УДК 621.438.001 2 (02)

Н.Ф. МУСАТКИН, В.М. РАДЬКО, А.Д. БАЛАХОНОВ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ КОЛЕС АКТИВНЫХ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНЫХ МИКРОТУРБИН

Приведена методика определения геометрических параметров профилей лопаток рабочих колес на основании результатов газодинамического расчета ступени активной центростремительной микротурбины.

центростремительная микротурбина, рабочее колесо, решетка, контур, спинка, корытце, кромка, угол заострения, конструктивный угол, кинематический угол потока, число Маха, число Рейнольдса

Введение

Стремление к автоматизации процесса газодинамического проектирования центростремительных микротурбин (ЦСМТ) предполагает наличие геометрических моделей соплового аппарата (СА) [1] и рабочего колеса (РК).

1. Формулирование проблемы

Построение геометрии лопаточных венцов РК во многом зависит от принятой схемы формирования контуров спинки и корытца профилей лопаток, что обусловлено невозможностью обеспечения постоянства ширины a_i межлопаточных каналов по высоте лопатки вследствие естественной веерности. С другой стороны, в решетках РК кинематические углы потока β_1 на входе и β_2 на выходе примерно одинаковы, поскольку степень реактивности для ступеней ЦСМТ, как правило, близка к нулю.

По этой причине широко известные и хорошо зарекомендовавшие себя способы доминирующей кривизны [2] или "гиперболических спиралей" [3] – непригодны для случая построения контуров спинки и корытца РК ЦСМТ.

Тем не менее, необходимость полной автоматизации процесса газодинамического проектирования ЦСМТ в целом требует создания других способов формирования контуров спинки и корытца, аналогичных приведенным в работе [3].

2. Решение проблемы. Определение конструктивно-геометрических параметров РК ЦСМТ

В данной статье описана геометрическая модель рабочего колеса, построенная по принципу соединения входных и выходных кромок профилей лопаток окружностями, исключающая коррекцию исходных данных и позволяющая решить поставленную задачу.

По результатам газодинамического расчета считаются известными следующие геометрические характеристики РК:

1. Диаметр на входе в рабочее колесо $D_1 = 2 \cdot R_1$;
2. Диаметр на выходе из рабочего колеса $D_2 = 2 \cdot R_2$;
3. Угловой шаг решетки лопаток Θ;
4. Конструктивный угол на входе в РК $\beta_{1л}$;
5. Конструктивный угол на выходе из РК $\beta_{2л}$;
6. Минимальное расстояние между соседними лопатками – «горло» межлопаточных каналов $a_г$;
7. Радиусы скругления входной и выходной кромок лопаток РК r_1 и r_2;
8. Углы заострения входной и выходной кромок $\gamma_{вх}$ и $\gamma_{вых}$.

Обозначения указанных геометрических величин приведены на рис. 1.

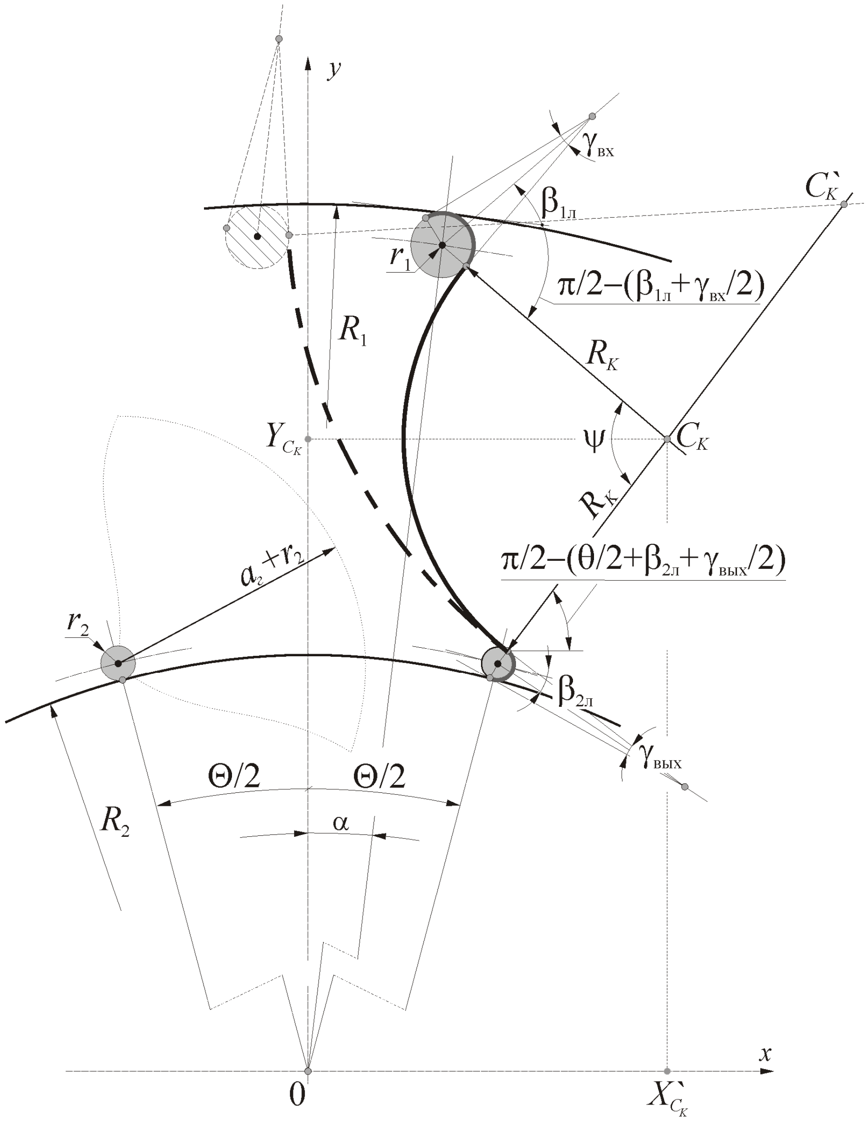

Рис. 1. Построение корытца лопатки РК ЦСМТ

2.1. Определение конструктивно-геометрических параметров корытца лопатки РК ЦСМТ

В предложенной работе последовательность формирования контура профиля лопатки начинается с корытца.

Предварительно величину $a_г$ следует сравнить с минимальным сечением $a_{г\,min}$, определяемым технологическими ограничениями при фрезеровании каналов. В случае превышения последнего за исходное значение $a_г$ принимается $a_{г\,min}$, а необходимый расход рабочего тела обеспечивается увеличением высоты лопаток.

Для полного описания геометрии корытца лопатки РК требуется знание величин R_K и α.

По условию выходная кромка строго определена углом Θ, а угол α задает положение входной кромки относительно выходной совместно с искомым радиусом корытца R_K.

В принятой системе координат XOY положение точки C_K определяется ординатой Y_{C_K} и абсциссой X_{C_K} (рис. 1). Последняя, представленная через параметры входной кромки, имеет вид

$$X_{C_K} = \left(R_1 - r_1\right)\cdot \sin\left(\alpha\right) + \left(R_K + r_1\right)\times \times \cos\left(\alpha + 90^\circ - \beta_{1л} - \gamma_{вх}/2\right), \quad (1)$$

или через параметры выходной кромки –

$$X_{C_K} = \left(R_2 + r_2\right)\cdot \sin\left(\Theta/2\right) + \left(R_K + r_2\right)\times \times \sin\left(\beta_{2л} + \gamma_{вых}/2 + \Theta/2\right). \quad (2)$$

Аналогично для координаты Y_{C_K} получаем:

$$Y_{C_K} = \left(R_1 - r_1\right)\cdot \cos\left(\alpha\right) - \left(R_K + r_1\right)\times \times \cos\left(\alpha + 90^\circ - \beta_{1л} - \gamma_{вх}/2\right), \quad (3)$$

или через параметры выходной кромки –

$$Y_{C_K} = \left(R_2 + r_2\right)\cdot \cos\left(\Theta/2\right) + \left(R_K + r_2\right)\times \times \sin\left(\beta_{2л} + \gamma_{вых}/2 + \Theta/2\right). \quad (4)$$

Приравнивая одноименные координаты, получим систему уравнений, решение которой относительно величины α имеет вид:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{-R \pm \sqrt{R^2 + S\cdot T}}{S}\right), \quad (5)$$

где $R = N \cdot Q$; $S = P^2 + Q^2$; $T = P^2 - N^2$;

$N = D\cos(\phi) + B\sin(\zeta) - A\cos(\zeta)$;

$Q = A\cos(\phi) - r_1\cdot\cos(\phi)\sin(\zeta) - B\sin(\phi) -$

$- D\cos(\zeta) + r_1\cdot\sin(\phi)\cos(\zeta)$;

$P = A\sin(\phi) - r_1\cdot\sin(\phi)\sin(\zeta) + B\cos(\phi) +$

$+ D\sin(\zeta) - r_1\cdot\cos(\phi)\cos(\zeta)$;

$D = R_1 - r_1$;

$A = \left(R_2 + r_2\right)\sin\left(\Theta/2\right) +$

$+ r_2 \sin\left(\beta_{2л} + \gamma_{вых}/2 + \Theta/2\right)$;

$B = \left(R_2 + r_2\right)\cos\left(\Theta/2\right) +$

$+ r_2 \cos\left(\beta_{2л} + \gamma_{вых}/2 + \Theta/2\right)$;

$\phi = 90^\circ - \beta_{1л} - \gamma_{вх}/2$;

$\zeta = \beta_{2л} + \gamma_{вых}/2 + \Theta/2$.

В общем случае решением уравнения (5) может быть множество сочетаний положительных, отрицательных и мнимых пар корней – значений α. Физический же смысл имеет лишь действительная величина угла α, которая в выражении (6) определяет положительное значение радиуса корытца.

$$R_K = \frac{D\sin\left(\alpha\right) + r_1\cos\left(\alpha + \phi\right) - A}{\sin\left(\varsigma\right) - \cos\left(\alpha + \phi\right)}. \quad (6)$$

Положение входной кромки при произвольном $\beta_{1л}$ и неизменных остальных исходных данных показаны пунктирной линией на рис. 1. В случае отрицательных углов α центр окружности, описывающей входную кромку, располагается под углом $|\alpha|$ к оси OY по левую сторону от нее.

Центральный угол, вырезающий дугу корытца профиля лопатки, равен

$$\psi = \pi - \Theta/2 + \alpha - (\beta_{1л} + \beta_{2л}) - (\gamma_{вх} + \gamma_{вых})/2.$$

2.2. Определение конструктивно-геометрических параметров спинки лопатки РК ЦСМТ

Для описания геометрии спинки лопатки РК требуется определить неизвестные величины угла χ, отрезка y, а также радиусов окружностей R_C и R'_C (рис. 2). На этом этапе расчета положение обеих кромок лопатки принимается фиксированным.

Соединение входной и выходной кромок в общем случае одной окружностью практически невозможно, так как радиусы касательных дуг окружностей к ним различны. Для плавного сопряжения контуров спинки и кромок профиля необходимо дополнительно задать отрезок y (см. пунктирную линию спинки на рис. 2). Обеспечение требуемой величины $a_г$ вызывает необходимость введения еще одной окружности. Таким образом, спинка профиля представляет собой сложную кривую, состоящую из двух окружностей радиусами R_C и R'_C, и отрезка *y*.

В системе координат XOY по аналогии с выражениями (1) – (4) для определения угла χ и радиуса окружности R_C выразим координаты точки C_C через параметры входной и выходной кромок, а для нахождения величины радиуса R'_C и отрезка y – координаты точки C'_C.

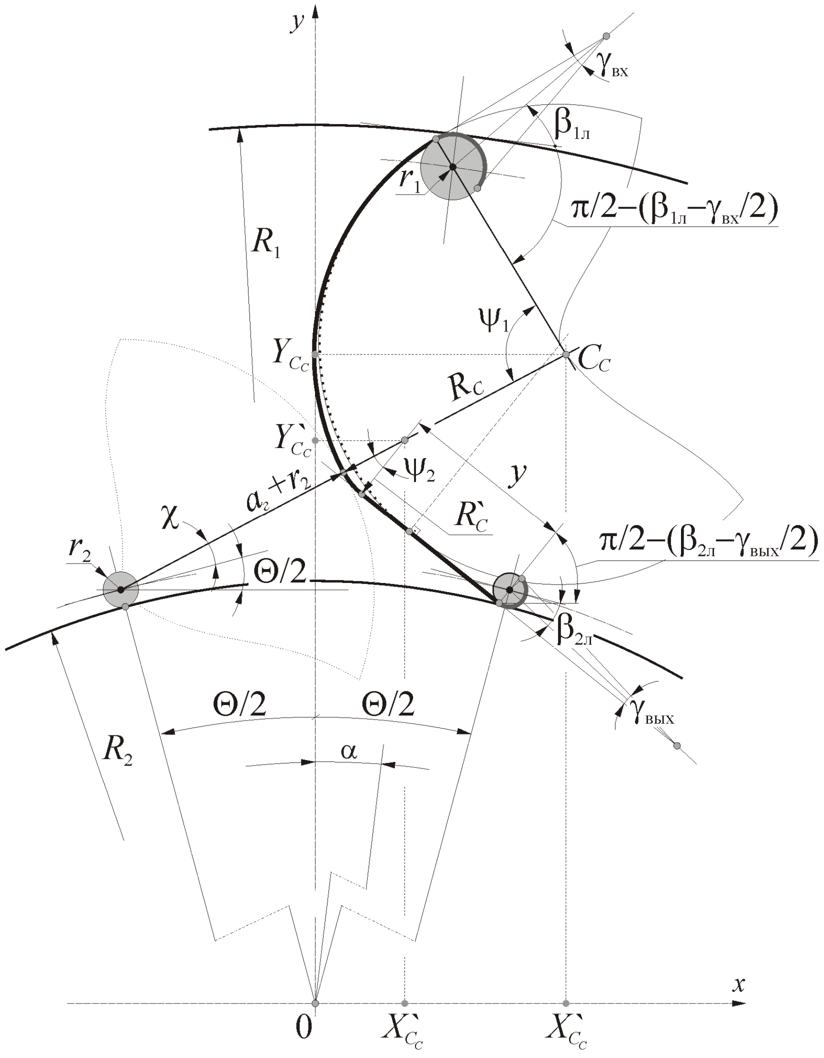

Рис. 2. Построение спинки лопатки РК ЦСМТ

Абсцисса точки C_C имеет вид:

$$X_{C_C}=\left(R_1-r_1\right)\cdot\sin(\alpha)+\left(R_c-r_1\right)\times\\ \times\cos\left(\alpha+90^\circ-\beta_{1л}+\gamma_{вх}/2\right); \tag{7}$$

$$X_{C_C}=\left(a_г+R_2+r_2\right)\cdot\cos(\chi+\Theta/2)-\\ -\left(R_2+r_2\right)\cdot\sin(\Theta/2); \tag{8}$$

Соответствующая ордината:

$$Y_{C_C}=\left(R_1-r_1\right)\cdot\cos(\alpha)-\left(R_c-r_1\right)\times\\ \times\sin\left(\alpha+90^\circ-\beta_{1л}+\gamma_{вх}/2\right); \tag{9}$$

$$Y_{C_C}=\left(a_г+R_c+r_2\right)\cdot\sin(\chi+\Theta/2)+\\ +\left(R_2+r_2\right)\cdot\cos(\Theta/2). \tag{10}$$

Приравнивая одноименные координаты, получим следующие уравнения:

$$G+R_c\sin(\kappa)=(J+R_c)\cos(\chi+\Theta/2)-E; \tag{11}$$

$$H-R_c\cos(\kappa)=(J+R_c)\sin(\chi+\Theta/2)+F, \tag{12}$$

где $G=\left(R_1-r_1\right)\sin(\alpha)-r_1\sin(\kappa)$;

$J=a_Г+r_2$;

$H=\left(R_1-r_1\right)\cos(\alpha)+r_1\cos(\kappa)$;

$E=\left(R_2+r_2\right)\sin(\Theta/2)$;

$F=\left(R_2+r_2\right)\cos(\Theta/2)$;

$\kappa=\beta_{1л}-\gamma_{вх}/2-\alpha$.

Решая систему уравнений (11) – (12), приходим к выражению

$$\chi=\arcsin\left(\frac{-U\pm\sqrt{U^2+V\cdot W}}{V}\right), \tag{13}$$

где

$U=M\cdot I$; $V=I^2+L^2$; $W=L^2-M^2$;

$$M = F\sin(\kappa) - H\sin(\kappa) - (G+E)\cos(\kappa);$$

$$I = H\sin(\Theta/2) + (G+E)\cos(\Theta/2) +$$
$$+ J\sin(\Theta/2)\cos(\kappa) - J\cos(\Theta/2)\sin(\kappa) -$$
$$- F\cdot\sin(\Theta/2);$$

$$L = F\cos(\Theta/2) + (G+E)\sin(\Theta/2) -$$
$$- J\cdot\cos(\Theta/2)\cos(\kappa) - J\sin(\Theta/2)\sin(\kappa) -$$
$$- H\cdot\cos(\Theta/2).$$

Положительное значение радиуса передней части спинки R_C определяет действительное значение угла χ.

$$R_C = \frac{J\cdot\cos(\chi+\Theta/2) - E - G}{\sin(\kappa) - \cos(\chi+\Theta/2)}. \qquad (14)$$

Положение точки C'_c определяется координатами:

$$X_{C'_c} = (R'_C + J)\cdot\cos(\chi+\Theta/2) - E, \qquad (15)$$

или

$$X_{C`_C} = E + (R'_C - r_2)\cdot\sin(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2) - y\cos(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2), \qquad (16)$$

а также

$$Y_{C'_c} = (R'_C + J)\cdot\sin(\chi+\Theta/2) + F, \qquad (17)$$

или

$$Y_{C`_C} = F + (R'_C - r_2)\cdot\cos(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2) + y\sin(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2). \qquad (18)$$

Решая совместно уравнения (15), (17) и (16), (18), получаем

$$R'_C = \frac{C\,\mathrm{tg}(\varpi) + Z}{\cos(\varpi) + \sin(\varpi)\,\mathrm{tg}(\varpi) - \sin(\xi) - \cos(\xi)\,\mathrm{tg}(\varpi)}, \qquad (19)$$

где $C = J\cdot\cos(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2) - 2E +$
$+ r_2\sin(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2);$

$Z = J\sin(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2) +$
$+ r_2\cos(\beta_{2л} - \gamma_{вых}/2);$

$\varpi = \beta_{2л} - \gamma_{вых}/2;$

$\xi = \chi + \Theta/2.$

Длина отрезка y определится по формуле:

$$y = \frac{R'_C[\sin(\varpi) - \cos(\xi)] - C}{\cos(\varpi)}.$$

Все величины радиусов и отрезка y по смыслу задачи должны иметь положительные значения.

Центральные углы, описывающие входную и промежуточную дуги спинки профиля лопатки, равны соответственно:

$$\psi_1 = \pi/2 + \Theta/2 + \alpha - \beta_{1л} + \chi + \gamma_{вх}/2;$$

$$\psi_2 = \pi/2 - \Theta - \beta_{2л} - \chi + \gamma_{вых}/2.$$

Заключение

Таким образом, определены конструктивно-геометрические параметры, необходимые для построения профилей лопаток РК ступени ЦСМТ.

Данная методика была апробирована при проектировании РК ЦСМТ в программном комплексе "MathCAD" в диапазонах чисел $M_{w_{2s}} = 0{,}8 \ldots 1{,}6$ и $Re = (2 \ldots 5)\cdot 10^5$. При этом в процессе автоматизированного проектирования сбоев в выполнении программы не наблюдалось.

Литература

1. Мусаткин Н.Ф., Радько В.М., Балахонов А.Д. Определение геометрических параметров соплового аппарата центростремительной микротурбины, состоящего из прямолинейных лопаток // Вестник СГАУ. – Самара: СГАУ. – 2003. – № 1. – С. 106 – 110.
2. Мамаев Б.И., Рябов Е.К. Построение решеток турбинных профилей методом доминирующей кривизны // Теплоэнергетика. – 1979. – № 2. – С. 52 – 55.
3. Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлёв В.А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.

Поступила в редакцию 28.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук Ю.И. Климнюк, ОКБ СНТК им. Н.Д. Кузнецова, Самара.