

Ю. А. Фирсова, Э. Р. Хабибуллина, И. Г. Хисамеев

# СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОКРУЖНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДАВЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СБОРНОЙ КАМЕРОЙ

*Ключевые слова:* кольцевая камера, окружная неравномерность давления.

*Представлены графики результатов, полученных расчетным и экспериментальным путем по неравномерности давления в кольцевых сборных камерах.*

*Keywords:* the ring modular chamber, non-uniformity of pressure.

*Schedules of the results received settlement and experimentally on non-uniformity of pressure in ring modular are presented.*

Кольцевая сборная камера КСК, в силу своих конструктивных особенностей, являются основными источниками окружной неравномерности потока. К настоящему времени проведено довольно большое количество экспериментальных исследований по распределению давления по длине выходных устройств [1, 2, 3]. Определение окружной неравномерности параметров потока в ступени центробежного компрессора ЦК необходимо для расчета радиальных сил, воспринимаемых опорными подшипниками компрессора. Неравномерность давления по окружности рабочего колеса РК также влияет на осевые усилия и изгибающий момент, действующие на ротор ЦК [1, 2]. Кроме того, окружная неравномерность давления является причиной возникновения вынужденных колебаний периферийных частей дисков РК между лопатками, что может привести к их разрушению. Зная величину окружной неравномерности давления, можно качественно оценить уровень газодинамических усилий. Для количественной оценки усилий, действующих на ротор, помимо распределения давления по окружности, необходимо знать распределения давления по дискам рабочего колеса, кинематику потока на входе и выходе из рабочего колеса.

Уравнение для расчета окружной неравномерности давления в КСК получено на основе уравнения движения жидкости с переменным расходом. При этом было принято допущение о пропорциональности расхода потока  $V_\theta$  углу разворота КСК  $\theta$ , т.е.  $V_\theta = V \cdot \bar{\theta}$ .

Уравнение для расчета распределения давления по длине КСК в зависимости от относительного угла разворота имеет вид:

– при  $\bar{\theta} = 0 \dots 0,75$

$$\Delta \bar{p}_\theta = \frac{2 \cdot \bar{F}_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha_4)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha_4)} \cdot [1 - 2 \cdot \bar{F}_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha_4) \cdot \bar{\theta}] \quad (1)$$

– при  $\bar{\theta} = 0,75 \dots 1$

$$\Delta \bar{p}_\theta = \frac{2 \cdot \bar{F}_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha_4)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha_4)} \cdot [1 - 2 \cdot \bar{F}_k \cdot \operatorname{tg}(\alpha_4) \cdot \bar{\theta} - \operatorname{tg}(\alpha_4) \cdot \bar{\theta}_1] \quad (2)$$

где  $\Delta \bar{p}_\theta = 2 \cdot [p(\bar{\theta}) - p(0)] / (\rho \cdot \bar{c}_4^2)$  – относительное статическое давление в  $\theta$ -ом сечении КСК;

$p(\bar{\theta})$  – статическое давление соответственно в контрольном  $\theta$ -ом сечении и сечении при  $\theta = 0$ ;  $\alpha_4$  – угол потока из предшествующего КСК элемента;  $\bar{F}_k$  – относительная площадь поперечного сечения КСК.

Подробный вывод уравнений (1) и (2) был рассмотрен в статье [4].

Для проверки соответствия расчетных уравнений (1) и (2) реальной картине, а также для определения области применения выполнены экспериментальные исследования распределения давления по длине КСК с тангенциальным выходным патрубком. В качестве метода экспериментального исследования был принят метод статических продувок. На стенде статических продувок производилось варьирование размеров входного и поперечного сечений КСК, введение в полость газосборника разделительных ребер при исследовании распределения давления по длине КСК.

Исследование моделей на стенде статических продувок проводилось при значениях чисел Рейнольдса потока в БЛД модели  $Re = (0,3 \dots 1,4) \cdot 10^5$ , что примерно соответствует значению чисел  $Re$  в реальных машинах. На стенде статических продувок была исследована модель 1С, геометрические параметры которой приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрические параметры модели 1С

Внутренний диаметр $D_{vn}$ , мм	Наружный диаметр $D_n$ , мм	$\bar{F}_k$	Вариант			
			1	2	3	
370	550	1,643	1	2	3	
370	550	2,19	4	5	6	
370	550	2,86	7	8	9	
370	550	3,487	10	11	12	

Каждый из представленных вариантов КСК отличается геометрическими параметрами и наличием полного или неполного ребра, полностью или частично перекрывающим проходное сечение камеры. Особенностью всех вариантов КСК с разделительными ребрами является более высокое, по срав-

сравнению с камерами без ребер (вар. 1, 4, 7, 10), оптимальное значение  $\operatorname{tg}\alpha_{4\text{опт}}$ . Установка полного разделительного ребра в камере с радиальным выходным патрубком увеличивает значение  $\operatorname{tg}\alpha_{4\text{опт}}$  в 1,31 – 1,59 раза (в зависимости от ширины БЛД), а в камере с тангенциальным патрубком – примерно в 1,1 – 1,2. Следовательно, более сильное влияние полного разделительного ребра на  $\operatorname{tg}\alpha_{4\text{опт}}$  наблюдается в камере с радиальным выходным патрубком.

Установка неполных разделительных ребер увеличивает значение  $\operatorname{tg}\alpha_{4\text{опт}}$ , но в меньшей степени, чем при полных разделительных ребрах. Для КСК с радиальным выходным патрубком – в 1,2 – 1,5 раза. Таким образом, при проектировании КСК с радиальным патрубком для получения наименьшей величины  $\Delta\bar{P}_0$  можно рекомендовать установку полного разделительного ребра.

На рис. 1,2 и 3 показаны распределения относительной величины давления  $\Delta\bar{P}_0$  по углу разворота КСК с тангенциальным патрубком, полученные расчетным путем по выражениям (1) и (2) (показаны сплошной линией) и экспериментально для трех вариантов 1, 2 и 3 (в виде точек на рисунке).

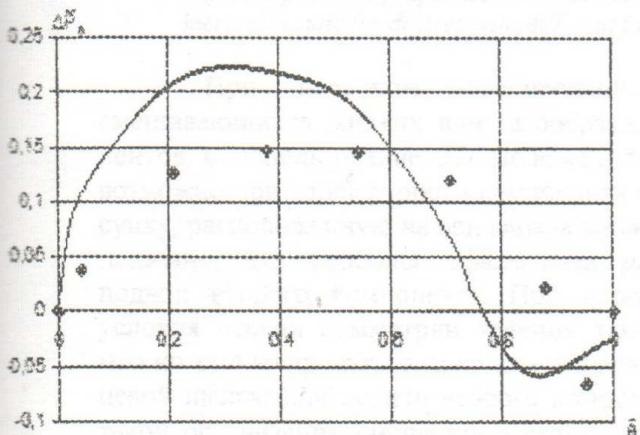


Рис. 1 – Распределение давления по углу поворота (вариант 1, без ребра)

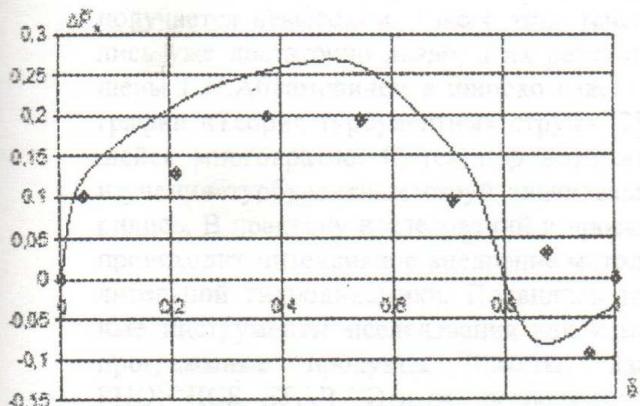


Рис. 2 – Распределение давления по углу поворота (вариант 2, неполное ребро)

Для всех исследованных вариантов КСК следует отметить удовлетворительное качественное совпадение теоретических и экспериментальных данных. Кроме того, в зоне, удаленной от нагнетательного патрубка КСК, наблюдается и количественное соглашение результатов. Различие между расчетными и оптимальными данными по распределению давле-

ния  $\Delta\bar{P}_0$  в вихревых зонах на участках  $\theta \leq 1$  практически для всех исследованных вариантов не превышает 6 – 9 %.

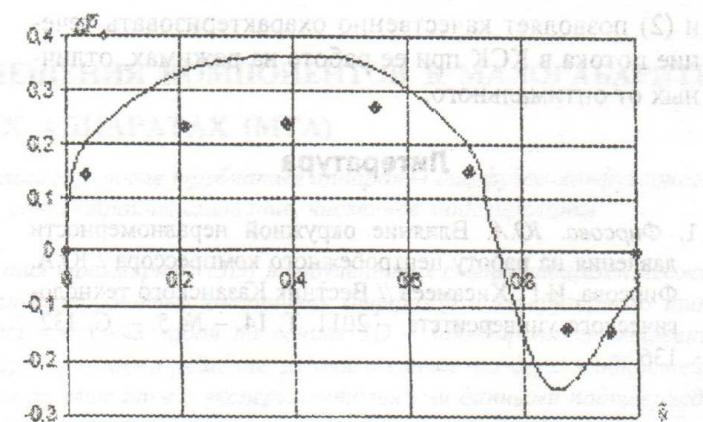


Рис. 3 – Распределение давления по углу поворота (вариант 3, полное ребро)

При этом сходимость рассчитанных по формулам (1) и оптимальных значений  $\Delta\bar{P}_0$  не зависит от типоразмера КСК: формы поперечного сечения, наличия того или иного типа разделительного ребра. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на точность теоретического значения  $\Delta\bar{P}_0$  влияют только погрешности определения величин оптимального угла потока на входе в КСК  $\alpha_{4\text{опт}}$  и относительной площади меридионального сечения  $\bar{F}_k$ . Объекты экспериментального исследования охватывают диапазон относительной площади поперечных сечений КСК  $\bar{F}_k = 1,6 – 3,5$  и режимы их оптимальной работы, соответствующие углам потока на входе. Из анализа рис. 1,2 и 3 видно, что расхождение расчетных и экспериментальных значений  $\Delta\bar{P}_0$  не зависит от абсолютной величины  $\bar{F}_k$  и  $\alpha_{4\text{опт}}$ , по крайней мере, в указанных диапазонах их изменения, которые характерны для используемых в практике компрессоростроения ступеней ЦК.

Вывод о том, что расхождение экспериментальных и расчетных значений  $\Delta\bar{P}_0$  не зависит от наличия и типа разделительного ребра, сделан на основании сравнения графиков распределения  $\Delta\bar{P}_0 = f(\theta)$  для вариантов КСК, исследованных методом статических продувок и отличающихся только типом перегородок, установленных в месте соединения нагнетательного патрубка НП с газосборником КСК (табл. 1). Расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями величины  $\Delta\bar{P}_0$  в области углов  $\theta \leq 1$  практически равны. Наличие перегородки в области нагнетательного патрубка в кольцевых камерах способствует увеличению окружной неравномерности давления (в среднем на 2 – 4%) по длине КСК. Это приводит также к смещению оптимальных режимов работы КСК в область больших расходов по сравнению с КСК без разделительных ребер. В общем случае, данный факт объясняется изменением структуры

потока в области его выхода в нагнетательный патрубок КСК.

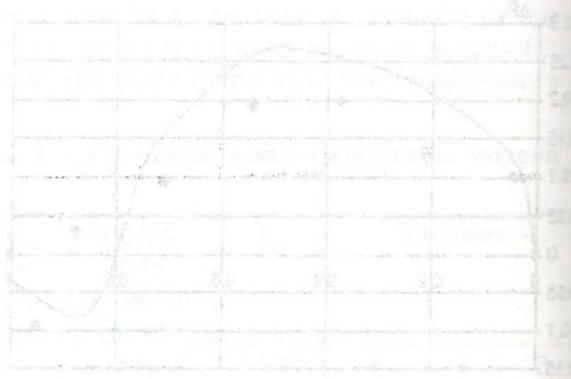
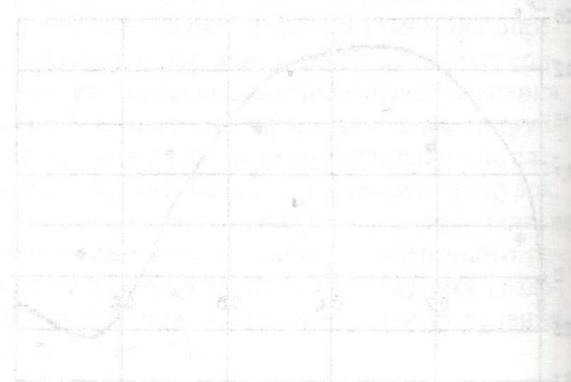
Таким образом, расчет величины распределения давления  $\Delta P_\theta$  по полученным уравнениям (1) и (2) позволяет качественно охарактеризовать течение потока в КСК при ее работе на режимах, отличных от оптимального.

## Литература

- Фирсова, Ю.А. Влияние окружной неравномерности давления на работу центробежного компрессора / Ю.А. Фирсова, И.Г. Хисамеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. Т. 14. – № 5. – С. 132-136.

- Фирсова, Ю.А. Расчет распределения давления по длине кольцевых сборных камер центробежного компрессора с тангенциальным патрубком / Ю.А. Фирсова, К.И. Луговинин, И.Г. Хисамеев // Компрессорная техника и пневматика. – 2009, вып. 1. – С. 26-29.
- Луговинин, К.И. Особенности расчета кольцевых сборных камер центробежных компрессоров / К.И. Луговинин, А.А. Мифтахов, Ю.А. Фирсова // Труды XIV Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. Том 1/ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнегеля». – Казань: Изд-во «Слово», – 2007. – С. 398-403.
- Фирсова, Ю.А. Расчет неравномерности давления по длине кольцевой сборной камеры центробежных компрессоров / Ю.А. Фирсова, Э.Р. Хабибуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. Т. 15. – № 5. – С. 154-157.

© Ю. А. Фирсова – канд. техн. наук, доц. каф. холодильной техники и технологий КНИТУ, firsovay@mail.ru; Э. Р. Хабибуллина – магистр КНИТУ; И. Г. Хисамеев – д-р техн. наук, проф., зав. каф. холодильной техники и технологий КНИТУ.



– 6 –

– 7 –