

II. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН

А. П. Комаров, Е. Д. Стенькин

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЯХ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ РЕШЕТОК НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТОКА

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- b — аэродинамическая хорда профиля;
- $\bar{a} = \frac{a}{b}$ — относительная величина параметра, a , выраженная в долях хорды;
- C_m — максимальная толщина профиля;
- t — шаг решетки профилей;
- l — расстояние между сечениями, перпендикулярными оси компрессора, в которых заданы кинематические параметры потока;
- $R_{пл}$ — радиус цилиндрического сечения лопаточного венца, равный расстоянию плоского сечения от оси компрессора;
- $R_{вхj}, R_{выхj}$ — радиусы осесимметричной j -ой конической поверхности потока на входе в венец и на выходе из него;
- $\alpha_{1к}, \alpha_{2к}$ — конструктивные углы профиля на входе и выходе из решетки (углы между касательными в начальной и конечной точках к средней линии профиля и осью решетки);
- α_1, α_2 — углы между хордой и касательными к средней линии профиля в начальной и конечной ее точках;
- $\theta = \alpha_1 + \alpha_2$ — угол изгиба профиля;
- γ — угол установки профиля в решетке (угол между хордой и осью решетки);
- φ — угол между касательной к линии тока в данной точке и осью компрессора;
- $x, y; x', y'$ — собственная и единая системы координат профиля соответственно;
- γ_0 — угол между осью x' и осью решетки (осью вращения компрессора);
- $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_0$ — угол между хордой и осью x' единой системы координат;
- x_0, y_0 — координаты точки профиля в собственной системе координат, по которым осуществляется взаимное расположение профилей в лопатке;
- x_c, x_f — абсциссы расположения максимальной толщины профиля и максимальной стрелы прогиба средней линии;
- $x_{ц,т}, y_{ц,т}$ — координаты центра тяжести профиля;
- \bar{x}_i — абсциссы симметричного и изогнутого профиля с заданной величиной x_c ($i = 1 \div 17$);

- $\bar{x}_{oi}, \bar{y}_{oi}$ — относительные координаты исходного симметричного профиля с $\bar{\kappa}_c = 0,5$ и $\bar{C}_m = 0,1$;
 $\bar{y}_{симi}$ — относительные ординаты исходного симметричного профиля с заданными величинами \bar{C}_m и $\bar{\kappa}_c$ и нулевыми радиусами входной и выходной кромок;
 $\bar{y}_{\lambda i}$ — относительные ординаты дополненного профиля с заданными величинами \bar{C}_m и $\bar{\kappa}_c$, обеспечивающие получение необходимых радиусов кромок изогнутого профиля;
 \bar{r} — относительный радиус дуги окружности, образующей входную кромку профиля;
 Δ_a, Δ_u — смещение центра тяжести профиля рабочего колеса соответственно по оси вращения и фронту решетки относительно радиальной оси взаимного расположения профилей лопатки;
 z — число лопаток венца.

ИНДЕКСЫ

вх — вход;	сим — симметричный;
вых — выход;	с — сопряжение;
к — корытце профиля;	сп — спинка профиля;
кон — коническое сечение;	ср — средняя линия;
н — носик;	ц — цилиндрическое сечение;
пл — плоское сечение;	хв — хвостик.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Профилирование лопаток является частью процесса проектирования лопаточных венцов осевого компрессора, при выполнении которого решаются аэродинамические, прочностные и конструктивные задачи.

Определяется контур пера лопатки, обладающей заданными аэродинамическими свойствами. Вычисляются интегральные характеристики профилей лопатки (площади, моменты инерции и т. п.), необходимые для определения статических и вибрационных характеристик пера лопатки. По газовым и центробежным силам, из условия их равенства, определяется взаимное расположение профилей по высоте лопатки рабочего колеса. В процессе профилирования определяются линейные и угловые параметры профиля, необходимые для выпуска рабочего чертежа и контроля при изготовлении лопатки.

Профилирование представляет собой трудоемкий процесс и требует применения быстродействующих электронно-вычислительных цифровых машин (ЭВЦМ). Однако в настоящее время большинство из упомянутых задач решается на ЭВЦМ последовательно по независимым друг от друга программам. Это заметно удлиняет цикл профилирования лопатки.

Технические возможности современных ЭВЦМ типа М-220 позволяют выполнять профилирование с помощью одной

комплексной программы. Такая программа должна обладать значительной степенью универсальности. В частности, позволять рассчитывать как дозвуковые, так и сверхзвуковые лопаточные венцы. Это обеспечивается использованием в программе обобщенных форм симметричных профилей и средних линий.

Эффективность комплексной программы при профилировании ступеней различного типа зависит и от метода профилирования, заложенного в основу программы. В этой связи в настоящей статье рассматриваются существующие методы профилирования и обосновывается выбор метода, принятого в комплексной программе. Рассматриваются соотношения для приведения геометрических параметров решеток на поверхностях тока к соответствующим параметрам в плоских сечениях лопатки и соотношения для определения координат профилей в плоских сечениях. Изложен также единый метод определения интегральных характеристик профиля и пера лопаток.

МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК

Исходными величинами для профилирования являются геометрические параметры профилей и решеток элементарных венцов на поверхностях тока, которые определяются по кинематическим параметрам потока с учетом требований прочности. Однако существующие методы прочностных расчетов и способы изготовления лопаток основаны на определении координат профилей в плоских сечениях, перпендикулярных радиальной оси лопатки.

Поэтому при профилировании необходим переход от геометрических параметров профилей решеток, включающих в себя величины α_{1k} , α_{2k} , β , C_{Lk} , x_f на осесимметричных поверхностях тока, к координатам профиля в плоских сечениях.

В зависимости от принятой последовательности перехода методы профилирования могут быть разделены на три группы.

Первая группа характеризуется тем, что координаты профилей лопатки определяются по геометрическим параметрам решеток непосредственно на поверхностях тока. Переход же к координатам контура лопатки в плоских сечениях производится interpolацией координат на поверхности тока. Такие методы называются методами профилирования лопаток по поверхностям тока.

Вторая группа характеризуется тем, что по геометрическим параметрам решеток на поверхностях тока в результате соответствующих преобразований определяются геометрические параметры профилей лопатки в плоских сечениях. Это позволяет определить координаты профилей сразу в плоских сечениях, исключая трудоемкий процесс пересчета координат профилей с поверхностей тока на плоские сечения. Подобные методы назовем методами профилирования лопаток компрессора в плоских сечениях по геометрическим параметрам профилей на поверхностях тока.

К третьей группе относятся методы профилирования в плоских сечениях непосредственно по геометрическим параметрам на поверхностях тока, т. е. не учитывается различие между соответствующими геометрическими параметрами на поверхностях тока и в плоских сечениях. При этом геометрические параметры профилей в плоском сечении определяются по геометрическим параметрам решеток на поверхностях тока на радиусе $R_{пл}$ расположения плоского сечения. Затем рассчитываются координаты профилей непосредственно в плоских сечениях. Подобные методы называются методами профилирования лопаток в плоских сечениях.

Применение того или иного метода определяется формой тракта лопаточного венца.

Если меридиональный профиль тракта лопаточного венца, а следовательно, и линии тока (линии пересечения поверхности тока меридиональной плоскостью) имеют значительный наклон к оси компрессора, то формы контура профиля и средней линии в плоском сечении могут значительно отличаться от соответствующих форм на поверхностях тока. В таких случаях координаты изогнутого профиля (по заданной форме симметричного профиля и форме средней линии) следует определять непосредственно на поверхностях тока [1].

При профилировании лопаток ступеней с проточной частью, близкой к цилиндрической, обычно можно пренебречь различием между геометрическими параметрами на поверхностях тока и в плоских сечениях. Для таких случаев используются методы профилирования лопатки в плоских сечениях.

Наиболее часто используются формы проточной части, в которых различия в профилировании по поверхностям тока и в плоских сечениях определяются главным образом различием между геометрическими параметрами профилей на поверхностях тока и в плоских сечениях, а изменением форм средней линии и исходного симметричного профиля можно пренебречь. В этих случаях достаточно учесть изменение геометрических параметров профилей при переходе от поверхностей тока к плоским сечениям и профилирование выполнять в плоских сечениях.

Таким образом, метод профилирования лопатки по геометрическим параметрам профилей на поверхностях тока состоит из двух самостоятельных частей: преобразования геометрических параметров лопатки на поверхностях тока в параметры в плоских сечениях и расчета координат профилей в плоских сечениях. Такое положение существенно облегчает составление комплексной программы профилирования.

Из сравнения перечисленных методов следует, что метод профилирования на поверхностях тока является более громоздким, чем другие два метода при сравнительно узкой области его применения.

Метод профилирования в плоских сечениях приводит к заметным погрешностям при профилировании ступеней с коническим

контура тракта, обычно используемых в многоступенчатых осевых компрессорах [1].

Исходя из вышеизложенного, в основу комплексной программы профилирования положен метод профилирования лопаток по геометрическим параметрам решеток на поверхностях тока. Программа состоит из двух самостоятельных частей: из подпрограммы пересчета геометрических параметров с поверхностями тока на параметры в плоских сечениях и из подпрограммы профилирования лопатки в плоских сечениях. Обе подпрограммы полностью автономны, что существенно расширяет возможности их дальнейшего применения и, в частности, автономного применения подпрограммы профилирования в плоских сечениях.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЕЙ В ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЯХ

В рассматриваемом методе геометрические параметры профилей определяются по соответствующим параметрам, заданным на поверхностях тока. Преобразование параметров на поверхностях тока в параметры в плоских сечениях целесообразно выполнять в два перехода.

Вначале преобразовываются параметры на поверхностях тока в параметры в цилиндрических сечениях по следующим геометрическим соотношениям (рис. 1):

$$\operatorname{tg} \alpha_{1к.ц} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{1к.кон}}{\cos \psi} = f(R_{вх});$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{2к.ц} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{2к.кон}}{\cos \psi} = f(R_{вых});$$

$$b_{ц} = b_{кон} \cdot \cos \psi';$$

$$\bar{t}_{ц} = \frac{2\pi R_{ср}}{Z b_{ср}} = f(R_{ср});$$

$$\bar{C}_{mц} = \frac{\bar{C}_{mкон}}{b_{ц}} = f(R_{ср}),$$

причем

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{R_{вых} - R_{вх}}{l};$$

$$\psi' = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \psi \cdot \cos \gamma);$$

$$\gamma = \frac{\alpha_{1к} + \alpha_{2к}}{2}.$$

Затем по геометрическим параметрам в цилиндрических сечениях определяются соответствующие параметры профилей в плоских сечениях.

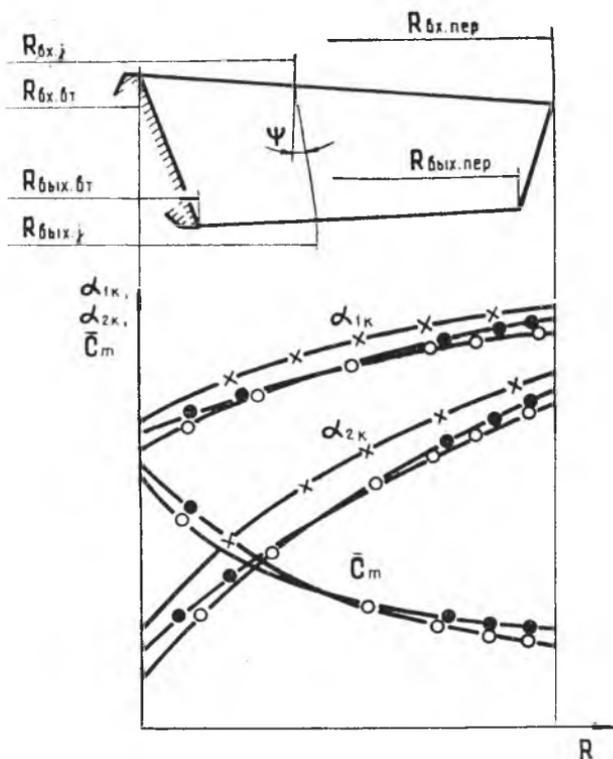


Рис. 1. Геометрические параметры решеток:
 ○ — в конических сечениях венца; ● — пересчитанные на цилиндрические сечения; × — пересчитанные на плоские сечения

ких сечениях. Необходимость в этом пересчете [2] возникает в случае, если

$$\frac{b_{\text{ц}}}{R_{\text{пл}}} \geq 0,3.$$

Приблизненно пересчет параметров в цилиндрических сечениях на параметры в плоских, касательных к цилиндрическим сечениям и перпендикулярных к радиальной оси лопатки, представляет собой преобразование длинных размеров профиля по дугке круга в размеры по хорде круга. При этом плоское сечение касается средней точки дуги с углом φ радиан (рис. 2).

Углы $\alpha_{1\text{к}}$ и $\alpha_{2\text{к}}$ в плоском сечении, расположенном на радиусе $R_{\text{пл}}$, равны соответствующим углам в цилиндрическом сечении, но с радиусом

$$R_{\text{ц}} = R_{\text{пл}} + \Delta R,$$

где ΔR определяется из соотношения

$$\frac{\Delta R}{R_{пл}} \approx \frac{b \sin \gamma}{2R_{пл}} \cdot \sin \frac{\varphi}{4} = \frac{1}{8} \left(\frac{b \sin \gamma}{R_{пл}} \right)^2$$

как высота сегмента круга радиуса $R_{пл}$ с центральным углом

$$\varphi = \frac{b \sin \gamma}{R_{пл}}$$

При значениях $\varphi \leq 0,5$ радиан можно пренебречь отличием между длинными размерами профиля в плоских и цилиндрических сечениях, т. е. принять

$$b_{пл} = b_{ц}; \quad \bar{C}_{m\text{пл}} = \bar{C}_{mц}$$

В других случаях пересчет с цилиндрического сечения на плоское выполняется по соответствующим точным соотношениям для сектора круга.

При необходимости значения ΔR определяются отдельно для входа в венец и для выхода из него. По полученным зависимостям на заданных радиусах $R_{пл}$ в плоских сечениях определяются параметры b , \bar{C}_m , $\alpha_{1к}$, $\alpha_{2к}$, \bar{x}_f , \bar{x}_c , которые являются исходными величинами для профилирования лопатки. Профилирование начинается с выбора исходного симметричного профиля и формы средней линии.

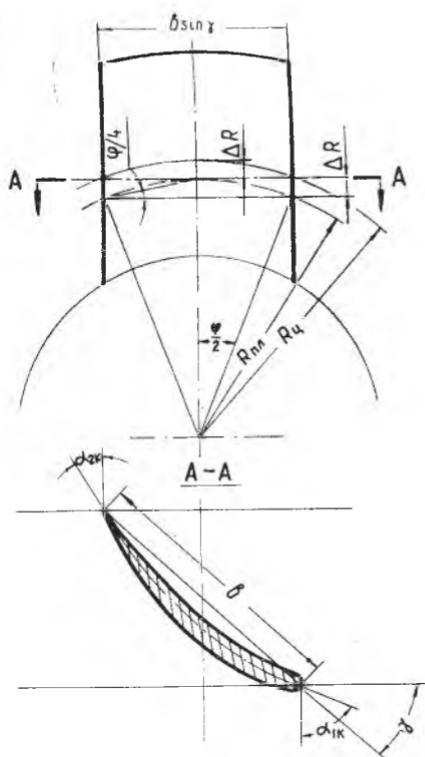


Рис. 2. Расположение цилиндрического и плоского сечений лопатки

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ПРОФИЛЯ И ФОРМЫ СРЕДНЕЙ ЛИНИИ

В большинстве случаев профилирования используются стандартные исходные симметричные профили с величинами $\bar{C}_m = 0,1$ и $\bar{x}_c = 0,3 \div 0,6$. Для дозвуковых лопаток обычно используются крыловые профили *NACA* с величинами $\bar{x}_c = 0,3 \div 0,5$ [3], профиль А—40 с $\bar{x}_c = 0,4$ [4], профиль С—4 с $\bar{x}_c = 0,3$ [5] и другие аналогичные профили.

Таким образом, в общем случае применение профилей с величинами \bar{x}_c , меняющимися в пределах 0,3—0,6, трудно свести к ограниченному числу стандартных симметричных профилей, записываемых в запоминающее устройство ЭВЦМ.

В данном методе применены соотношения, которые позволяют определять координаты симметричного профиля с произвольны-

ми величинами \bar{x}_c и \bar{C}_m по координатам исходного стандартного симметричного профиля с величинами $\bar{x}_c=0,5$ и $\bar{C}_m=0,1$.

Для абсцисс установлены соотношения, близкие к соотношениям, приведенным в работе [3]:

при $\bar{x}_{0i} \leq 0,5$ из пропорциональной зависимости

$$\frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_c} = \frac{\bar{x}_{0i}}{0,5}$$

получаем

$$\bar{x}_i = 2\bar{x}_c \bar{x}_{0i},$$

а при $\bar{x}_{0i} > 0,5$ из пропорциональной зависимости

$$\frac{1 - \bar{x}_i}{1 - \bar{x}_c} = \frac{1 - \bar{x}_{0i}}{0,5}$$

получаем

$$\bar{x}_i = 1 - 2(1 - \bar{x}_c)(1 - \bar{x}_{0i}). \quad (2)$$

Для расчета ординат, соответствующих заданной величине \bar{C}_m , из условия пропорциональности получаем соотношение:

$$\bar{y}_{\text{сим},i} = \bar{y}_{0i} \frac{\bar{C}_m}{0,1}. \quad (3)$$

В качестве стандартного крылового симметричного профиля для дозвуковых лопаток был принят профиль *NACA* с величинами $\bar{x}_c=0,5$ и $\bar{C}_m=0,1$. Сравнение профилей семейства *NACA* с величинами $\bar{x}_c=0,3 \div 0,5$ и $\bar{C}_m=0,1$, а также профилей А-40 и С-4 с профилями, рассчитанными по соотношению (1), (2) на основе принятого стандартного профиля, не показало существенных различий. Таким образом, было установлено, что применение соотношений (1), (2) позволяет свести используемые крыловые профили к одному стандартному профилю.

Контур носика (передней части профиля) крыловых профилей имеет сложную форму, трудную для контроля при изготовлении лопатки, поэтому обычно этот контур заменяют эквивалентной дугой окружности. Дуга сопрягается с основным контуром профиля при помощи прямолинейного отрезка, касательного к дуге и контуру. Такой профиль называется скорректированным крыловым профилем. Если величина радиуса кромки скорректированного профиля меньше допустимой из условий прочности, то радиус увеличивается до необходимого размера.

Из условия сопряжения контура профиля с кромкой увеличенного радиуса профиль утолщается (дополняется). Величина дополнения определяется коэффициентом дополнения

$$k_c = \frac{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{доп.с}}}{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{сим.с}}}$$

где $\bar{y}_{\text{сим.с}}$ и $\bar{y}_{\text{доп.с}}$ — ординаты исходного и дополненного симметричного профиля в точке сопряжения.

Дополнение к толщине при удалении от кромки уменьшается и становится равным нулю при $x = x_c$. Плавное сопряжение можно осуществить, приняв для каждого участка контура профиля (от точки сопряжения до точки с абсциссой x_c) величину коэффициента дополнения постоянной и равной величине k_c , т. е.

$$k_i = \frac{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{доп.}i}}{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{сим.}i}} = k_c. \quad (4)$$

Величины исходных радиусов кромок корректированных дозвуковых профилей в значительной мере произвольны и при профилировании, как правило, их требуется увеличивать. Для упрощения пересчета целесообразно по соотношению (4) преобразовать корректированный стандартный крыловой профиль НАСА с величинами $x_c = 0,5$ и $\bar{C}_m = 0,1$ в профиль с нулевыми радиусами кривизны носика и хвостика профиля. Преобразованный крыловой профиль (далее профиль А), а также чечевичеобразные профили, выполненные по синусоиде и по параболе и используемые при околозвуковых скоростях потока, включены в набор стандартных симметричных профилей программы. В этот набор включен и профиль Б, предназначенный для использования при значительных дозвуковых скоростях потока. На рис. 3 приведены контуры передней части перечисленных профилей.

Каждый стандартный профиль в комплексной программе профилирования записывается в виде констант (семнадцать пар координат x_{0i}, y_{0i}). В программе предусмотрено также введение, в случае необходимости, в память

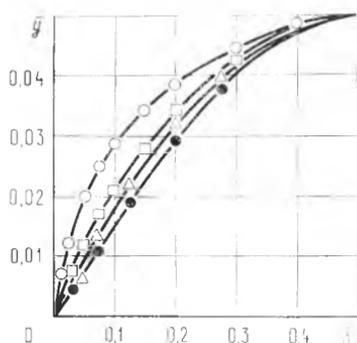


Рис. 3. Координаты стандартных симметричных профилей с величиной $x_c = 0,5$:

□ — крыловой «А»; □ — крыловой «Б»; Δ — параболический; ● — синусоидальный

ЭВЦМ 17 пар координат произвольного исходного симметричного профиля.

Искомый изогнутый профиль получается из симметричного профиля. Для этого необходимо на среднюю линию требуемого изгиба нарастить симметричный профиль.

Форма средней линии характеризуется соотношением между параметрами Θ , χ_1 , χ_2 и x_f . Обозначив

$$m = \frac{\text{tg } \chi_2}{\text{tg } \chi_1} = f(x_f)$$

и используя выражение для тангенса суммы углов, получим после преобразования квадратное уравнение с неизвестной величиной χ_1 . Решив уравнение и приведя полученное соотношение к виду, исключающему неопределенность решения в частном случае при $\Theta=0$, получим необходимое выражение

$$\text{tg } \chi_1 = \frac{2 \text{tg } \Theta}{\sqrt{(1+m)^2 + 4m \text{tg}^2 \Theta} + (1+m)} \quad (5)$$

Уравнение любой средней линии должно удовлетворять условиям

$$\bar{y}(0) = 0; \quad \bar{y}(1) = 0. \quad (6)$$

Для дозвуковых профилей широкое применение получило параболическое уравнение средней линии, приведенное, например, в работе [6]

$$\bar{y} = \frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{1+\bar{x}\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot \text{tg } \chi_1,$$

где

$$m = \left(\frac{x_f}{1-x_f} \right)^2,$$

а также уравнение средней линии, выполненной по дужке круга. Оба эти уравнения удовлетворяют условиям (6).

При околозвуковых скоростях потока на входе применяются такие профили, у которых средние линии имеют прямолинейный участок (нулевую кривизну) в начале передней кромки. Такому условию и условиям (6) удовлетворяет уравнение синусоиды с величиной $\bar{x}_i = 0,5$. При синусоидальной форме средней линии переход от величины $\bar{x}_i = 0,5$ к произвольным величинам $\bar{x}_i \neq 0,5$ выполняется по соотношениям, аналогичным соотношениям (1) — (3). Средние линии, описываемые уравнениями параболы, дужки круга и синусоиды в качестве стандартных линий используются в комплексной программе профилирования.

ПРОФИЛЬ ПЛОСКОГО СЕЧЕНИЯ ЛОПАТКИ

Контур искомого изогнутого профиля получается наращиванием на среднюю линию принятой формы с заданными значениями

углов Θ и χ_1 , исходного симметричного или дополненного профиля с заданными величинами \bar{x}_c и \bar{C}_m .

Обычно ординаты $\bar{y}_{\text{сим}i}$ отсчитываются от средней линии по нормали к ней, что неоправданно сложно. Проще ординаты $\bar{y}_{\text{сим}i}$ отсчитывать от средней линии по перпендикулярам к хорде [2]. В этом случае расчетные соотношения принимают вид:

$$\begin{aligned}\bar{y}_{\text{сп}i} &= \bar{y}_{\text{ср}i} + \bar{y}_{\text{сим}i}; \\ \bar{y}_{\text{к}i} &= \bar{y}_{\text{ср}i} - \bar{y}_{\text{сим}i}; \\ \bar{x}_{\text{сп}i} &= \bar{x}_{\text{к}i} = \bar{x}_i.\end{aligned}\tag{7}$$

Соотношения (7) позволяют также значительно упростить вычисление интегральных характеристик профиля, что облегчает разработку единой комплексной программы.

Стандартные симметричные профили имеют величины $\bar{x}_c = 0,5$ и $\bar{C}_m = 0,1$ (рис. 4а), поэтому ординаты такого профиля необходимо пересчитать на заданные величины \bar{x}_c и \bar{C}_m по соотношениям (1)—(3). Полученный симметричный профиль с нулевыми радиусами кромок (см. рис. 4б) необходимо дополнить таким образом, чтобы при последующем наращивании дополненного профиля на среднюю линию получить изогнутый профиль с требуемыми величинами радиусов дуг окружностей, образующих входную (носик) и выходную (хвостик) кромки. Для носика координаты центра, располагаемого на заданной средней линии (см. рис. 4в), определяются по соотношениям:

$$\bar{x}_r = \bar{r} \cos \gamma_1; \quad \bar{y}_r = \bar{r} \sin \gamma_1.$$

Коэффициенты дополнения k для спинки и корытца определяются по координатам точек сопряжения контура кромки с контуром изогнутого профиля. Эти координаты вычисляются по следующим соотношениям для точки P (рис. 5) сопряжения носика со спинкой профиля:

$$\begin{aligned}\bar{x}_P &= \bar{r} (\cos \gamma_1 - \sin \gamma_{1\text{сп}}) \\ \bar{y}_P &= \bar{r} (\sin \gamma_1 + \cos \gamma_{1\text{сп}}).\end{aligned}\tag{8}$$

Угол $\gamma_{1\text{сп}}$ может быть определен из следующих выражений: при $r = 0$

$$\text{tg } \gamma_{1\text{сп}} = \text{tg } \gamma_1 + \frac{\bar{y}_{\text{сим}2}}{\bar{x}_2};$$

при $\bar{r} = \frac{\bar{C}_m}{2}$

$$\text{tg } \gamma_{1\text{сп}} = \text{tg } \gamma_1.$$

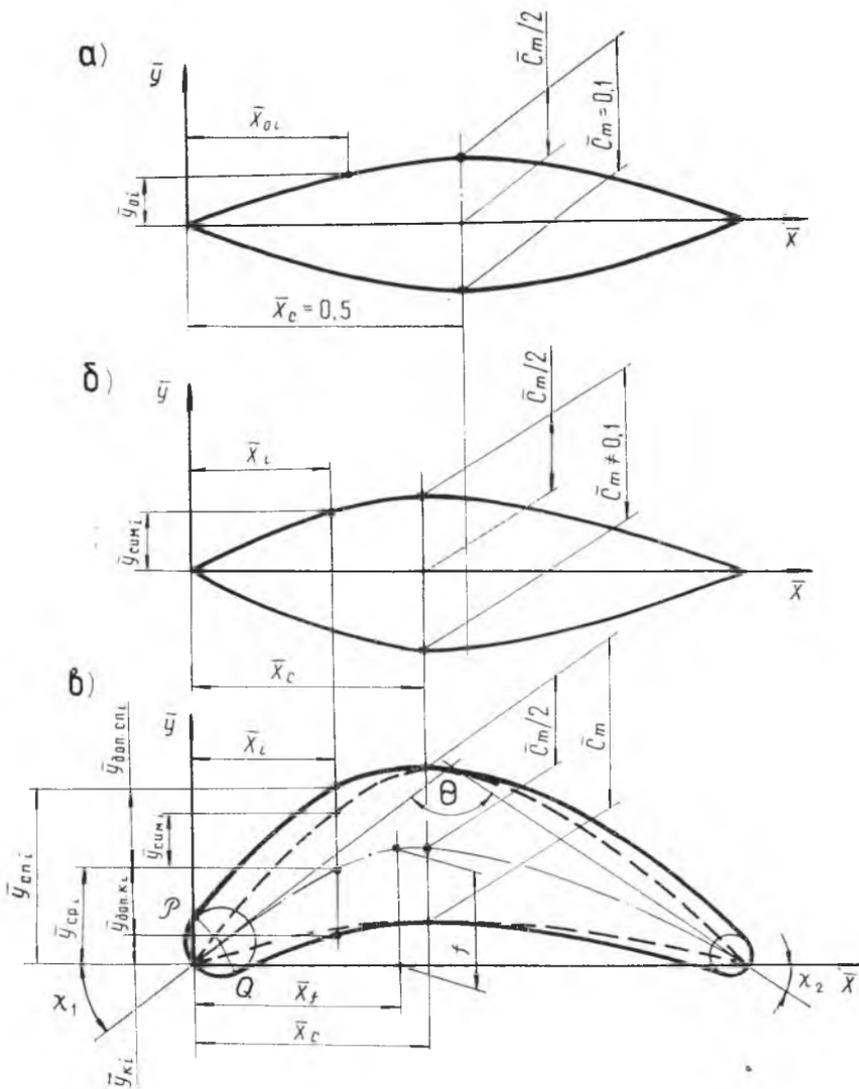


Рис. 4. Последовательность перехода от стандартного профиля к изогнутому:

а — стандартный симметричный с величинами $\bar{x}_c = 0,5$ и $\bar{C}_m = 0,1$; б — симметричный с заданными величинами \bar{x}_c и \bar{C}_m ; в — искомый изогнутый

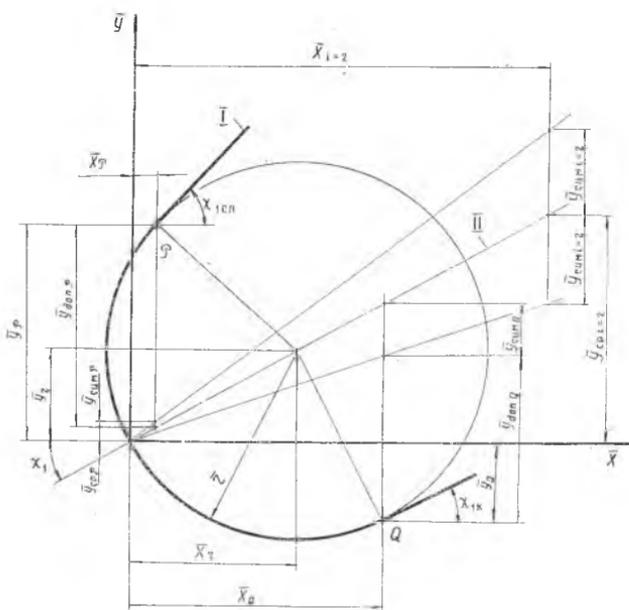


Рис. 5. Построение кромки профиля лопатки:
I — контур профиля; II — средняя линия профиля

Тогда для значений $0 \leq \bar{r} \leq \frac{\bar{C}_m}{2}$, предполагая линейную зависимость $\text{tg } \gamma_{1\text{сп}}$ от \bar{r} , можно записать

$$\text{tg } \gamma_{1\text{сп}} = \text{tg } \gamma_2 + \frac{\bar{y}_{\text{сим}2}}{\bar{x}_2} \left(1 - \frac{2\bar{r}}{\bar{C}_m} \right). \quad (9)$$

Коэффициент дополнения $k_{\text{сп},н}$ для участка спинки при $\bar{x} \leq \bar{x}_c$ вычисляется по соотношению:

$$k_{\text{сп},н} = \frac{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{доп}P}}{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{сим}P}} = k_P. \quad (10)$$

Для вычисления коэффициента k_P ордината дополненного профиля $\bar{y}_{\text{доп}P}$ определяется по соотношению

$$\bar{y}_{\text{доп}P} = \bar{y}_P - \bar{y}_{\text{ср}P} = \bar{y}_P - \bar{x}_P \text{tg } \gamma_1. \quad (11)$$

Ординаты дополненного профиля при $\bar{x}_i \leq \bar{x}_c$ вычисляются по соотношению

$$\bar{y}_{\text{доп}i} = \frac{\bar{C}_m}{2} - k_P \left(\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{\text{сим}i} \right), \quad (12)$$

и тогда ординаты спинки искомого изогнутого профиля при $\bar{x}_i \leq \bar{x}_c$ будут определяться выражением

$$\bar{y}_{сп i} = \bar{y}_{ср i} + \bar{y}_{доп i}. \quad (13)$$

Аналогичные соотношения для корытца профиля при $\bar{x}_i \leq \bar{x}_c$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{x}_Q &= \bar{r} (\cos \gamma_1 + \sin \gamma_{1к}); \\ \bar{y}_Q &= \bar{r} (\sin \gamma_1 - \cos \gamma_{1к}); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_{1к} = \operatorname{tg} \gamma_1 - \frac{\bar{y}_{сим 2}}{\bar{x}_2} \left(1 - \frac{2\bar{r}}{\bar{C}_m} \right); \quad (15)$$

$$k_{к.н} = \frac{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{доп Q}}{\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{сим Q}}; \quad (16)$$

$$\bar{y}_{доп Q} = \bar{y}_Q + \bar{x}_Q \operatorname{tg} \gamma_1; \quad (17)$$

$$\bar{y}_{доп i} = \frac{\bar{C}_m}{2} - k_{к.н} \left(\frac{\bar{C}_m}{2} - \bar{y}_{сим i} \right); \quad (18)$$

$$\bar{y}_{к i} = \bar{y}_{ср i} - \bar{y}_{доп i}. \quad (19)$$

Формулы (12) — (19) можно использовать и для части профиля при $\bar{x}_i > \bar{x}_c$, если углы γ_1 , $\gamma_{1сп}$, $\gamma_{1к}$ заменить соответственно на γ_2 , $\gamma_{2сп}$, $\gamma_{2к}$, величины \bar{x}_1 заменить на $1 - \bar{x}_1$ и соответственно заменить \bar{x}_2 на $1 - \bar{x}_{16}$, а $\bar{y}_{сим 2}$ на $\bar{y}_{сим 16}$.

Расчеты профилей с изгибом $\Theta \leq 60^\circ$ и величиной $\bar{r}_н \leq 4\%$ по разработанной методике показали, что сопряжение рассчитывается достаточно точно и не требуется графический контроль профиля.

Для решетки профилей обычно определяется величина A_r/t . В комплексной программе величина A_r/t определяется простым перебором расстояний между всеми парными сочетаниями 17 точек спинки нижнего профиля и 17 точек корытца верхнего профиля и выбором минимального расстояния. Далее это расстояние уточняется, для чего участки корытца верхнего и спинки нижнего профиля, включающие точки, соответствующие приближенному положению горловины аппроксимируются квадратичными параболой по координатам 3 смежных точек и разбиваются на 16 равных интервалов.

Повторяется перебор расстояний между точками мелкой разбивки и определяются величина A_r/t решетки и положение горла в канале решетки.

Подобное определение величины A_r/t является более целесообразным, чем аналитическое решение, требующее большего числа арифметических операций и более сложной структуры программы, чем для принятого метода.

Далее в собственной системе координат по безразмерным координатам и хорде определяются размерные координаты профиля, координаты центров дуг носика и хвостика и координаты точек сопряжения контуров носика и хвостика с контуром профиля.

Вычисляется толщина T профиля по нормали к средней линии на некотором расстоянии M от конечных точек профиля (рис. 6), необходимая для контроля качества изготовления профиля. Эта величина T для передней кромки профиля при расчете на ЭВЦМ может быть найдена следующим образом. Определяется абсцисса середины отрезка T

$$x_M = M \cdot \cos \gamma_1.$$

На верхнем и нижнем участках контура профиля выбираются по три точки, между абсциссами которых находится абсцисса x_M . Координатные оси поворачиваются на угол χ_1 и определяются координаты выбранных точек контура профиля в новой системе координат x^* , y^* . Верхний и нижний участки контуров, ограниченные выбранными точками, аппроксимируются соответствующими параболой $f_{сп}(x^*)$ и $f_{к}(x^*)$.

Толщина профиля определяется по соотношению

$$T = f_{сп}(M) - f_{к}(M).$$

Аналогично определяется величина T для задней кромки профиля.

Определением указанных толщин завершается расчет параметров профиля в собственной системе координат. На последу-

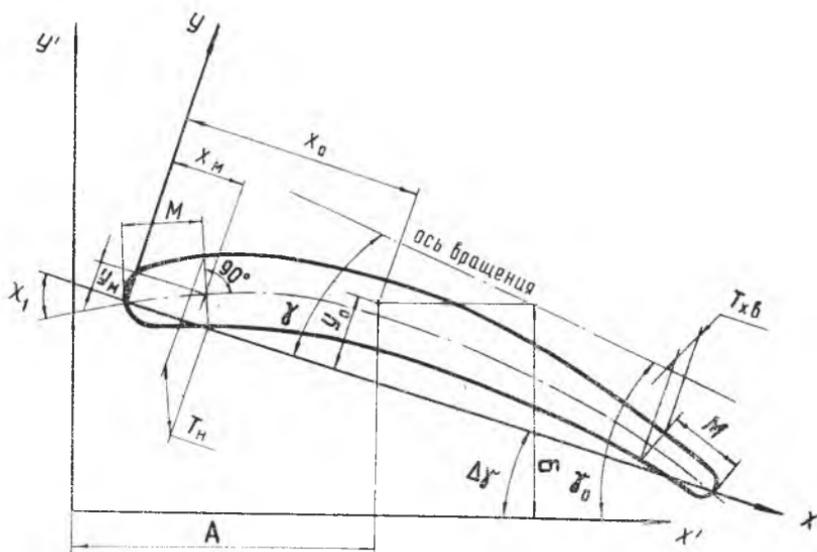


Рис. 6. Расположение собственной и единой систем координат профиля

ющих этапах профилирования определяются интегральные параметры профилей и пера лопатки, необходимые для расчета лопатки на прочность и для расчета взаимного расположения профилей рабочего колеса по высоте лопатки. Во всех случаях величины определенных интегралов в комплексной программе вычисляются по единственному методу численного интегрирования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ

Расчеты лопатки на прочность, податливость, расчет резонансных частот и аэроупругих возбуждений лопатки, определение выносов центров тяжести профилей для расчета их взаимного расположения в рабочей лопатке требуют знаний разнообразных интегральных характеристик профиля, которые обычно определяются методами численного интегрирования.

Изложенный далее метод численного интегрирования исходит из того, что во всех случаях профилирования лопатки подынтегральная функция может быть представлена в виде комбинации аргумента и одной или двух вспомогательных функций y_1 и y_2 . Эти функции заданы в виде таблиц и аппроксимируются квадратичными полиномами в интервале значений аргумента, включающем три смежные точки со значениями абсцисс (аргумента) x_i , x_{i+1} , x_{i+2} . Коэффициенты полинома определяются по соотношениям:

$$a_2 = \frac{1}{x_{i+1} - x_{i+2}} \left[\frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i+2}}{x_i - x_{i+2}} \right];$$

$$a_1 = \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} - a_2(x_i + x_{i+1});$$

$$a_0 = y_i - a_1 x_i - a_2 x_i^2.$$

Если точка x_{i+2} , y_{i+2} не задана, то принимается $a_2=0$. После определения коэффициентов для функций y_1 и y_2 по заданной подынтегральной функции z , зависящей только от переменных x , y_1 , y_2 , может быть вычислена величина определенного интеграла в пределах интегрирования от x_i до x_{i+2} при использовании соответствующих стандартных программ в ЭВЦМ.

Для определения интегральных характеристик контур изогнутого профиля, заданный значениями координат 17 точек, аппроксимируется квадратичными параболоми для спинки и корытца на восьми интервалах изменения x_i . После определения коэффициентов a_{ji} и b_{ji} ($j=0, 1, 2$; $i=1 \div 8$) парабол величины C_x и y_c профиля (рис. 7) в интервале $x_i - x_{i+2}$ могут быть определены из выражения:

$$C_x = y_{\text{сп}}(a_{ji}) - y_{\text{к}}(b_{ji}) = (a_0 - b_0)_i + (a_1 - b_1)_i x + (a_2 - b_2)_i x^2;$$

$$y_c = \frac{y_{\text{сп}}(a_{ji}) + y_{\text{к}}(b_{ji})}{2} = \frac{(a_0 + b_0)_i}{2} + \frac{(a_1 + b_1)_i}{2} x + \frac{(a_2 + b_2)_i}{2} x^2.$$

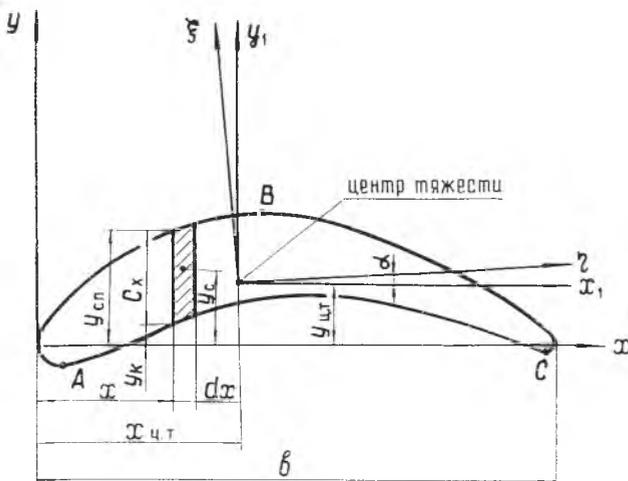


Рис. 7. Расположение главных (η , ξ) и центральных (x_1 , y_1) осей инерции профиля

Все необходимые интегральные характеристики представляются в виде комбинаций переменных x , C_x , y_c и вычисляются по следующим соотношениям.

Площадь и статические моменты инерции относительно собственных осей координат

$$F = \int_0^b C_x dx; \quad S_x = \int_0^b y_c C_x dx; \quad S_y = \int_0^b C_x x dx.$$

Моменты инерции относительно собственных осей координат

$$I_x = \int_0^b \left(y_c^2 + \frac{1}{12} C_x^2 \right) C_x dx;$$

$$I_y = \int_0^b x^2 C_x dx;$$

$$I_{xy} = \int_0^b x C_x y_c dx.$$

Геометрическая жесткость при кручении

$$T_{кр} = \frac{1}{3} \int_0^b C_x^3 \cos^2 \alpha_x dx,$$

где

$$\alpha_x = \arctg \left(\frac{dy_c}{dx} \right) = \arctg \left[\frac{(a_1 + b_1)_i}{2} + (a_2 + b_2)_i x \right].$$

Далее по известным соотношениям [7] определяются координаты центра тяжести профиля

$$x_{ц.т} = \frac{S_y}{F}; \quad y_{ц.т} = \frac{S_x}{F}, \quad (20)$$

моменты инерции профиля относительно центральных осей x_1, y_1 , параллельных осям x, y (см. рис. 7):

$$I_{x_1} = I_x - y_{ц.т}^2 F; \quad I_{y_1} = I_y - x_{ц.т}^2 F;$$

$$I_{x_1 y_1} = I_{xy} - x_{ц.т} y_{ц.т} F,$$

угол α главных осей η, ξ момента инерции

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2I_{x_1 y_1}}{I_{y_1} - I_{x_1}}$$

и моменты инерции профиля относительно главных осей

$$I_{\eta} = I_{x_1} \cos^2 \alpha + I_{y_1} \sin^2 \alpha - I_{x_1 y_1} \sin 2\alpha;$$

$$I_{\xi} = I_{x_1} \sin^2 \alpha + I_{y_1} \cos^2 \alpha + I_{x_1 y_1} \sin 2\alpha,$$

$$I_P = I_{\eta} + I_{\xi}.$$

Для расчета на прочность необходимо знать моменты сопротивления профиля в максимально-удаленных точках от главных осей координат. За такие точки принимаются: точка A , которая в собственной системе координат имеет координату $x_A = x_{rH}$ (x_{rH} определяется из соотношения $x_{rH} = r \cos \chi_1$), точка C , которая в собственной системе координат имеет координату

$$x_C = x_{rB} = b - r_{rB} \cos \alpha_2,$$

и точка B , имеющая в собственной системе координат координату

$$y_B = y_{\max}.$$

Соответствующие моменты сопротивления определяются по соотношениям:

$$W_{A \min} = \frac{I_{\eta}}{\zeta_A}; \quad W_{B \min} = \frac{I_{\eta}}{\zeta_B};$$

$$W_{C \min} = \frac{I_{\xi}}{\zeta_C}; \quad W_{A \max} = \frac{I_{\xi}}{\eta_A}; \quad W_{C \max} = \frac{I_{\xi}}{\eta_C}.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫНОСОВ ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ СЕЧЕНИЙ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ

В корневом сечении лопатки под действием газовых сил возникает изгибающий момент M_r . Составляющие этого момента M_{rA} от осевых газовых сил и M_{rB} от окружных газовых сил определяются ранее в газодинамическом расчете.

Изгибающий момент от газовых сил может быть уравновешен моментом от центробежных сил $M_{ц}$, если соответственно сместить центр тяжести пера лопатки относительно радиальной оси связки профилей. При линейном изменении величины смещения (выноса) по высоте лопатки от нуля в корневом сечении до $\Delta_a(R_0)$ и $\Delta_u(R_0)$ в периферийном сечении лопатки составляющие изгибающего момента в корневом сечении от действия центробежных сил определяются по соотношениям:

$$M_{ца} = [r_0 C_0 - k_1 r_0^2 V] \frac{\Delta_a(R_0)}{R_0 - r_0};$$

$$M_{цu} = [k_1 I_{л} - r_0 C_0] \frac{\Delta_u(R_0)}{R_0 - r_0};$$

$$k_1 = \rho \omega^2,$$

где ρ — массовая плотность материала лопатки;
 ω — угловая скорость вращения колеса;
 r_0, R_0 — радиусы корневой и периферийной сечений;

$V = \int_{r_0}^{R_0} F dr$ — объем пера лопатки;

$I_{л} = \int_{r_0}^{R_0} r^2 F dr$ — момент инерции пера лопатки;

$C_0 = k_1 \int_{r_0}^{R_0} r F dr$ — центробежная сила в корневом сечении лопатки.

Величины выносов $\Delta_a(R_0)$ и $\Delta_u(R_0)$ определяются из условия равенства составляющих моментов от газовых и центробежных сил. Выносы в произвольном сечении определяются по линейным зависимостям:

$$\Delta_a = \frac{r - r_0}{R_0 - r_0} \Delta_a(R_0); \quad \Delta_u = \frac{r - r_0}{R_0 - r_0} \Delta_u(R_0). \quad (21)$$

ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПО ВЫСОТЕ ЛОПАТКИ И ЕДИНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ ПРОФИЛЕЙ

При расположении профилей по высоте лопатки центры связки x_0, y_0 (в собственной системе координат, см. рис. 6) всех профилей располагаются на радиальной оси лопатки, перпендикулярной плоским сечениям.

В случае профилирования лопатки направляющего аппарата центр связки располагается на средней линии профиля на расстоянии x_0 , обычно задаваемом в долях хорды, от начальной точки средней линии. При профилировании лопатки рабочего

координаты центра связки в собственной системе координат каждого профиля определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}x_0 &= x_{ц.т} + \Delta_x = x_{ц.т} + (\Delta_a \cos \gamma - \Delta_u \sin \gamma); \\y_0 &= y_{ц.т} + \Delta_y = y_{ц.т} - (\Delta_a \sin \gamma + \Delta_u \cos \gamma),\end{aligned}$$

где Δ_x и Δ_y — смещения центра связки относительно центра тяжести профиля. Величины $x_{ц.т}$, $y_{ц.т}$, Δ_a и Δ_u вычисляются соответственно по формулам (20) и (21).

Для изготовления лопатки координаты профилей должны быть заданы в единой системе координат x' , y' . Преобразование из собственной системы координат каждого профиля в единую систему выполняется по соотношениям:

$$\begin{aligned}x' &= (x - x_0) \cos(\Delta\gamma) - (y - y_0) \sin(\Delta\gamma) + A; \\y' &= (x - x_0) \sin(\Delta\gamma) + (y - y_0) \cos(\Delta\gamma) + B,\end{aligned}$$

где A , B — координаты центра связки профилей лопатки в единой системе координат. Обычно принимается $A=B=0$.

Этим завершается расчет профилирования лопаточного венца осевого компрессора.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРОГРАММЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ В ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЯХ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В исходные данные для профилирования лопатки входят величины, общие для всей лопатки, и величины, относящиеся к отдельным сечениям.

В общих исходных данных указывается признак используемого исходного симметричного профиля или задаются 17 пар координат нестандартного симметричного профиля, указывается признак формы средней линии, признак типа связки профилей (лопатка направляющего аппарата, лопатка рабочего колеса с заданными или с рассчитываемыми выносами), величины A , B , γ_0 единой системы координат, число сечений профилируемой лопатки.

В исходных данных для отдельных сечений указывается диаметр сечения, углы $\alpha_{1к}$ и $\alpha_{2к}$, хорда, относительная толщина, радиусы носика и хвостика, величины \bar{x}_f и \bar{x}_c .

После выполнения расчета на широкую печать выводятся общие исходные данные, затем для отдельных сечений печатаются исходные данные, геометрические параметры, характеризующие аэродинамические свойства профиля и решетки, геометрические параметры, необходимые для оформления чертежа планов профилей лопатки и интегральные характеристики профиля, необходимые для расчетов на прочность.

Отдельной таблицей печатаются координаты профилей в собственной и единой системах координат.

В завершении расчетов формируется таблица координат в единой системе для вывода ее на печать в форме, позволяющей использовать таблицу непосредственно при выпуске чертежа плана профилей лопатки.

ВЫВОД

В данной работе изложены методические основы комплексной программы профилирования, объединяющей все виды расчетов на этом этапе проектирования компрессора. Такая программа значительно сокращает время профилирования лопаток осевого компрессора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич З. Р. О погрешностях профилирования лопаток осевого компрессора по методу плоских сечений. См. постоянный сборник.
2. Гегин А. Д. Влияние удлинения лопаток на свойства ступени осевого компрессора. В сб.: «Промышленная аэродинамика». Вып. 29. М., «Машиностроение» 1973.
3. Eastman N. Jacobs, Tenneth E. Ward. Robert M. Pinkerton. The characteristics of 78 Related Airflow sections from tests in the variable-density wind Tunnel. Report N 460, NACA, 1934.
4. Бунимович А. И., Святогоров А. А. Аэродинамические характеристики плоских компрессорных решеток при большой дозвуковой скорости. В сб.: «Лопаточные машины и струйные аппараты». Вып. 2. М., «Машиностроение», 1967.
5. Стечкин Б. С. Теория реактивных двигателей. Лопаточные машины. М., «Оборонная промышленность», 1956.
6. Довжик С. А. Профилирование лопаток осевого дозвукового компрессора. В сб.: «Промышленная аэродинамика». Вып. II. М., Оборонгиз, 1958.
7. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Изд. 8-е, М., Гос изд-во технико-теоретической литературы, 1953.

З. Р. Гуревич

О ПОГРЕШНОСТЯХ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ПО МЕТОДУ ПЛОСКИХ СЕЧЕНИЙ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- XYZ — единая прямоугольная система координат лопатки (X — ось вращения компрессора, Z — радиальная ось лопатки; Y — ось, направленная в сторону выпуклой поверхности лопатки);
- xu — собственная система координат отдельного профиля с началом у передней кромки (ось x совпадает с хордой, ось u направлена в сторону прогиба профиля);
- α — угол между вектором скорости и плоскостью XU ;
- α_k — конструктивный угол профиля (угол между касательной к средней линии профиля и плоскостью XU);