эти преимущества мотивируют разработчиков более детально изучать сложную структуру течения газа в таких РК.

В связи с развитием компьютерных технологий, роль математического моделирования в энергомашиностроении увеличивается с каждым годом. Численная оптимизация течения (серия виртуальных экспериментов при помощи средств математического моделирования) позволяет получить наиболее эффективное рабочее колесо при низких материальных и временных затратах по сравнению с натурными экспериментами, что положительным образом сказывается на стоимости проектирования и позволяет получить высокие значения КПД, производительности и других основных параметров компрессора.

**Постановка задачи и объект исследований.** Несмотря на то, что осерадиальные колёса входят в состав ступени практически любого современного центробежного компрессора, в открытой печати достаточно мало информации относительно эффективности их регулирования ВРА и возможности расширения диапазона их работы на нерасчетных режимах.

Целью данной работы являлось определение газодинамических характеристик осерадиальной центробежной ступени с ВРА, используя программный комплекс *ANSYS CFX*.

В настоящей работе объектом исследования является дозвуковая центробежная ступень с осерадиальным рабочим колесом полуоткрытого типа и осевым ВРА с поворотными лопатками (см. рис. 1). Основные параметры рабочего колеса ступени:  $D_2 = 394$  мм, число лопаток  $z = 16$ , относительная ширина  $b_2/D_2 = 0,058$ ; угол выхода лопаток  $\beta_{л2} = 60^\circ$ ; втулочное отношение  $d_{вТ}/D_2 = 0,24$ ; отношение входного диаметра периферийной части лопаток  $D_1/D_2 = 0,6$ . Лопатки ВРА представляют собой плоские пластинки со скругленными входной и выходной кромками. Количество лопаток ВРА  $z_{ВРА} = 16$ , относительный шаг решетки  $t/B = 0,9$ , относительная высота лопатки  $B/L = 0,5$ . Расчётный режим работы компрессора: частота вращения  $n = 16000$  об/мин; массовая производительность  $5$  кг/с; полная температура на входе  $293$  К; полное давление на входе  $100000$  Па.

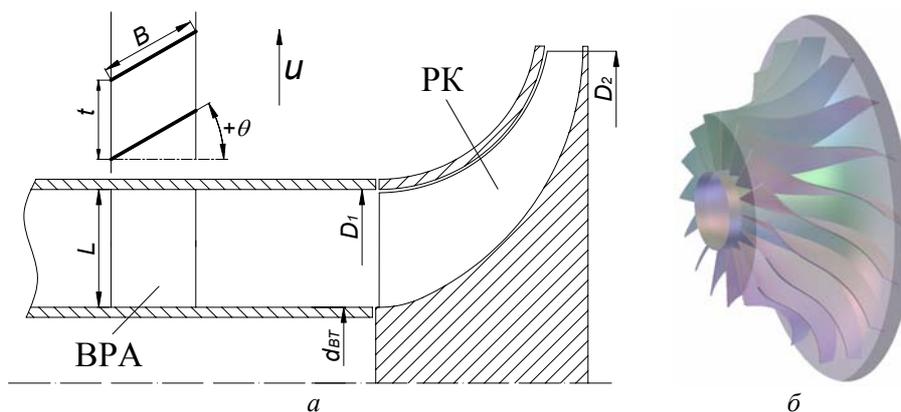


Рис. 1 – Объект исследований: а – общая схема; б – модель осерадиального РК

Так как было принято рассматривать задачу в осесимметричной постановке, то расчётной областью являлся сектор проточной части с одной лопаткой. Перед входом в РК на определенном расстоянии (см. рис. 1) располагается осевой регулирующий аппарат с поворотными лопатками. Для построения гексаэдрической сетки использовано приложение *Turbogrid*. Размер ближайшей к поверхности ячейке соответствовал безразмерной величине  $y^+ < 2$  для модели турбулентности *SST* [3]. Предварительно проводились расчёты на сетках с разным количеством ячеек для достижения сеточной сходимости. Итоговая расчётная сетка состояла из 1 млн. ячеек на область ВРА и 2 млн. ячеек на область РК. В качестве исходных данных для расчетов были приняты: полное давление и полная температура на входе и массовый расход на выходе из расчетной области. Рабочее тело – *Air Ideal Gas*. Турбулентность потока на начальном участке 5%. Важно отметить, что так же в расчете учитывался открытый зазор между корпусом и лопатками рабочего колеса. В качестве критерия сходимости принимается условие достижения максимальными невязками параметров течения значений ниже  $10^{-5}$ , либо отсутствие больших осцилляций в значениях выходных параметров.

**Результаты исследования.** На первом этапе были получены газодинамические характеристики (политропный коэффициент полезного действия  $\eta_{пд}^*$  и напора  $\psi_{пд}^*$  по полным параметрам) центробежного колеса при нулевом угле установки лопаток ВРА (см. рис. 2).

При небольшом снижении производительности, заметно повышение КПД колеса. Это подтверждает теорию, и связано с тем, что уменьшается скорость натекания на входные кромки колеса, а, следовательно, и потери на удар [4].

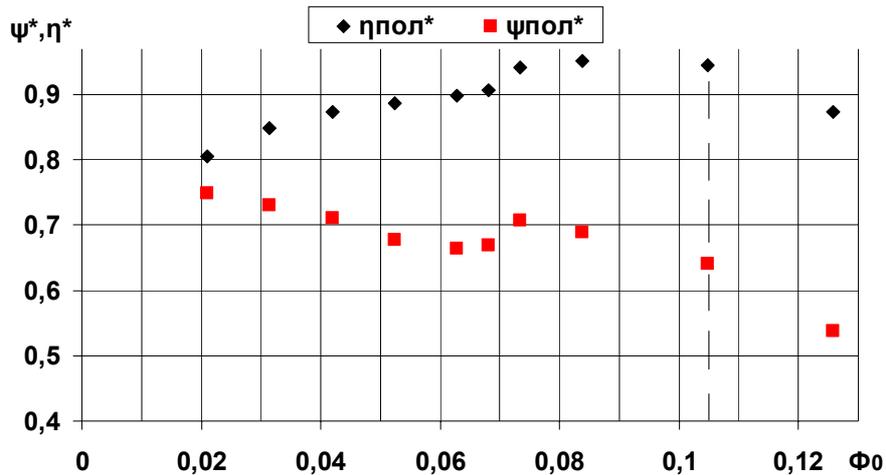


Рис. 2 – Газодинамические характеристики осерадиального колеса при  $\theta = 0^\circ$

Как видно из графика, кривые газодинамических характеристик имеют небольшой разрыв (резкое снижение КПД и напора) при значении условного коэффициента расхода  $\Phi = 0,07$  (65 % от номинальной производительности). Как показал анализ потока, при уменьшении производительности угол атаки становится достаточно большим и происходит отрыв потока со всасывающей стороны лопатки. Вихревая зона начинает образовываться на периферийной части лопатки, т.к. там большие значения скоростей. При уменьшении расхода эта зона не исчезает и требуется дополнительная энергия на поддержание вихреобразования.

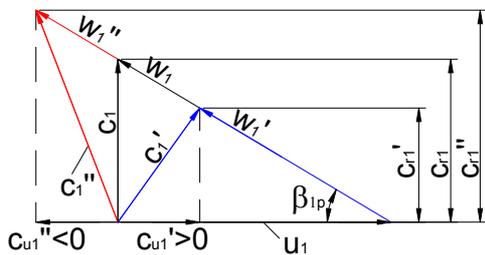


Рис. 3 – Треугольники скоростей при разной закрутке на входе в РК

ВРА позволяют создавать положительную закрутку (в сторону вращения колеса) при уменьшении расхода и отрицательную при его увеличении, обеспечивая тем самым режим безударного входа потока в колесо и расширение рабочей зоны характеристики колеса (см. рис. 3).

Угол лопатки по высоте на входе в осерадиальное колесо зачастую различен. Это связано с тем, что окружная скорость рабочего колеса на периферии и втулке отличается.

На втором этапе была поставлена задача определения оптимальных углов установки лопаток ВРА, которые обеспечили бы максимальное значение КПД рабочего колеса на требуемом режиме работы по производительности.

Поскольку каждый расчёт на компьютере требует значительного количества времени, важно сократить эти затраты до минимума путём разработки алгоритма оптимизации.

Задача максимизации КПД на разных режимах работы путём изменения угла установки лопатки ВРА относится к классу оптимизационных. Кривую КПД можно считать как унимодальную функцию, т.е. такую, у которой есть единственный экстремум на всей области определения. Уравнение целевой функции, связывающее угол установки лопаток ВРА и КПД колеса заранее неизвестно, поэтому невозможно применять методы первого и второго порядка для решения задачи условной оптимизации. Было решение использовать «метод золотого сечения» для поиска экстремума целевой функции [5]. Этот метод характеризуется простотой и эффективностью, т.к. не требует выполнения условия дифференцируемости и записи в

аналитическом виде. Ниже представлен алгоритм оптимизации для случая положительной закрутки потока, т.е.  $\theta > 0^\circ$ :

1) Определение начального интервала изменения углов  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ . Минимальное значение угла установки ВРА принято  $\theta_{\min} = 0^\circ$ , а максимальное значение рассчитывается исходя из треугольников скоростей.

2) Рассматриваемый отрезок делится в пропорции золотого сечения в обоих направлениях, т.е. выбираются две точки  $\theta_1$  и  $\theta_2$  такие, что

$$\frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_1} = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\theta_2 - \theta_{\min}} = \varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2},$$

где  $\varphi$  – пропорция золотого сечения.

Таким образом  $\theta_1 = \theta_{\max} - \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\varphi}$  и  $\theta_2 = \theta_{\min} + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\varphi}$ .

Точка  $\theta_1$  делит отрезок  $[\theta_{\min}, \theta_2]$  в отношении золотого сечения. Аналогично  $\theta_2$  делит отрезок  $[\theta_1, \theta_{\max}]$  в той же пропорции (см. рис. 4). В этих выбранных точках рассчитывается значение целевой функции  $\eta_{\text{пол}}^* = f(\theta)$ .

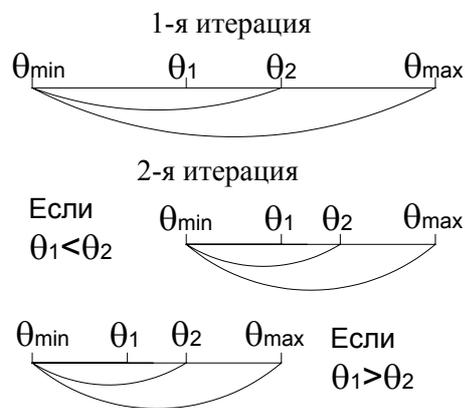


Рис. 4 – Схема деления отрезка методом золотого сечения

3) Сравниваем полученные значения КПД при углах установки  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Если  $\theta_1 \leq \theta_2$ , то  $\theta_{\min} = \theta_1$ . В противном случае  $\theta_{\max} = \theta_2$ .

4) На следующей итерации в силу свойства золотого сечения, уже надо искать значение КПД всего в одной новой точке, так как на предыдущем шаге уже были найдены функции на концах нового отрезка и в одной его внутренней точке.

Оптимизация считается завершенной, когда будет достигнута требуемая точность. Было принято считать оптимальным угол установки с точностью  $\pm 1^\circ$ .

В данной статье потребовалось проведение 5 численных расчетов (расчёт 5 значений угла поворота) на каждом режиме для поиска оптимального значения угла установки ВРА.

Начинать определять оптимальные углы установки целесообразней с номинального расхода (100 % производительности) и постепенно «спускаться» влево. Это связано с тем, что при таком подходе уменьшается начальный диапазон варьирования угла установки. Например, был найден оптимальный угол установки для расхода 4 кг/с равный  $\theta_{\text{опт}} = 8^\circ$ . Следовательно, при определении угла установки для 3 кг/с диапазон варьирования будет начинаться уже не с  $0^\circ$ , а с  $8^\circ$ . Таким образом, данный подход к оптимизации обладает эвристической составляющей. Окончательные результаты оптимизации представлены на рис. 5.

Значения оптимальных углов установки ВРА изменяются по определенному закону и отличны от линейного. Кривая оптимальных значений КПД ( $\theta = \text{opt}$ ) плавная, без изломов, а кривая номинальных значений ( $\theta = 0^\circ$ ) имеет излом в области  $\Phi_0 = 0,058$  (55 % производительности). Максимальная разница КПД колеса с регулированием и без достигается именно в этой области и равна  $\Delta\eta_{\text{пол}}^* = 4,83\%$ . Следует учесть, что полученные значения КПД учитывают потери энергии в ВРА.

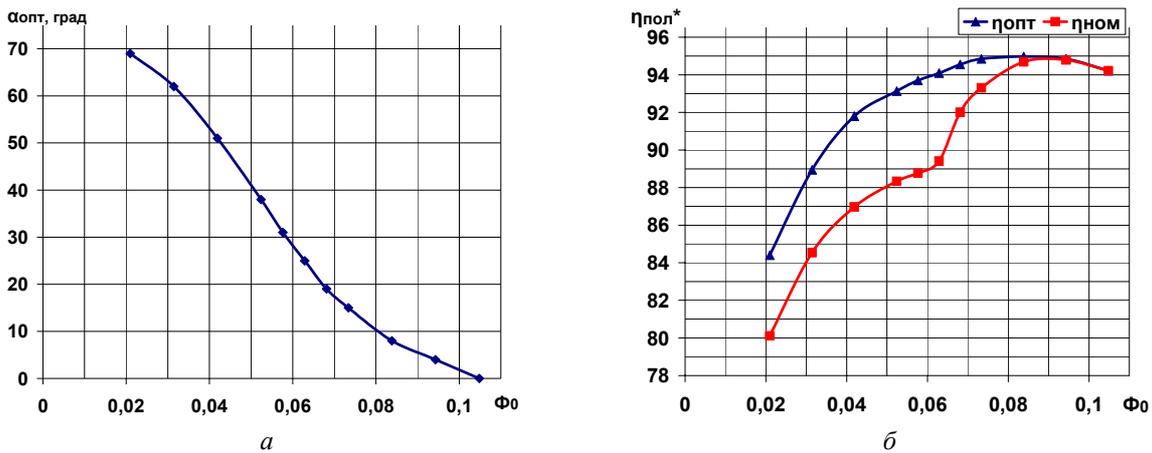


Рис. 5 – Оптимальные газодинамические характеристики:  
 а – угол установки ВРА; б – номинальный и оптимальный КПД

**Выводы.** Выполнена оптимизация работы центробежного компрессора с осерадиальным колесом путём рационального выбора угла закрутки потока на входе. Показана эффективность метода золотого сечения для численного решения задач с программным комплексом. На нерасчетных режимах повышение КПД составило до 5 %, что позволяет делать вывод о эффективности применения входных регулирующих аппаратов для расширения диапазона работы центробежных компрессоров.

**Список литературы:** 1. Кампти, Н. Аэродинамика компрессоров [Текст]: Пер с англ. – М.: Мир, 2000. – 688 с.: ил. 2. Compressor handbook [Text] / Ed. By Paul C. Hanlon. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 720 p. 3. Menter, F.R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications [Text] // AIAA J. – 1994. – 32, № 18. – P. 1598-1605. 4. Галеркин, Ю.Б. Турбокомпрессоры [Текст]: учеб. пособие / Ю.Б. Галеркин, Л.И. Козаченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 374 с. 5. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах [Текст]: учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд.; исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с.

Поступила в редколлегию 14.01.13

УДК 621.515.1

**Метод оптимизации газодинамических характеристик осерадиальной компрессорной ступени со входным регулирующим аппаратом** [Текст] / Г.А. Бондаренко, И.В. Юрко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 14(988). – С. 49-53. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.

Представлено результати чисельного розрахунку течії в осерадіальному робочому колесі відцентрового компресора методами *CFD* з використанням пакету програм *ANSYS CFX*. Наведено методику комп'ютерного розрахунку газодинамічних характеристик при зміні закрутки потоку перед робочим колесом, створюваної поворотом лопаток вхідного регулюючого апарату (ВРА). На підставі теоретичних досліджень проведена оптимізація закону регулювання відцентрового компресора. Зроблено висновки про ефективність використання ВРА перед осерадіальним робочим колесом.

**Ключові слова:** вісерадіальне колесо, регулювання, оптимізація, метод золотого перетину.

Results of numerical calculation of a flow in 3-dimensional impeller of the centrifugal compressor by the *CFD* methods with use of the software package of *ANSYS CFX* are presented. The technique of computer calculation of gasdynamic characteristics is given at change of a swirl flow in front of the eye of impeller, created by rotating blades of inlet guide vanes (IGV). On the basis of theoretical researches optimization of the law of regulation of the centrifugal compressor is performed. Conclusions are drawn on efficiency of use of IGV in front of the 3-dimensional impeller.

**Keywords:** 3-dimensional impeller, operation, optimization, golden section method.