

Ю. А. Фирсова, И. Г. Хисамеев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЛЬЦЕВЫХ СБОРНЫХ КАМЕР ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ*Ключевые слова: кольцевая сборная камера, центробежный компрессор, коэффициент потерь.**Предложена методика расчета коэффициента потерь энергии в проточной части кольцевой камеры. Показан расчет площади поперечных сечений камер, обеспечивающих минимальное значение окружной неравномерности статического давления.**Keywords: ring collection chamber, a centrifugal compressor, the loss factor.**The methods of calculation of the energy losses in the flow path of the annular chamber. Shows the calculation of the cross-sections of the chamber to ensure minimum circumferential unevenness of static pressure.***Введение**

К числу элементов проточной части центробежного компрессора (ЦК), оказывающим значительное влияние как на экономичность работы машины, так и на показатели ее надежности, является выходное устройство (ВУ).

На оптимальных режимах работы суммарные потери в ВУ обуславливают снижение КПД ЦК на величину от 1,5 до 5% в зависимости от типа ВУ и ЦК в целом. При отклонении от оптимального режима работы влияние ВУ на КПД существенно возрастает. Кроме того, ВУ является одним из источников окружной неравномерности параметров потока в ступени, и, следовательно, газодинамических усилий, действующих на ротор. Создаваемая ВУ окружная неравномерность распределения параметров потока существенно влияет на условия работы предшествующих элементов ступени. От степени обратного влияния ВУ на предшествующие элементы ступени зависит не только эффективность самого ВУ, но и конечной ступени (КС) в целом.

В практике компрессоростроения применяются два типа ВУ: улитки (с переменной по углу разворота площадью поперечных сечений) и кольцевые сборные камеры КСК (с постоянной площадью поперечного сечения). Преимущества и недостатки каждого типа ВУ подробно исследованы в работе [1]. Расчет ВУ сводится к определению его пропускной способности, т.е. размеров поперечных (меридиональных) сечений.

В общем случае, при решении задач выбора типа, метода расчета и проектирования ВУ для конкретного ЦК необходимо:

- обеспечить минимум потерь энергии в проточной части (ПЧ) самого ВУ;
- снизить степень неблагоприятного влияния ВУ на условия работы предшествующих элементов КС;
- согласовать работу ВУ с другими элементами КС;
- обеспечить технологичность изготовления и компактность корпуса компрессора в целом.

Существующие методы расчета улиток и кольцевых камер отвечают, в определенной степени, указанным требованиям в отдельности. Однако, следует констатировать, что полностью надежной методики проектирования ВУ, соответствующей

всему комплексу предъявляемых требований, пока еще неразработано.

В то же время, выбор способа расчета ВУ может быть осуществлен, принимая во внимание, условия работы, конструктивную базу, степень унификации корпуса ЦК. Ниже рассматриваются некоторые методы расчета КСК, разработанные авторами статьи, применительно к ЦК различного назначения и конструктивного исполнения.

Методика расчета

Для ЦК индивидуальной конструкции, работающих в области характеристики близкой к расчетной точке, при относительно небольших значениях давления нагнетания на передний план выходит требование обеспечения минимальных потерь в ПЧ самого ВУ, а так же согласование режимов работы ВУ и остальных элементов ступени. Для расчета КСК таких ЦК может быть рекомендована методика [2]. В ее основе лежит способ расчета коэффициента потерь энергии в проточной части ВУ.

Оптимальные с точки зрения обеспечения минимума значения коэффициента потерь ζ величины площадей поперечных сечений КСК $\bar{F}_{\text{опт}}$ для ВУ, расположенных после лопаточного (ЛД) и безлопаточного (БЛД) диффузоров определялись по выражениям (1) и (2), соответственно:

$$\bar{F}_{\text{к.опт}} = 1/(2 \cdot k_{\alpha} \cdot \text{tg} \alpha_4); \quad (1)$$

$$\bar{F}_{\text{к.опт}} = 1/(2 k_{\alpha} \text{tg}(2 \cdot \alpha_4)), \quad (2)$$

где $\bar{F}_{\text{к.опт}} = F_4 / F_{\text{к.опт}}$ – относительная оптимальная площадь поперечных сечений КСК; F_4 – площадь сечения диффузора на выходе;

$$k_{\alpha} = 0,333 + k_f \cdot A;$$

$$k_f = 1,436 - 0,579 \cdot (B/H) + 0,143 \cdot (B/H)^2$$

коэффициент формы поперечного сечения; B – ширина поперечного сечения КСК на его среднем диаметре; H – высота поперечного сечения; $A = 0,0117 + 0,138 / (D_H - 1)^{0,75}$; \bar{D}_H , \bar{D}_{BH} – относительные наружный и внутренний диаметры поперечного сечения; $\bar{D} = D/H$.

Исходными данными для проведения расчета являются диаметр D_4 , ширина b_4 , а также

расчетный угол потока α_4 на выходе из предшествующего КСК элемента [3]. Форма поперечного сечения КСК может быть принята на основании результатов вариантных расчетов, проведенных по предлагаемой методике, с учетом компоновки корпуса ЦК.

При решении задачи о нахождении величины $\bar{F}_{к.опт}$ целесообразно использовать метод итераций. В первом приближении принимается величина относительного диаметра \bar{D} из диапазона $\bar{D} = 4 \dots 8$, вычисляется правая часть соответствующего выражения (1) и (2). Далее по найденному значению $\bar{F}_{к.опт}$ устанавливается второе приближение для относительного диаметра. Расхождения между полученным \bar{D}_i и принятым $\bar{D}_{(i-1)}$ величинами относительного диаметра не должно превышать допустимого значения $\Delta D_{доп}$.

Значения площади поперечного сечения КСК ЦК, создаваемого на базе унифицированного корпуса сжатия, $F_{к.о}^*$ должно обеспечить приемлемый уровень эффективности для всех вариантов КС, которыми комплектуют ПЧ корпуса. В данном случае для расчета ВУ возможно использование метода, изложенного в [4]. Допуская, что при одинаковом отклонении $F_{к.о}^*$ относительное изменение коэффициента ζ одно и то же, расчет $F_{к.о}^*$ предлагается вести по выражению

$$F_{к.о}^* = \sqrt{F_{к.мин}^* \cdot F_{к.макс}^*}, \quad (3)$$

где $F_{к.мин}^*$, $F_{к.макс}^*$ – величины относительной площади поперечных сечений КСК, соответствующие минимальному и максимальному значению произведений $(\bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4)_{\min}$ и $(\bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4)_{\max}$ вариантов концевых ступеней унифицированного корпуса.

Учитывая специфику проектирования ЦК на базе унифицированных корпусов сжатия и рекомендации по выбору основных геометрических параметров КСК, величины $F_{к}^*$ для ступеней с ЛД и БЛД соответственно определяются как:

$$F_{к}^* = 2 \cdot \pi \cdot \bar{D}_4 \cdot \bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4 \times \left(0,345 + 0,138 / (\bar{D}_H - 1)^{0,75} \right); \quad (4)$$

$$F_{к}^* = \pi \cdot \bar{D}_4 \cdot \bar{b}_4 \cdot \text{tg}(2 \cdot \alpha_4) \times \left(0,345 + 0,138 / (\bar{D}_H - 1)^{0,75} \right); \quad (5)$$

где $\bar{b}_4 = b_4 / D_2$ – относительная ширина диффузора на выходе; $\bar{D}_4 = D_4 / D_2$ –

относительный диаметр диффузора;

$$F_{к}^* = F_{к} / (D_2)^2.$$

Алгоритм расчета $F_{к}^*$ аналогичен расчету $\bar{F}_{к.опт}$ по формулам (1), (2). После определения $F_{к.о}^*$ по выражению (3) следует вычислять значения ζ и потерь внутреннего КПД в КСК $\Delta \eta_{вн}$ на границах диапазона $\{(\bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4)_{\min}; (\bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4)_{\max}\}$ и оценить их приемлемость в случае неудовлетворительных результатов оценки применимости одного типоразмера КСК, необходимо исходный интервал $\{(\bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4)_{\min}; (\bar{b}_4 \cdot \text{tg} \alpha_4)_{\max}\}$ разбить на два или более диапазона и для каждого из них найти новое значение $F_{к.о}^*$, т.е. применить в одном корпусе несколько типоразмеров КСК, отличающихся величинами площади поперечных сечений.

Требование снижения создаваемой неравномерности давлений по окружности предшествующих ВУ элементов ПЧ КС имеет существенное значение для ЦК, сжимающих газы с высокой начальной плотностью работающих при высоких давлениях компримируемых сред. Работа при высоких значениях плотности сжимаемой среды характерна для ЦК в составе пароконденсационных холодильных машин.

Методика проектирования КСК с минимальной окружной неравномерностью статического давления основана на расчете его распределения при движении одномерного невязкого, несжимаемого потока газа с переменной массой вдоль пути.

В качестве интегральной характеристики неравномерности давления введена величина, равная квадратному корню из средней квадратичной величины относительного давления $\sqrt{\left(\Delta \bar{P}_{\theta}^2\right)_{ср}}$:

$$\sqrt{\left(\Delta \bar{P}_{\theta}^2\right)_{ср}} = 0,8165 \cdot \frac{\bar{F}_{к} \cdot \text{tg}(\alpha_4)}{1 + \text{tg}^2(\alpha_4)} \times \sqrt{3,2 \cdot \bar{F}_{к}^2 \cdot \text{tg}^2(\alpha_4) - 5 \cdot \bar{F}_{к} \cdot \text{tg}(\alpha_4) + 2}. \quad (6)$$

Вполне удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных по определению величины интегральной характеристики (рис. 1) позволили использовать выражение (6) для анализа влияния площади поперечного сечения КСК и режима ее работы на создаваемую неравномерность давления.

Результаты такого анализа представлены на рисунке 2. Функция $\sqrt{\left(\Delta \bar{P}_{\theta}^2\right)_{ср}} = f(\bar{F}_{к} \cdot \text{tg} \alpha_4)$ имеет два экстремума. Существует оптимальное значение величины площади поперечных сечений

КСК $\bar{F}_p = 0,7615 / \text{tg}(\alpha_4)$, при котором окружная неравномерность давления минимальна, что делает возможным проектирование КСК с минимальной степенью неравномерности распределения давления по их длине.

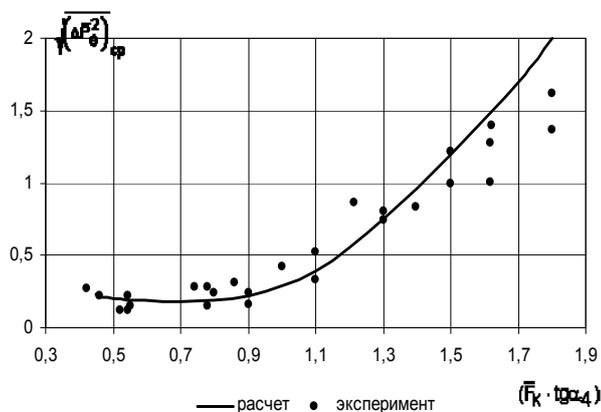


Рис. 1 – Интегральная характеристика неравномерности давления в КСК

Объединение полученных рекомендаций по определению площади поперечных сечений КСК, обеспечивающих минимальное значение интегральной характеристики распределения давления и способа расчета КСК по условию обеспечения минимума величины коэффициента потерь энергии позволяют рекомендовать алгоритм расчета КСК, удовлетворяющий таким требованиям к проектированию ВУ как снижение неблагоприятного влияния КСК на предшествующие ей элементы концевой ступени и высокая эффективность ПЧ самого ВУ.

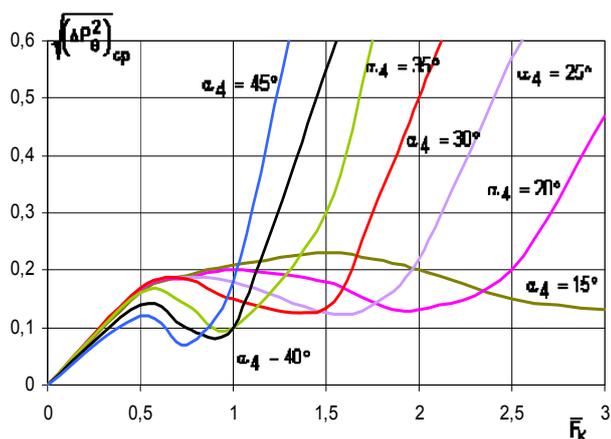


Рис. 2 – Анализ влияния площади сечения КСК на создаваемую неравномерность давления

В данном случае последовательность расчета КСК выглядит следующим образом:

1. Определяется относительная площадь сечений КСК по условию обеспечения минимума неравномерности давления:

$$\bar{F}_p = 0,7615 / \text{tg}(\alpha_4).$$

2. Определяется оптимальное значение коэффициента типоразмера:

$$k_\alpha = \text{tg}(\alpha_4) / (0,7615 \cdot \text{tg}(2 \cdot \alpha_4)).$$

3. Рассчитывается коэффициент формы сечения k_f .

4. Определяется параметр, характеризующий положение относительно меридиональной оси ЦК:

$$A = (k_\alpha - 0,333) / k_f.$$

5. Рассчитываются относительные наружный или внутренний диаметры КСК:

$$\bar{D}_H = \left((0,138)^{4/3} / (A - 0,0117)^{4/3} \right) + 1$$

или

$$\bar{D}_H = \left((0,138)^{4/3} / (A + 0,0117)^{4/3} \right).$$

6. Рассчитывается абсолютное значение площади сечения КСК.

7. Определяется высота и ширина сечения КСК на относительном диаметре.

8. Рассчитываются абсолютные значения внутреннего или наружного диаметров сечения.

9. Определяются величины коэффициента потерь энергии и параметры, характеризующие неравномерность распределения давления по длине КСК. При необходимости выполняются варианты расчеты.

Представленные методики расчета ориентированы только на оптимальный режим работы кольцевой сборной камеры.

Литература

1. Мифтахов, А.А. Аэродинамика выходных устройств центробежных компрессоров. – М., Машиностроение. – 1999. – С. 100-360.
2. Луговнин, К.И. Усовершенствованный метод расчета кольцевых сборных камер центробежных компрессоров / К.И. Луговнин, А.А. Мифтахов, А.А. Никитин // Компрессорная техника и пневматика. – 1997. - №1. – С. 55-59.
3. Фирсова, Ю.А. Влияние окружной неравномерности давления на работу центробежного компрессора/ Ю.А. Фирсова, И.Г. Хисамеев // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. – № 5. – С. 132-136.
4. Луговнин, К.И. К расчету выходных устройств унифицированных корпусов центробежных компрессоров / К.И. Луговнин, А.А. Мифтахов, А.А. Никитин // Проектирование и исследование компрессорных машин: Сб. Научных трудов. – Казань. – 1999. - №4. – С. 81-85.
5. Фирсова, Ю.А. Расчет неравномерности давления по длине кольцевой сборной камеры центробежных компрессоров / Ю.А. Фирсова, Э.Р. Хабибуллина // Вестник Казан. технол. ун-та. – том 15. – 2012. – № 7. – С. 154-157.