

Математическая модель для расчета потерь в кольцевых сборных камерах центробежных компрессоров

Ю.А. Фирсова, И.Г. Хисамеев (ОАО «Казанькомпрессормаш»)

Разработан метод математического моделирования для расчета потерь в кольцевых сборных камерах концевых ступеней центробежных компрессоров. Приведены расчетные формулы. Сопоставлены результаты расчета коэффициентов потерь в кольцевых сборных камерах по математической модели и другим методикам.

Ключевые слова: математическое моделирование, центробежные компрессоры, концевые ступени, кольцевые сборные камеры, потери в проточной части.

Mathematical model for calculation of losses in ring collecting chambers of centrifugal compressors
Yu.A. Firsova, I.G. Khisameev

A method of mathematical modeling was designed to calculate losses in ring collecting chambers of the end stages of centrifugal compressors. Equations for calculation are presented. The results have been compared with other methods.

Key words: mathematical modeling, centrifugal compressors, end stages, ring collecting chambers, losses within the setting.

Выходные устройства (ВУ) концевых ступеней (КС) центробежных компрессоров (ЦК) оказывают существенное влияние на КПД и зону устойчивой работы, а также надежность ЦК, поскольку в значительной степени определяют аэродинамические нагрузки, действующие на ротор, особенно на нерасчетных режимах работы. Влияние ВУ резко усиливается при использовании центробежных компрессоров в области высоких давлений и при сжатии газов из группы галоидозамещенных углеводородов, работа на которых происходит при больших числах Маха, а также при повышении уровня окружных скоростей. В связи с этим отработка высокоэффективных конструкций ВУ и создание методов их расчета и оптимального проектирования имеют большое значение [1].

Метод математического моделирования для расчета потерь в кольцевой сборной камере (КСК) разрабо-

тан на основе комплексной обработки большого числа экспериментальных данных, полученных при испытании ступеней с различными геометрическими и режимными параметрами [2].

Основываясь на представлениях о характере течения потока, проточную часть (ПЧ) КСК можно разбить на три участка (рис. 1):

- участок 4-5 – поворотный канал;
- участок 5-6 – торовая часть камеры;
- участок 6-К – выходной конический диффузорный патрубк.

На выделенных участках возникают потери трения $h_{тр}$; потери, обусловленные наличием радиального градиента давления $h_{инд}$; потери в нагнетательном патрубке, обусловленные трением, изогнутостью канала и диффузорностью течения $h_{н.п.}$, а также потери в меридиональном сечении $h_{мер}$. Тогда потери в КСК

$$h_{КСК} = h_{тр} + h_{мер} + h_{инд} + h_{н.п.} \quad (1)$$

Слагаемые выражения (1) можно представить в виде структурно идентичных формул, имеющих следующий вид (например, для $h_{тр}$):

$$h_{тр} = c_{W_{тр}} \rho_{ср} \frac{c_{ср}^3}{2m} F_{КСК}, \quad (2)$$

где $c_{W_{тр}}$ – коэффициент силы сопротивления; $\rho_{ср}$ – средняя плотность газа в проточной части КСК; $c_{ср}$ – средняя скорость продольного обтекания канала КСК в радиальной плоскости; m – массовый расход газа; $F_{КСК}$ – площадь камеры.

Используя аналогичную структурную запись для остальных составляющих потерь, можно получить выра-

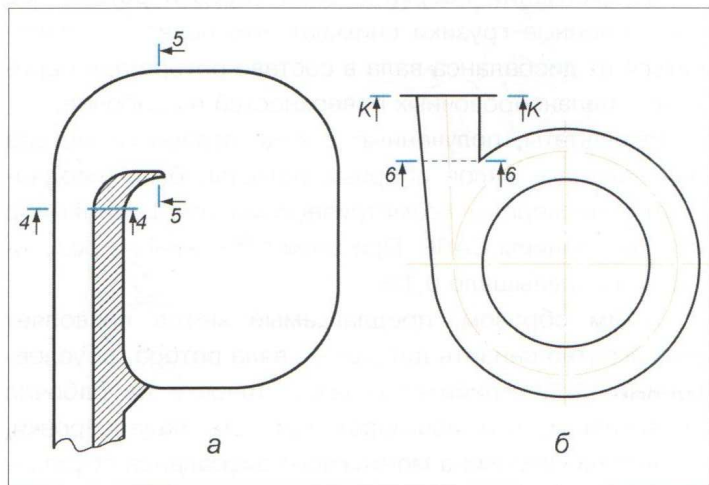


Рис. 1. Схема сечения КСК в меридиональной (а) и радиальной (б) плоскостях

жение для определения суммарного коэффициента сопротивления $c_{W_{КСК}}$ в виде суммы составляющих коэффициентов c_{W_i} . В качестве параметра, характеризующего эффективность КСК, выбрана доля потерь КПД:

$$\Delta\eta = \frac{h_{КСК}}{h_i} = \frac{\bar{\varepsilon}^3 \bar{F} \bar{c}}{2(1 + \beta_{тр} + \beta_{пр}) \psi_T \Phi} c_{W_{КСК}}, \quad (3)$$

$$\text{где } \bar{F} = \frac{F_{КСК}}{\pi D_2^2/4}; \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\rho_{ср}}{\rho_0}; \quad \bar{c} = \frac{c_{ср}}{u_2};$$

где $\beta_{тр}$ – коэффициент дискового трения; $\beta_{пр}$ – коэффициент протечек в колесе; ψ_T – коэффициент теоретического напора; Φ – коэффициент расхода; D_2 – диаметр колеса; ρ_0 – плотность газа на входе в ступень ЦК; u_2 – окружная скорость колеса.

Отдельные коэффициенты сопротивления, соответствующие составляющим потерь, могут быть представлены в виде функций от критериев подобия M и Re , а также от комплексов параметров, характеризующих распределение скоростей идеального потока $\bar{w}$ и форму КСК:

$$c_{W_{КСК}} = f(M_i, Re_i, \bar{w}_i, \bar{F}_i). \quad (4)$$

Тогда общий вид аналитической зависимости потерь в КСК

$$\Delta\eta = \frac{1}{1 + \beta_{пр} + \beta_{тр}} \frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{2 \psi_T \Phi} \left\{ k_{M_{тр}} k_{Re_{тр}} c_{W_{тр}}(\bar{w}, \bar{F}) + k_{M_{мер}} k_{Re_{мер}} c_{W_{мер}}(\bar{w}, \bar{F}) + k_{M_{инд}} k_{Re_{инд}} c_{W_{инд}}(\bar{w}, \bar{F}) + k_{M_{н.п}} k_{Re_{н.п}} c_{W_{н.п}}(\bar{w}, \bar{F}) \right\}, \quad (5)$$

где k_M , k_{Re} – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние критериев соответственно M и Re ; c_W – коэффициенты сил сопротивления соответствующих потерь.

При конкретизации выражения математической модели (ММ) были использованы приближенные методы, которые основаны на следующих допущениях:

- коэффициент силы сопротивления трению $c_{W_{тр}}$ является функцией относительного замедления потока – $\Delta c/c_{ср}$;
- оценка влияния пространственности течения газа в канале КСК производится путем введения соответствующих потерь $h_{мер}$ и $h_{инд}$ в выражение общего вида потерь;
- коэффициент силы сопротивления $c_{W_{инд}}$ является функцией поперечного градиента скорости и относительной ширины канала;
- влияние чисел M и Re обобщенно учитывается поправочными коэффициентами k_M и k_{Re} .

Составляющие потерь, входящие в выражение (1), на основании принятых допущений определяются следующими выражениями:

– потери на трение [3]

$$h_{тр} = \frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{\Phi} X_1 \left[1 + X_2 \left(\frac{\Delta c}{c_{ср}} \right) \right]^{X_3}; \quad (6)$$

– потери в меридиональном сечении

$$h_{мер} = X_4 \operatorname{tg}^{1,25} \frac{v_3}{2} \left(1 - \frac{b_4 r_4}{b_{ср} R_{ср}} \right)^2 (\bar{c}_{r4}^2); \quad (7)$$

– индуктивные потери

$$h_{инд} = \frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{\Phi} X_5 \frac{(\bar{c}_{аср})^2}{(b_{ср}/l_{ср})^{X_6}}; \quad (8)$$

– потери в нагнетательном патрубке

$$h_{н.п} = \frac{1}{2} \bar{c}_{\theta_k}^2 \left[\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{x_7}{\sin \frac{v_3}{2}} + X_8 \operatorname{tg}^{X_9} \frac{v_3}{2} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – отношение средней плотности воздуха сечения к плотности воздуха на входе в ступень; $X_1 - X_9$ – искомые параметры; v_3 – эквивалентный угол раскрытия; b_4 – ширина сечения на входе в КСК; r_4 – радиус сечения на входе в КСК; $b_{ср}$ – средняя ширина сечения; $R_{ср}$ – средний радиус сечения; r_4 – среднерасходная радиальная составляющая скорости на входе в КСК; $c_{аср}$ – усредненный поперечный градиент скорости; $l_{ср}$ – усредненная длина ПЧ КСК; $\bar{c}_{\theta_k}$ – скорость в сечении $\theta = \theta_{\pi}$; θ_{π} – угол расположения нагнетательного патрубка; n – коэффициент геометрической диффузорности.

В выражении (9) первая составляющая указывает потери на трение, вторая – потери от расширения.

На основе выражения (5) с учетом уравнений (6) – (9) получена в общем виде ММ для расчета потерь КПД в КСК (одно уравнение):

$$\Delta\eta = \frac{1}{1 + \beta_{тр} + \beta_{пр}} \frac{1}{2 \psi_T} (1 + X_{10} M^{X_{11}}) \times \\ \times (1 + X_{12} / Re^{X_{13}}) \left\{ \frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{\Phi} X_1 \left[1 + X_2 \left(\frac{\Delta c}{c_{ср}} \right) \right]^{X_3} + \right. \\ \left. + X_4 \operatorname{tg}^{1,25} \frac{v_3}{2} \left(1 - \frac{b_4 r_4}{b_{ср} R_{ср}} \right) (\bar{c}_{r4}^2) + \frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{\Phi} X_5 \frac{(\bar{c}_{аср})^2}{(b_{ср} + l_{ср})^{X_6}} + \right. \\ \left. + \bar{c}_{\theta_k}^2 \left[\left(1 - 1/n^2 \right) \frac{X_7}{\sin(v_3/2)} + X_8 \operatorname{tg}^{X_9} (v_3/2) (1 - 1/n^2)^2 \right] \right\}, \quad (10)$$

Для нахождения конкретного вида ММ запишем уравнение (10) в виде

$$\Delta\eta = \varphi(\bar{x}, \bar{A}), \quad (11)$$

где $\Delta\eta$ – расчетное значение функции (в данном случае – доля потерь КПД, характеризующая эффективность КСК); $\bar{x} = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, X_n)$ – вектор искомых параметров; $\bar{A} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, a_m)$ – вектор известных параметров, т.е. множество значений чисел M , Re , $\bar{F}$ и др.

На невязки, т.е. разницу между вычисленным и известным опытным значением $\Delta\eta$, накладывается условие, предложенное Лежандром, для обеспечения которого требуется минимизации суммы квадратов невязок:

$$G = \sum_{i=1}^K [\Delta\eta_{i \text{ экс}} - \varphi(\bar{x}_i + \bar{A}_i)]^2, \quad (12)$$

где $\Delta\eta_{i \text{ экс}}$ – данные, полученные экспериментальным путем; $\varphi(\bar{x}_i, \bar{A}_i)$ – значение функции, полученное из расчетов по ММ; i – номер варианта или режима экспериментального испытания.

Задача решается перебором всех значений вектора $\bar{X}$ с некоторым шагом, обеспечивающим практическую точность ММ, и выбором из этого множества значений конкретного значения $\bar{X}$. В данной работе за рабочий вариант был принят метод случайного поиска с переменным шагом [2].

При определении неизвестных коэффициентов x_i методом случайного поиска границы исходных параметров варьировались в широком диапазоне. Конкретизация ММ потерь с использованием данных по 135 вариантам концевых ступеней производилась поэтапно с помощью программы, составленной на языке Visual Basic. Каждый этап поиска заканчивался анализом полученного решения, по результатам которого вносились необходимые коррективы в частные функциональные зависимости и в границы поиска вектора неизвестных коэффициентов. Среднее отклонение значений $\Delta\eta_{\text{расч}}$ от $\Delta\eta_{\text{экс}}$ было уменьшено с 18 до 5,7%.

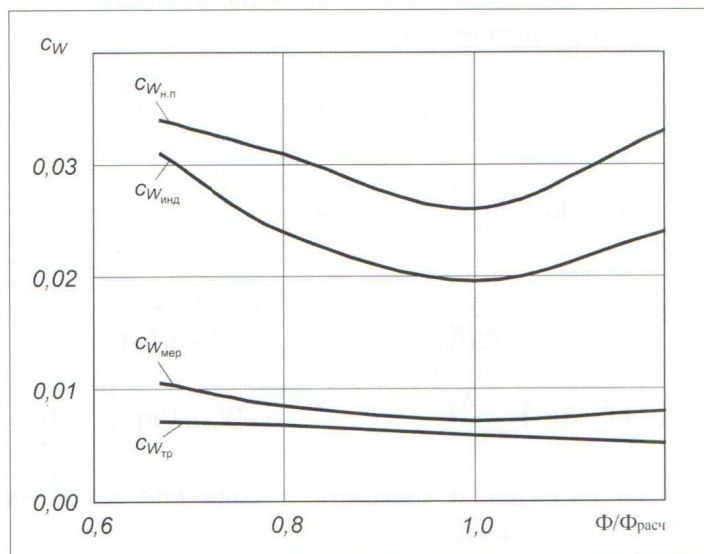


Рис. 2. Соотношение коэффициентов сил сопротивления составляющих потерь

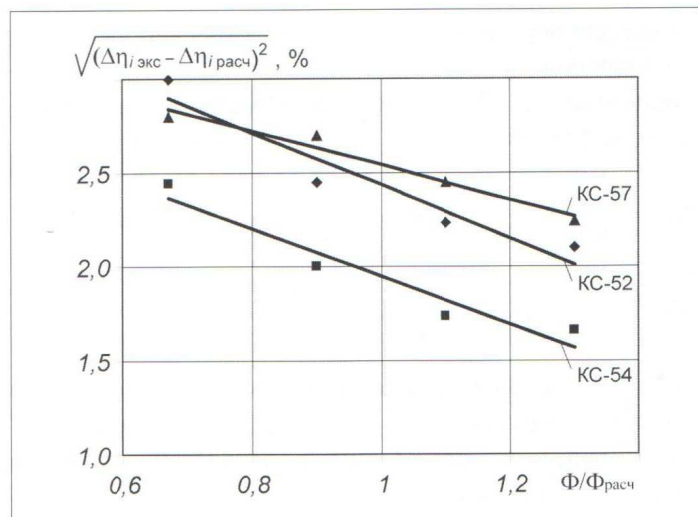


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений $\Delta\eta$ для трех концевых ступеней

По результатам проведенной идентификации ММ для определения $\Delta\eta$ имеет в окончательный вид:

$$\Delta\eta = \frac{1}{1 + \beta_{\text{тр}} + \beta_{\text{пр}}} \frac{1}{2\psi_{\text{т}}} (1 + 1,5M^{1,1}) \left(1 + \frac{58}{Re}\right) \times \\ \times \left[\frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{\Phi} 0,007 \left[1 + 0,03 \left(\frac{\Delta c}{c_{\text{cp}}} \right) \right]^{0,6} + \right. \\ \left. + 0,12 \text{tg}^{1,25} \frac{v_3}{2} \left(1 - \frac{b_4 r_4}{b_{\text{cp}} R_{\text{cp}}} \right) (\bar{c}_{r4}^2) + \frac{\bar{\varepsilon} \bar{F} \bar{c}^3}{\Phi} 0,002 \frac{(\bar{c}_{a \text{ cp}})^2}{(b_{\text{cp}}/l_{\text{cp}})^{0,1}} + \right. \\ \left. + \bar{c}_{0 \text{ к}}^2 \left[\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{0,0018}{\sin(v_3/2)} + 8 \text{tg}(v_3/2) \left(1 - \frac{1}{n} \right)^2 \right] \right], \quad (13)$$

Диапазон применимости ММ: по числам $Re = 2,1 \cdot 10^4, 2 \cdot 10^5$ и $M = 0,3 \dots 0,4$; по относительной площади камер $\bar{F} = 1,54, 4$.

На рис. 2 представлены зависимости между составляющими потерь (с учетом коэффициентов сил сопротивления) в ПЧ КСК, вычисленные по выражению (13). Как видно, потери трения составляют 10–15% суммарных потерь. Потери, обусловленные особенностями меридионального течения в КСК, составляют 12–17% общих потерь; индуктивные потери, обусловленные наличием поперечного градиента давления, – 20–35%. Сложный характер картины течения в начальной зоне нагнетательного патрубка обуславливает сравнительно высокие значения потерь (40–50% суммарных потерь).

Проверка расчетного распределения между составляющими потерь, полученного с помощью конкретного вида ММ, удовлетворительно согласуется с опытными результатами. Разность (%) в соотношениях между различными составляющими потерь обусловлена специфической геометрической формы ПЧ и особенностями тече-

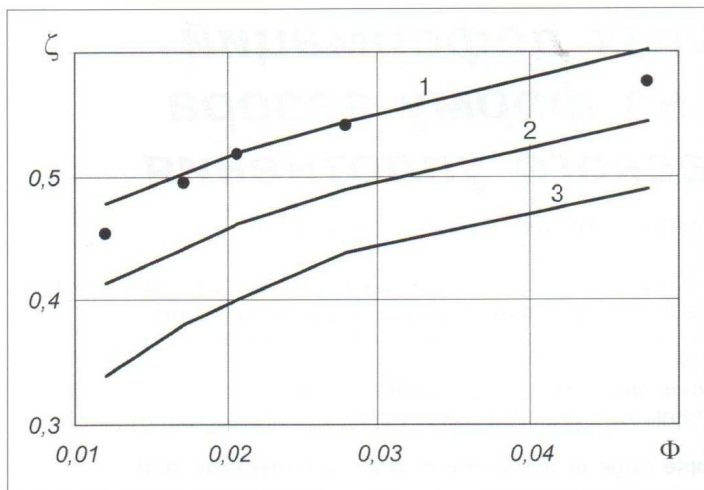


Рис. 4. Сравнение результатов расчета коэффициента потерь в КСК с использованием разработанной ММ (1) и методик, рекомендуемых в работах [4] (2) и [5] (3)

ния в предшествующих элементах концевой ступени.

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений величин $\Delta\eta$ для трех концевых ступеней (КС-52, КС-54, КС-57) показало (рис. 3), что в пределах области применимости ММ, установленной в процессе экспериментального исследования, и идентификации

модели, расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает экспериментальной погрешности определения величины и составляет 9%.

Сопоставление характеристик, рассчитанных с использованием выражения (13) с характеристиками, полученными по рекомендациям других авторов (рис. 4), показывает, что данные, полученные расчетом по разработанной ММ, имеют большую точность. Следовательно, математическая модель пригодна для анализа влияния определяющих параметров на потери в КСК.

Список литературы

1. Мифтахов А.А. Аэродинамика выходных устройств турбокомпрессоров. М.: Машиностроение, 1999.
2. Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б., Никифоров А.Г. Оценка эффективности двухступенных центробежных компрессоров на основе статистической обработки результатов эксперимента//Труды ЛПИ. СПб., 1977.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
4. Никитин А.А., Цукерман С.В. Расчет потерь в выходном устройстве центробежного компрессора//Энергомашиностроение. 1979. № 6.
5. Тарабарин О.И. Исследование аэродинамики кольцевых сборных камер концевых ступеней центробежных компрессоров. Дис. ... канд. техн. наук. Казань: КХТИ им. С.М. Кирова, 1979.

IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2010

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ

**23 - 26
НОЯБРЯ 2010 г.**

МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА | УКРМАШ ТЕХ | УКРВОТ ТЕХ | УКРНАСТ | ГИДРАВЛИКА ПНЕВМАТИКА | ПОДШИПНИКИ | УКРПРОМ АВТОМАТИЗАЦИЯ | УКРСАРКА | ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ | ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ | БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА | СУБМОНТАЖ

Генеральные информационные партнеры:

Технический партнер:

RentMedia

ufi
Approved
Event

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
Украина, Киев, Броварской пр-т, 15
М "Левобережная"

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Министерство промышленной
политики Украины

ООО "Международный выставочный центр"
Украинская Национальная Компания
"Укрстанкоинструмент"



ООО "Международный выставочный центр"
Украина, 02660, Киев, Броварской пр-т, 15
☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: lilia@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

Информационная поддержка:

