

УДК 629.735

М.Р. МУСТАФАЕВ^{1,2}, П.Ш. АБДУЛЛАЕВ², Ю.М. АШУРОВ²¹Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан²Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

ПРОФИЛИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КРИВИЗНЫ

Предлагается методика построения сечения профилей дозвуковых решеток на основе решения уравнения кривизны, т.е. создание профиля по заранее принятому характеру изменения скорости. При этом для описания кривизны применено уравнение $k(x) = a_2(x_0 + x)^m$, обеспечивающее плавность ее изменения, так как при значении $x_0, x > 0$ кривизна не меняет знак, т.е. исключается перегиб линий, очерчивающий профиль. Значения постоянных a_2, m , а также a_1 и a_0 , которые входят в зависимость $y' = f(x, a_2, m) + a_1$ и $y = f(x, a_2, a_1, m) + a_0$, определяются из граничных условий с обеспечением размера минимального проходного сечения межлопаточного канала и максимальной толщины профиля. Такой подход позволяет уверенно строить профиль лопаток с высокими гидродинамическими качествами.

Ключевые слова: профилирование, дозвуковые лопатки турбины, кривизна.

Введение

Рабочая лопатка – одна из наиболее ответственных деталей газовой турбины и должна удовлетворять ряду требований газовой динамики, прочности и технологии изготовления.

Одними из основных критериев, определяющих качество их работы, являются форма линии, очерчивающая профиль, форма межлопаточного канала, величина узкого сечения канала и т.д. При этом для плоских дозвуковых решеток удовлетворительный результат получается, если кривизна контура монотонно (без скачков) уменьшается от входной кромки к выходной и канал плавно сужается от входа в решетку к выходу из нее [1].

В настоящее время широкое распространение САД-систем создает благоприятные условия для применения аналитических методов и на их основе – разработке специализированных приложений для профилирования лопаток турбины, позволяющих найти оптимальный вариант по заданному критерию, а также изготовить чертеж, с применением компьютера.

При классической постановке построение сечения на заданном радиусе является одной из основных задач процесса профилирования. Применение аналитического метода позволяет варьировать контур профилей в широких пределах и в максимальной степени удовлетворять всем требованиям аэродинамики, конструкции, прочности и технологии. Известный аналитический метод построения сечения с помощью степенных многочленов [2] является при-

годным для описания профилей самых разнообразных форм. Однако подбор граничных условий при высоких степенях полиномов занимает значительное время. Так как кривая, описанная полиномом степени n , имеет $n-2$ потенциальных точки перегиба (изменение направления вогнутости кривых), то их при выборе параметров необходимо исключить.

Как известно, кривые, используемые для образования контуров корыта и спинки, должны отличаться, прежде всего, монотонным изменением кривизны. Скачок в кривизне или перегиб в профиле приводит к отрыву потока и по этой причине не допустим. Разумеется, что в этом случае кривизну можно определить после того, как профиль уже построен. В случае несоответствия отмеченных условий, процесс повторяется сначала.

Исходя из вышеизложенного, разработка метода профилирования сечения лопаток по заранее принятому характеру изменения скорости по его обводу, позволяющая уверенно строить профили с высокими гидродинамическими качествами, является **актуальной задачей**.

1. Метод построения сечения

Нами предлагается метод построения сечения профиля на основе решения уравнения кривизны вдоль контура, то есть создание профиля по заранее принятому характеру изменения скорости по его обводу.

Также предлагается методика определения параметров, обеспечивающих заданные характеристики профиля, основанная на CAD-технологии.

Далее рассмотрим основную суть предлагаемого метода.

Решив дифференциальное уравнение кривизны

$$k(x) = y'' / (1 + (y')^2)^{1,5}, \quad (1)$$

(где $k(x)$ – функция кривизны; y – функция уравнения кривой профиля), можно получить функциональную зависимость, описывающую кривую поверхности спинки корытца.

Заметим, что уравнение (1) не содержит явным образом искомой функции y .

Обозначив $\frac{dy}{dx} = p$, после соответствующих преобразований из (1) получим [3, 4]:

$$p = \frac{K(x)}{\sqrt{1 - K^2(x)}}, \text{ или } \frac{dy}{dx} = \frac{K(x)}{\sqrt{1 - K^2(x)}}, \quad (2)$$

и окончательно

$$y = a_0 + \int \frac{K(x)}{\sqrt{1 - K^2(x)}} dx, \quad (3)$$

где $K(x) = \int k(x) dx$.

Из (2) имеем

$$K(x) = \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}}. \quad (4)$$

Как отмечено, кривая, описывающая кривизну, должна быть плавной в заданном интервале. Принимаем кривую кривизны в виде

$$k(x) = a_2(x_0 + x)^m; \quad (5)$$

$$K(x) = a_1 + \frac{a_2}{m+1}(x_0 + x)^{m+1}. \quad (6)$$

Значение коэффициентов a_0, a_1, a_2 и значение m , входящее в уравнения (3), (5), (6), для спинки и корыта определяются из соответствующих граничных условий.

Анализ показывает, что кривизна, описанная в виде уравнения (5), при $x_0 \geq 0$ на всем диапазоне изменения x от 0 до b (где b – ширина лопаток) не меняет знак, т.е. исключает перегиб линии, очерчивающей профиль на участке $0 < x < b$, что является одним из основных требований, предъявляемых к линии профиля.

Профиль, являющийся конечным результатом, должен иметь определенные величины геометрических характеристик, в которые обычно входят следующие:

- ширина решетки b ,
- конструктивные углы β_1 и β_2 ,
- площадь сечения f (или максимальная толщина профиля),
- радиусы округления кромок r_1, r_2 ,
- размер минимального проходного сечения (горло) d_2 межлопаточного канала,
- угол δ отгиба выходной кромки.

Эти величины и являются исходными для построения профиля.

Однозначную связь исходных данных с граничными условиями для составления уравнений спинки и корыта установить невозможно, поэтому значения граничных условий сначала задают приблизительно, а затем уточняют до получения всех заданных геометрических характеристик.

Одним из эффективных способов создания единой среды для вычислительных работ и графических построений является создание пользовательского приложения AutoCAD.

AutoCAD широко распространен среди пользователей, открыт для дополнения, в нем встроены язык программирования высокого уровня AutoLISP и вычислительная система CAL [5]. При разработке алгоритма и метода определения параметров учитывались эти особенности.

Расположение проектируемого профиля в прямоугольной системе координат, характерные точки на профиле и геометрические углы приведены на рис. 1.

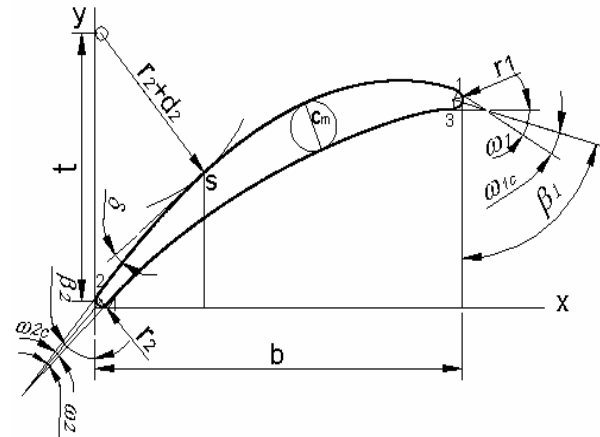


Рис. 1. Расположение проектируемого профиля в прямоугольной системе координат и характерные точки на профиле

- На рис. 1 приняты следующие обозначения:
- b – ширина решетки;
 - t – шаг решетки;
 - d_2 – размер минимального проходного сечения (горла) межлопаточного канала;
 - C_m – максимальная толщина профиля;
 - r_1 – радиус округления входной кромки;

- r_2 – радиус округления выходной кромки;
- ω_1 – угол заострения входной кромки;
- ω_2 – угол заострения выходной кромки;
- δ – угол отгиба выходной кромки;
- β_1 – конструктивный угол входной кромки;
- β_2 – конструктивный угол выходной кромки;
- 1,2 – точки сопряжения спинки с окружностью входной и выходной кромки;
- 3,4 – точки сопряжения корыта с окружностью входной и выходной кромки, S – точка касания линии спинки с окружностью, проведенной из центра окружности выходной кромки соседнего профиля.

Порядок расчета следующий:

Построение профиля начинается с построением спинки. Получив кривую для спинки, удовлетворяющую заданным величинам горла межлопаточного канала и угла отгиба задней кромки, можно переходить к построению корыта.

Геометрические углы профиля рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta_{1c} &= \beta_1 - \omega_{1c}, \\ \beta_{2c} &= \beta_2 + \omega_{2c}, \\ \beta_{1k} &= \beta_1 + \omega_{1k}, \\ \beta_{2k} &= \beta_2 - \omega_{2k}, \\ \omega_{1c} &= k_1 \omega_1, \\ \omega_{1k} &= (1 - k_1) \omega_1, \\ \omega_{2c} &= k_2 \omega_2, \\ \omega_{2k} &= (1 - k_2) \omega_2 \end{aligned}$$

(значения k_1 и k_2 могут изменяться в диапазоне от 0,4 до 0,6).

Для определения координаты центра окружности выходной кромки, точки касания спинки к ней, координаты точки S, также x координаты точки касания спинки к входной кромки имеем:

$$\begin{aligned} x_{c2} &= r_2, \quad y_{c2} = r_2 \\ x_2 &= r_2 (1 - \cos \beta_{2c}), \\ y_2 &= r_2 (1 + \sin \beta_{2c}); \\ x_S &= r_2 + (r_2 + b_2) \sin(90 - \beta_{2c} - \delta), \\ y_S &= t + 2r_2 - (r_2 + b_2) \cos(90 - \beta_{2c} - \delta); \\ x_1 &= b - r_1 [1 - \cos(\beta_1 - \omega_1 / 2)]. \end{aligned}$$

Теперь могут быть вычислены граничные условия и параметры уравнения (a_0, a_1, a_2, m), описывающие спинку.

В качестве граничных условий для вычисления значения a_1, a_2 и m используются величины:

$$\begin{aligned} x &= x_1, y' = y'_1 = \operatorname{tg}(90 + \beta_1); \\ x &= x_2, y' = y'_2 = \operatorname{tg}(90 - \beta_{2c}); \\ x &= x_s, y' = y'_s = \operatorname{tg}(90 - \beta_{2c} + \delta). \end{aligned} \quad (7)$$

Из уравнения (4) с учетом (6) и (7) имеем:

$$\begin{cases} a_1 + \frac{a_2}{m+1} (x_0 + x_1)^{m+1} = \frac{y'_1}{\sqrt{1 + (y'_1)^2}}, \\ a_1 + \frac{a_2}{m+1} (x_0 + x_2)^{m+1} = \frac{y'_2}{\sqrt{1 + (y'_2)^2}}, \\ a_1 + \frac{a_2}{m+1} (x_0 + x_s)^{m+1} = \frac{y'_s}{\sqrt{1 + (y'_s)^2}}. \end{cases} \quad (8)$$

Из первых двух уравнений системы (8) имеем:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{b_{11} a_{22} - b_{22} a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12}}, \\ a_2 &= \frac{a_{11} b_{22} - a_{21} b_{11}}{a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12}}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_{12} &= \frac{1}{m+1} (x_0 + x_1)^m, \\ a_{22} &= \frac{1}{m+1} (x_0 + x_2)^m, \\ a_{11} &= a_{21} = 1; \\ b_{11} &= \frac{y'_1}{\sqrt{1 + (y'_1)^2}}, \\ b_{22} &= \frac{y'_2}{\sqrt{1 + (y'_2)^2}}. \end{aligned}$$

Подставив полученные выражения для a_1 и a_2 (как функции от значений x_0 и m) в третье уравнение системы (8) и задав значение x_0 , вычислим значение m . Для этого удобно применить метод итераций.

Далее численным методом вычисляется значение y из (3), удовлетворяющее начальному условию $y(x_2) = y_2 = a_0$. Для этого удобно применить метод Рунге-Кутты, принимая значение $\Delta x < 0.05 \text{ mm}$. Результаты проведенных расчетов записываются в массив и используются в качестве исходных данных для построения профиля.

По вычисленному значению $y = f(x)$ и известному направлению касательных в точке сопряжения с окружностью входной и выходной кромки строится кривая для спинки (в виде кривых Безье) с помощью команды «spline».

Составленное таким образом уравнение спинки профиля может не обеспечить получение заданного размера минимального проходного сечения межлопаточного канала (горла) b_2 , следовательно, нужно проверить величину горла.

Для этого предлагаем, легко реализуемую в CAD-системах, (в частности AutoCAD-e) следующую методику. через две последовательные точки P_i и P_{i+1} спинки проводится «пользова-

тельская» система координат и на этой системе определяется x -координата точки $O(r_2, r_2 + t)$.

Этот процесс продолжается до тех пор пока $x'_p \leq 0$ (рис. 2). При этом вычисляется координаты точки P_C на отрезке (P_{i-1}, P_i) , расположенном от P_i на расстоянии x'_p .

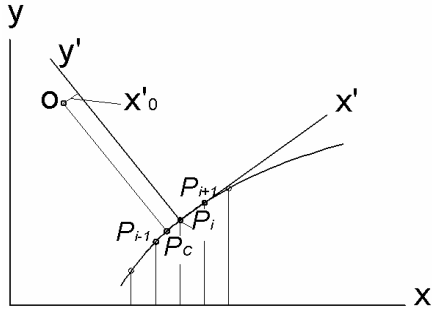


Рис. 2. К определению размера минимального проходного сечения межлопаточного канала

Размер горла межлопаточного канала определяется по формуле $d_2 = |P_C O| - r_2$.

Если полученное значения d_2 отклоняется от заданного, то варьируя δ ($\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$) и x_0 ($x_0 \geq 0$) добиваемся их соответствия. При этом из всех возможных решений необходимо выбирать решение, соответствующее условию [2]

$$\Omega = \int_0^s k^2 ds \rightarrow \min$$

где s -длина кривой.

Для этого можно применить следующую последовательность действий.

При значении $x_0 = x_{0j}$ и значениях δ_i и $\delta_{i+1} = \delta_i + \xi$ ($\xi \leq 0.1$) определяются значения $(d_2)_i$ и $(d_2)_{i+1}$, затем вычисляется приближенное значение

$$\partial d_2 / \partial \delta_i = [(d_2)_{i+1} - (d_2)_i] / \xi.$$

Далее вычисляется значение $\Delta \delta$ по формуле:

$$\Delta \delta = [d_{2\text{зад}} - (d_2)_i] / (\partial d_2 / \partial \delta_i).$$

Если значения δ выходят за пределы допустимого ($\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$), то варьируя x_0 надо вновь определить значение d_2 .

При этом надо иметь ввиду, что при постоянном значении x_0 с увеличением δ значение d_2 увеличивается, а Ω — уменьшается, а при постоянном значении δ с увеличением x_0 значения d_2 и Ω увеличиваются.

Отклонение полученной величины горла межлопаточного канала от заданной не должно превышать определенной, достаточно малой величины.

Получив кривую для спинки, удовлетворяющую заданным величинам горла межлопаточного канала и угла отгиба задней кромки, можно переходить к построению корыта.

Координаты точки касания корыта с выходной кромки определяется следующим образом:

$$x_4 = r_2 [1 + \cos(\beta_2 + \omega_{2k})],$$

$$y_4 = r_2 [1 - \sin(\beta_2 + \omega_{2k})].$$

Координаты центра окружности входной кромки определяются по формулам:

$$x_{c1} = x_1 - r_1 \sin(90 - \beta_{1c}),$$

$$y_{c1} = y_1 - r_1 \cos(90 - \beta_{1c}),$$

где y_1 — значение y в спинке, соответствующее значению $x = x_1$.

Координаты точки касания корыта с входной кромкой определяются по формулам:

$$x_3 = x_{c1} + r_1 \sin(\beta_{1k} - 90);$$

$$y_3 = y_{c1} - r_1 \cos(\beta_{1k} - 90).$$

В качестве граничных условий для вычисления параметров уравнения, описывающего корыто, используются величины:

$$x = x_3, y = y_3,$$

$$y'_3 = (dy/dx)_{x=x_3} = \text{tg}(90 + \beta_{1k});$$

$$x = x_4, y = y_4,$$

$$y'_4 = (dy/dx)_{x=x_4} = \text{tg}(90 - \beta_{2k}).$$

(9)

Из уравнения (4) с учетом (6) и (9) имеем:

$$\begin{cases} a_{1k} + \frac{a_{2k}}{mk+1} (x_{0k} + x_3)^{mk+1} = \frac{y'_3}{\sqrt{1+(y'_3)^2}}, \\ a_{1k} + \frac{a_{2k}}{mk+1} (x_{0k} + x_4)^{mk+1} = \frac{y'_4}{\sqrt{1+(y'_4)^2}}. \end{cases} \quad (10)$$

Зависимость $a_{1k}, a_{2k} = f(x_{0k}, mk)$, полученную из (7), подставим в (3), затем численным методом вычисляется значение y , удовлетворяющее начальному условию $y(x_4) = y_4$.

Полученное таким образом значение y может не обеспечивать условие $y(x_3) = y_3$, следовательно, задав значение x_{0k} , вычисляется значение mk .

Для этого можно применить методику, примененную при определении параметров уравнения, описывающего спинку.

По вычисленному значению $y = f(x)$ и известному направлению касательных в точке сопряжения с окружностью входной и выходной кромки, строится кривая для корыта (в виде кривых Безье) с помощью команды «spline».

Независимо от того, каким способом построен профиль, должны быть определены его характеристики, определяющие прочность (площадь, положение центра тяжести, моменты инерции и сопротивление). В настоящее время имеющиеся САД-системы, в частности AutoCAD, позволяют легко и точно определить геометрические характеристики плоского замкнутого контура. Для этого, соединив спинку и корыто с окружностью входной и выходной кромки, получаем замкнутый контур («region») и используя команду «massprop» точно определяем все геометрические характеристики, в том числе площадь, координаты центр тяжести и др.

Если в исходных данных было задано значение C_{max} , необходимо определить максимальную толщину профиля.

Максимальную толщину профиля C_{max} определяют как длину, лежащего внутри контура профиля отрезка общей нормали к линиям спинки и корыта (рис. 3).

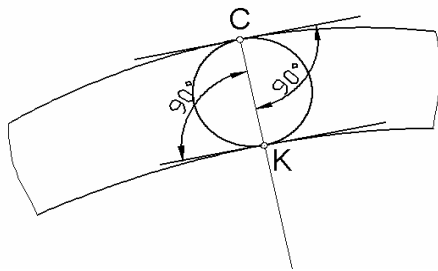


Рис. 3. К определению максимальной толщины профиля

Если обе линии, очерчивающие профиль, не имеют перегибов на участке $0 < x < b$ и на концах интервала, то очевидно, что в этом интервале существует только одна общая нормаль. Ее можно найти, восстанавливая нормали из точек на одной линии до пересечения с другой линией и сравнивая производные y'_k и y'_c в точках пересечения. Равенство производных – условие общности нормали.

Процесс нахождения точки К на линии корыта, через которую проходит общая нормаль, можно осуществить следующим образом.

На линии корыта берется точка соответствующая $x \approx 3\tau_2$, определяется центр кривизны:

$$M_k(x_M, y_M) \quad x_M = x_k + y'_k(1 + y_k'^2) / y_k'';$$

$$y_M = y_k + (1 + y_k'^2) / y_k''$$

и через точки К и M_k проводится нормаль для

корыта. Определяются координаты точки пересечения нормалью со спинкой x_c, y_c и вычисляется y'_c .

Если $y'_c > y'_k$, то увеличивается значение x ($x = x + \Delta x$) и процесс повторяется до получения $y'_c \leq y'_k$.

Если $y'_c < y'_k$ то значение x уменьшается на Δx и принимая значения $\Delta x = \Delta x / 10$ процесс повторяется.

Таким образом, по заданной точности определяется значение x_k и можно вычислить максимальную толщину профиля

$$C_{max} = \sqrt{(x_k - x_c)^2 + (y_k - y_c)^2}$$

и координаты центра вписанной в профиль окружности с диаметром, равным C_{max} :

$$x_{C_{max}} = (x_k + x_c) / 2;$$

$$y_{C_{max}} = (y_k + y_c) / 2.$$

Если полученная толщина или площадь профиля не равна заданной, то варьируя значениями x_{0k} и ω_1 , добиваемся их равенства.

При профилировании охлаждаемых лопаток, толщины задаются радиусами соответствующих окружностей, вписанных в профиль. Параметры окружностей, вписанных в профиль и касающихся спинки в заданной точке, можно определить так, как показано на рис. 4.

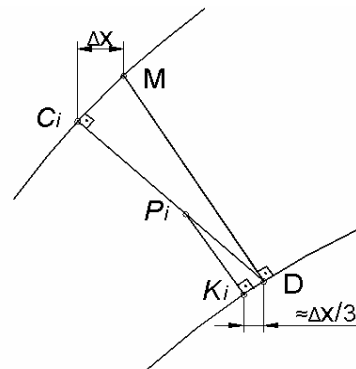


Рис. 4. К определению радиуса окружностей, вписанных в межлопаточный канал

От точки C_i проводим перпендикуляр к спинке и определяем точку D – пересечение перпендикуляра с корытом (рис. 4). Далее, через точку D проводим перпендикуляр к корыту и определяем точку пересечения его со спинкой (M), а также значение Δx ($\Delta x = x_M - \delta_{C_i}$). Из точки на корыте K_i , которая соответствует значению $x_{ki} = x_D - \xi$ ($\xi \approx \Delta x / 3$), проводим перпендикуляр к спинке, определяем точку пересечения P_i с

прямой, и варьируя положение K_i добиваемся выполнения условия $|P_i C_i| = |P_i K_i|$.

Точка P_i обеспечивающая это условие, является центром окружности, вписанной в межлопаточный канал и касающейся спинки в точке C_i .

После получения заданной площади f или максимальной толщины профиля C_{\max} уравнения спинки и корыта считают составленными и приступают к расчету остальных геометрических характеристик.

Кроме контроля геометрических характеристик профиля, необходимо проверить формы канала, образуемого двумя соседними профилями решетки. Канал считается удовлетворительным, если он плавно сужается от входа в решетку к выходу из нее.

На корыте соседнего профиля, отстоящего от рассчитываемого на расстоянии t по оси y , выбирается несколько точек K_i с координатами x_{ki}, y_{ki} , ($i=1, 2, \dots, n$) и определяются параметры окружностей, вписанных в образуемый канал и касающихся корыта в указанных точках. Параметры окружностей определяются также, как это делалось при определении параметров окружностей, вписанных в профиль, с учетом того что, точками K_i и C_i обозначены соответственно точки на спинке и корыте и $x_{K_i} < x_D$, т.е. нет необходимости для определения точки M .

2. Анализ полученных результатов

Для реализации вышеизложенного метода, используя язык AutoLISP, разработано пользовательское приложение к AutoCAD.

На рис. 5 показан профиль, построенный при помощи предложенной методики.

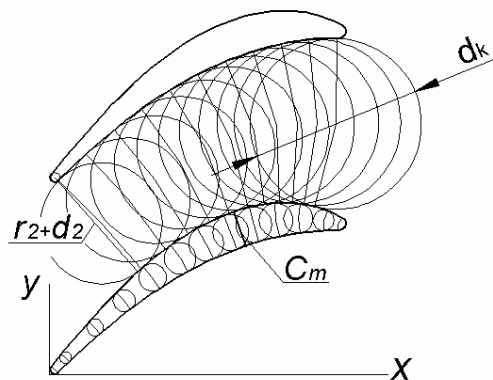


Рис. 5. Профиль сечения лопаток

Пример основан на предположительных исходных данных:

$$\beta_1 = 74^\circ, \beta_2 = 42^\circ,$$

$$t = 19,55 \text{ mm}, b = 30 \text{ mm},$$

$$r_1 = 0,7 \text{ mm}, r_2 = 0,5 \text{ mm},$$

$$\beta_{2\dot{\omega}} = 39^\circ, \omega_2 = 6^\circ,$$

$$C_m = 3,7 \text{ mm}, \delta = 9.5^\circ$$

и поэтому имеет чисто методическое значение.

На рис. 6 показаны изменения кривизны линий спинки (1) и корыта (2), а на рис. 7 приведено изменение ширины межлопаточного канала в зависимости от x -координаты точки касания вписанных окружностей корыта. Как видно они меняются достаточно плавно, и могли бы быть использованы для образования профилей.

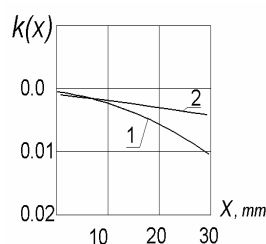


Рис. 6 Кривизна по обводу профиля лопатки: 1- спинка; 2- корыто

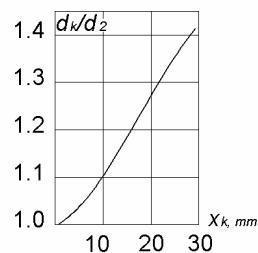


Рис. 7. Изменение размера межлопаточного канала

Заключение

Предложенный аналитический метод достаточно обоснован, позволяет построить профиль сечения с высокими гидродинамическими качествами с меньшими затратами машинного времени, по сравнению с аналитическим методом степенных многочленов, мог бы быть использован для профилирования дозвуковых решеток и оптимизации их параметров.

Литература

1. Копелев С.З. Расчет турбин авиационных двигателей (газодинамический расчет; профилирование лопаток) / С.З. Копелев, Н.Д. Тихонов. – М.: Машиностроение, 1974. – 268 с.
2. Журавлев В.А. Профилирование лопаток газовой турбины с применением цифровой электронной машины / В.А. Журавлев // Известия АН СССР, ОТН. Энергетика и транспорт. – 1963. – № 1. – С. 72-77.
3. Бронштейн И.Н. Справочник математика. Для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.Ф. Семендяев. – М., 1981. – 720 с.

4. Иманов А.С. Профилирование лопаток по геометрическому критерию качества на основе решения обратной задачи / А.С. Иманов // Изв. вузов. Авиаци-

онная техника. – 2003. – № 1. – С. 64-66.

5. Джеймс А. Лич Энциклопедия AutoCAD 2002 / А. Лич Джеймс. – СПб.: Питер, 2002. – 1072 с.

Поступила в редакцию 30.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Теории авиационных двигателей» В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

ПРОФІЛІЗАЦІЯ ПЕРЕТИНУ ЛОПАТОК ТУРБІНИ НА ОСНОВІ ВИРІШЕННЯ РІВНЯННЯ КРИВИЗНИ

М.Р. Мустафаєв, П.Ш. Абдуллаєв, Ю.М. Ашууров

Пропонується методика побудови перетину профілів дозвукових ґрат на основі вирішення рівняння кривизни, тобто створення профілю по заздалегідь прийнятому характеру зміни швидкості. При цьому для опису кривизни застосовано рівняння $k(x) = a_2(x_0 + x)^m$, що забезпечує плавність її зміни, оскільки при значенні $x_0, x > 0$ кривизна не міняє знак, тобто виключається перегин ліній, що обкреслюють профіль. Значення постійних a_2, m, a_1 і a_0 , що входять в залежності $y' = f(x, a_2, m) + a_1$ і $y = f(x, a_2, a_1, m) + a_0$, визначаються з граничних умов із забезпеченням розміру мінімального прохідного перетину міжлопаткового каналу і максимальної товщини профілю. Такий підхід дозволяє упевнено будувати профіль лопаток з високими гідродинамічними якостями.

Ключові слова: профілізація, дозвукові лопатки турбіни, кривизна.

PROFILING OF TURBINE BLADES SECTION BY CURVATURE EQUATION SOLVING

M.R. Mustafayev, P.Sh. Abdullayev, Y.M. Ashurov

The technique of construction of cut of profiles of subsonic lattices, on the basis of a solution of the equation of curvature, i.e. creation of a profile on in advance accepted character of a modification of a velocity is offered. Thus the equation $k(x) = a_2(x_0 + x)^m$ ensuring smoothness of its modification since at value $x_0, x > 0$ curvature does not change a sign is applied to exposition of curvature, i.e. the inflection of lines outlining a profile is excluded. Values of constants a_2, m as well a_1, a_0 entering into functions $y' = f(x, a_2, m) + a_1$ and $y = f(x, a_2, a_1, m) + a_0$, is defined from boundary conditions with providing of a size of minimum through passage cut among blades channel and maximum thickness of a profile. Such approach allows to build confidently a profile of blades with high hydrodynamic qualities.

Key words: profiling, subsonic blades of the turbine, curvature.

Мустафаєв Мустафа Рагим оглы - д-р техн. наук, профессор, проф. кафедры конструкции и эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей Национальной академии авиации, зав.каф. инженерной графики Азербайджанского технического университета, Баку, Азербайджан, e-mail: mustamro@rambler.ru.

Абдуллаєв Парвиз Шахмурад оглы - канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Конструкция и эксплуатация летательных аппаратов и авиационных двигателей» Национальной академии авиации, Баку, Азербайджан, e-mail: a_parviz@azeronline.com.

Ашууров Юсиф Монсум оглы - аспирант, преподаватель кафедры «Конструкция и эксплуатация летательных аппаратов и авиационных двигателей» Национальной академии авиации, Баку, Азербайджан, e-mail: yusifashurov@gmail.com.