

Б. И. Мамаев, Е. К. Рябов

ПОСТРОЕНИЕ ТУРБИНЫХ РЕШЕТОК
ПРОФИЛЕЙ НА ЭВМ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

b — хорда профиля;	ружности максимального радиуса, вписанной в профиль; $x_{Cm} = x_{Cm}/b$;
t — шаг решетки;	
a_2 — ширина межпрофильного канала на выходе;	
$a_{кр}$ — ширина канала сверхзвуковой решетки в ее критическом сечении;	$\beta_{1к}$ и $\beta_{2к}$ — конструктивные углы входа и выхода;
r_1 и r_2 — радиусы скругления входной и выходной кромок;	ω_1 и ω_2 — углы заострения входной и выходной кромок;
C_m — толщина профиля, $C_m = C_m/b$;	δ — угол отгиба;
x_{Cm} — расстояние от входной кромки до центра ок-	$\beta_{2эф} = \arcsin \frac{a_2}{t}$ — эффективный угол выхода.

Широкое распространение при проектировании турбин графических методов построения профилей лопаток, например, [1—3], уже позволило накопить большой опыт по созданию высокоэффективных турбинных решеток. Вместе с тем можно отметить, что любому методу, в котором для образования контура профиля используются дуги определенного типа кривых с плавно меняющейся кривизной (параболы, гиперболы, лемнискаты и др.), присущи ограниченные возможности по обеспечению выбранных величин некоторых основных геометрических параметров решетки. Это особенно заметно, когда при проектировании ступени большой верности решается задача о взаимном размещении профилей как сечений единого пера лопатки. Тогда необходимость удовлетворить жесткие требования прочности и технологичности конструкции заставляет отступать от строгого соблюдения метода и допускать нежелательные скачки кривизны контура профиля, а также отклонения от оптимальных значений важных параметров решетки — относительного шага, конструктивного угла входа и т. д. [2, 3]. Указанное ограничение создает трудности и при разработке метода аналитического профилирования лопаток, если он основывается на алгоритмическом опи-

сании действий, выполняемых конструктором при графическом построении профилей.

В статье рассматривается новый метод построения решеток, в котором отмеченный недостаток практически устранен. Метод позволяет варьировать законы изменения кривизны и, в частности, образовывать без ее скачков контуры спинки и корыта профиля. Одновременно он дает возможность выдерживать с заданной точностью величины всех геометрических параметров решетки, показанных на рис. 1 и определяющих в значительной мере профиль еще до его построения.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Пусть в интервале $x \geq 0$ задана интегрируемая функция $f(x)$. Тогда функция $y(x)$, для которой кривизна в каждой точке совпадает со значением $f(x)$, определяется из уравнения:

$$\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = f(x). \quad (1)$$

В качестве граничных условий примем:

$$y(0) = 0; \quad y'(0) = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

С помощью подстановки $y' = p$ [4] получаем решение уравнения (1) в виде

$$y(x) = \int_0^x \frac{\Phi(u) + C}{\sqrt{1 - [\Phi(u) + C]^2}} du, \quad (3)$$

где

$$\Phi(u) = \int_0^u f(s) ds; \quad C \equiv \sin \alpha. \quad (4)$$

Из уравнения (3) следует, что угол Θ наклона касательной к кривой $y(x)$ при $x = x_0$ и площадь, ограниченная функцией кривизны $f(x)$, связаны соотношением

$$\int_0^{x_0} f(s) ds = \sin \Theta - C. \quad (5)$$

Для обеспечения необходимого характера изменения кривизны при очерчивании контура профиля целесообразно в качестве функции $f(x)$ взять ломаную линию, которая сочетает в себе простоту описания и универсальность в аппрокси-

мации качественно различных кривых. Проведенное исследование показало, что в данной конкретной задаче можно ограничиться четырьмя звеньями ломаной.

Обозначим через

$$y(x) = L(x; C; A_1, k_1, A_2, k_2, A_3, k_3, A_4, k_4)$$

кривую вида (3), для которой $f(x)$ является ломаной, начинающейся из точки $(0, 0)$ и идущей до $x = A_1$ с угловым коэффициентом k_1 , далее до $x = A_2$ с коэффициентом k_2 и т. д. Покажем, как определяются все параметры кривой L , описывающей спинку профиля.

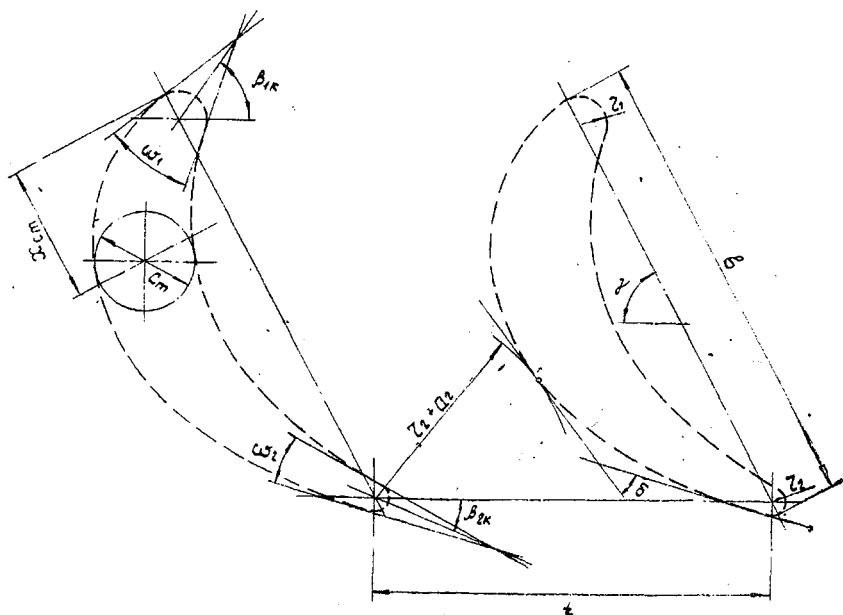


Рис. 1. Решетка турбинных профилей и ее параметры

Пусть некоторым образом выбраны геометрические характеристики решетки, показанные на рис. 1. Построение участка спинки от точки касания с выходной кромкой до точки, соответствующей горлу межпрофильного канала, сводится к определению параметров кривой L , проходящей через точки $(0, 0)$ и (x_0, y_0) и имеющей в них касательные с заданными углами наклона. По соотношениям (2) и (4) определя-

ется значение параметра C , а по соотношению (5) — величина площади σ_0 , которую должна ограничивать функция кривизны на отрезке $0 \leq x \leq x_0$.

В силу фиксированного значения площади σ_0 с помощью одного звена ломаной кривизны нельзя обеспечить прохождение линии L через точку (x_0, y_0) , и поэтому здесь необходимо использовать, по крайней мере, два звена. Следовательно, $A_2 = x_0$, а среди оставшихся трех параметров A_1, k_1 и k_2 в качестве независимого выберем A_1 . Введем дополнительную связь

$$k_1 = \frac{\sigma_0}{A_1 x_0}, \quad (6)$$

с учетом которой для обеспечения площади σ_0

$$k_2 = \frac{\sigma_0 A_1}{x_0 (x_0 - A_1)^2}. \quad (7)$$

Как видно из выражений (6) и (7), дополнительная связь (6) выбрана таким образом, чтобы угловые коэффициенты k_1 и k_2 имели одинаковые знаки при любых значениях параметра A_1 и тем самым обеспечивалась монотонность изменения кривизны на данном участке спинки профиля.

Окончательно параметры первых двух звеньев ломаной определяются решением уравнения

$$L[x_0; C; A_1, k_1(A_1), x_0, k_2(A_2), A_3, k_3, A_4, k_4] = y_0 \quad (8)$$

с одним неизвестным A_1 . Это уравнение достаточно быстро решается методом хорд.

Далее строим участок спинки до точки касания с входной кромкой, т. е. решаем аналогичную задачу по проведению линии L через точку (x_1, y_1) с известным углом наклона касательной. Из уравнения (5) находится соответствующее значение площади σ_1 на отрезке $0 \leq x \leq x_1$.

Построение этого участка возможно с помощью одного третьего звена ломаной кривизны, достаточно сохранить значения A_1, k_1 и k_2 , а место излома A_2 искать на продолжении второго звена, т. е. в интервале $x_0 < A_2 < x_1$. В таком случае общий закон изменения кривизны однозначно соответствовал бы заданным геометрическим характеристикам профиля. Поэтому с целью варьирования характера изменения кривизны спинки на входном участке введено четвертое звено ломаной с фиксированным угловым коэффициентом k_4 . Если требуется сохранить монотонность изменения кривизны, то следует принять $k_4 > 0$; величину $k_4 < 0$ можно использовать при очерчива-

нии профилей активных решеток; если же в качестве входного участка спинки выбрана дуга окружности, то $k_4 = 0$.

Таким образом, осталось определить параметры третьего звена. Из выражения для площади

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \left[h + \frac{k_3(A_3 - x_0)}{2} \right] (A_3 - x_0) + \\ + \left[h + k_3(A_3 - x_0) + \frac{k_4(x_1 - A_3)}{2} \right] (x_1 - A_3),$$

в котором

$$h = k_1 A_1 + k_2 (x_0 - A_1),$$

получаем зависимость k_3 от A_3 . Необходимое значение A_3 находим из уравнения

$$L[x_1; A_1; x_0; k_2; A_2; k_3(A_3), x_1, k_4] = y_1. \quad (9)$$

Аналогично определяются параметры кривой, описывающей корыто профиля. Ее необходимо провести через точки касания с кромками и, например, с окружностью диаметра C_m , положение которой задано координатой x_{C_m} (см. рис. 1).

По описанному методу составлен алгоритм. В качестве исходных данных используются все показанные на рис. 1 геометрические параметры, величины которых выдерживаются точно. В исходные данные может входить и площадь профиля F , если не задана его толщина.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕШЕТОК

Опробование показало, что рассматриваемый метод пригоден для любых реальных сочетаний углов на входе в решетку и выходе из нее. В частности, на рис. 2 представлена серия решеток, построенных для различных значений $\beta_{1к}$ и постоянно-го угла $\beta_{2эф}$. Все решетки серии имеют соответственно одинаковые величины $b, t, r_1, r_2, F, \beta_{2к}, \delta$ и ω_2 . На том же рисунке даны примеры распределений кривизны контуров профиля K по ширине решетки.

Следует заметить, что величины геометрических параметров решетки по заданным на ее проектирование исходным данным могут быть выбраны на основании обобщений результатов исследований решеток, имеющих малые значения коэффициента профильных потерь (например, на основании статистических зависимостей, приведенных в работах [3, 5]).

Обеспечиваемая предлагаемым методом возможность выдержать выбранную геометрию профиля при благоприятном распределении кривизны по его контуру позволит получить и в новой решетке такое же высокое газодинамическое совершенство, как и у лучших ранее разработанных решеток.

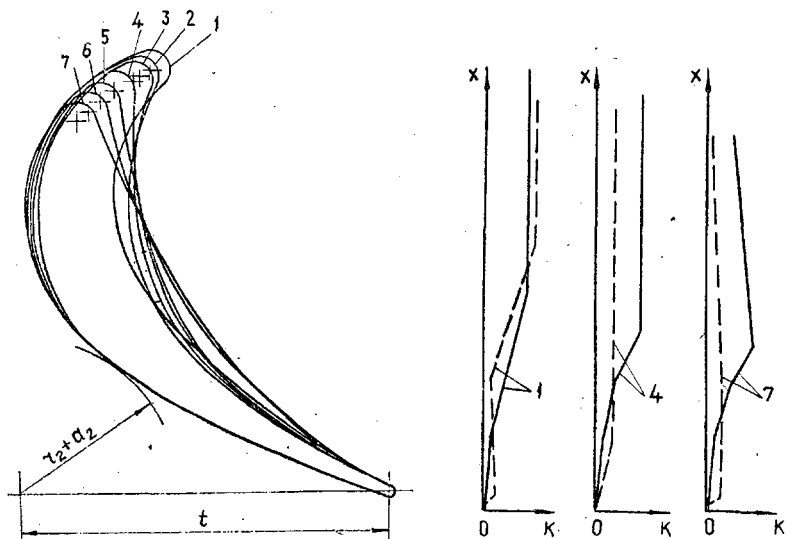


Рис. 2. Рабочие решетки при различных значениях β_{1k} и распределении кривизны контуров вдоль ширины этих решеток ($b = 50$ мм; $F = 3,4$ кв. см; $\beta_{2эф} = 24^\circ$): 1 — $\beta_{1k} = 30^\circ$; 2 — $\beta_{1k} = 40^\circ$; 3 — $\beta_{1k} = 50^\circ$; 4 — $\beta_{1k} = 60^\circ$; 5 — $\beta_{1k} = 70^\circ$; 6 — $\beta_{1k} = 80^\circ$; 7 — $\beta_{1k} = 90^\circ$; — спинка; - - - - - корыто

При профилировании закрученных лопаток, когда построены и взаимно увязаны их крайние сечения, для обеспечения плавности поверхности пера построение промежуточных профилей ведется в условиях ограниченных возможностей по расположению кромок. В то же время требуется поместить центр тяжести профиля на линию, заданную условиями прочности, сохранив при этом ранее определенные или выбранные основные геометрические характеристики профиля и решетки, а именно, величины b , r_1 , r_2 , F , β_{1k} , $\beta_{2эф}$, γ , δ и др. Некоторые возможности метода при решении такой задачи иллюстрирует рис. 3, на котором показаны три профиля, имею-

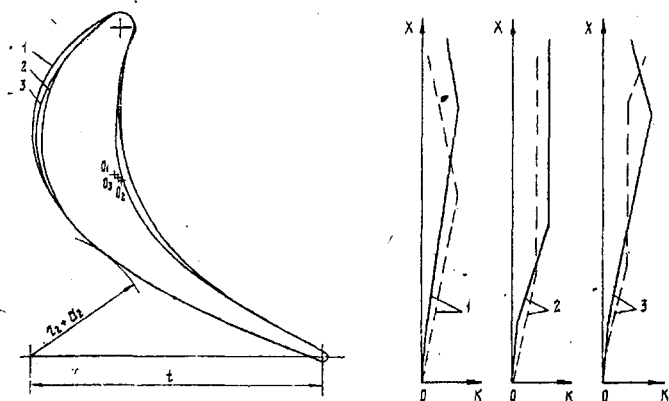


Рис. 3. Влияние изменения кривизны контуров профиля на положение его центра тяжести (при $b = 50$ мм; $F = 3,4$ кв. см; $\beta_{1к} = 50^\circ$): 1 — $\omega_1 = 50^\circ$, $\bar{C}_m = 0,206$; 2 — $\omega_1 = 41^\circ$, $\bar{C}_m = 0,2$; 3 — $\omega_1 = 26^\circ$, $\bar{C}_m = 0,208$; — спинка; - - - - корыто

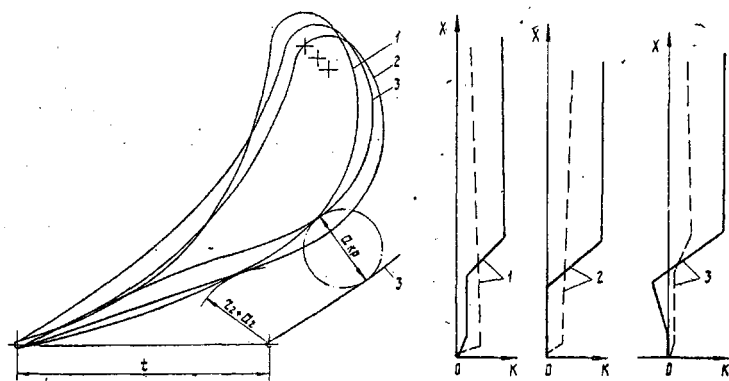


Рис. 4. Сопловые решетки для различных величин λ_2 и распределение кривизны контуров вдоль ширины этих решеток ($b = 38,8$ мм; $F = 2,05$ кв. см; $\beta_{1к} = 78^\circ$): 1 — $\delta = 18^\circ$; 2 — $\delta = 0$; 3 — $\delta = -9^\circ$, $\bar{f} = a_2/a_{кр} \approx 1,32$; — спинка; - - - - корыто

щие неодинаковое положение центров тяжести и различающиеся по существу лишь величинами ω_1 и C_m . Профили выполнены без скачков кривизны на контурах спинки и корыта.

Рассматриваемый метод может быть использован при проектировании решеток, предназначенных для любых значений приведенной скорости выхода потока λ_2 . Например, на рис. 4 представлены три сопловые решетки, выполненные с одинаковыми величинами $d, r_1, r_2, t, F, \beta_{1к}, \beta_{эф}$ и без скачков кривизны на контурах спинки и корыта. Одна из них, имеющая криволинейный участок спинки в косом срезе с углом отгиба $\delta = 18^\circ$, рассчитана на дозвуковые скорости потока ($\lambda_2 \leq 0,7 \div 0,8$); другая с прямолинейной спинкой в косом срезе ($\delta = 0^\circ$) предназначена для околосвуковых скоростей ($\lambda_2 < 1,2$); и третья с углом $\delta = -9^\circ$ является повторением сверхзвуковой решетки С-9022В МЭИ [6].

Практика показала, что метод позволяет с высокой точностью аппроксимировать контуры любых реальных турбинных профилей. Это объясняется уже указанной возможностью точно выдерживать назначенные величины геометрических параметров решетки и отсутствием ограничений, накладываемых на характер изменения кривизны на контурах профиля. Гибкость метода в этом отношении может быть легко повышена путем увеличения числа звеньев ломаной линии — функции кривизны. В качестве примера на рис. 5 показаны

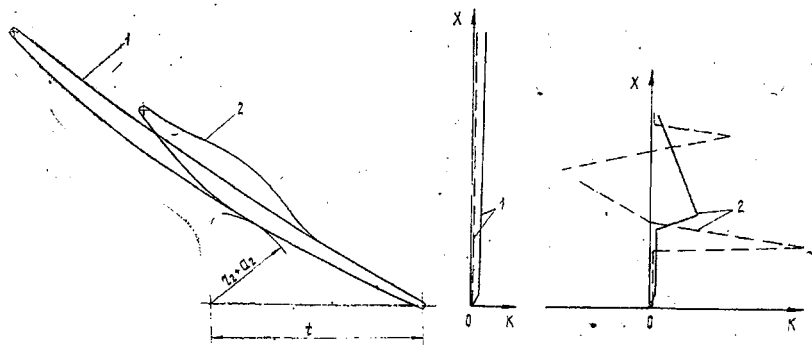


Рис. 5. Рабочие решетки турбинной ступени с большой степенью реактивности и распределение кривизны контуров вдоль ширины этих решеток: 1 — $b = 85$ мм; $t = 36,3$ мм; $F = 2,3$ кв. см; $C_m = 0,044$; $\lambda_{cm} = 0,4$; $\beta_{1к} = 137^\circ$; $\omega_1 = 9^\circ$; 2 — $b = 59,5$ мм; $t = 36,3$ мм; $F = 2,3$ кв. см; $C_m = 0,13$; $\lambda_{cm} = 0,335$; $\beta_{1к} = 137^\circ$; $\omega_1 = 18^\circ$

результаты достаточно точной аппроксимации профилей, представленных в работе [7], в том числе и профиля, отличающегося от обычно применяемых выпуклым участком на корыте.

Благодаря указанным качествам рассматриваемый метод без каких-либо существенных изменений может быть использован при профилировании длинных лопаток турбинных ступеней, рассчитанных на любые докритические и сверхкритические перепады давлений. Более того, поскольку не видно принципиальных трудностей в построении и компрессорных решеток по этому методу, для осевых турбомашин его можно сделать универсальным.

С точки зрения дальнейшего развития метода очень заманчиво установить надежные связи между характером эпюры скоростей на профиле и законом изменения кривизны его контуров. Наличие таких связей позволило бы сблизить этот инженерный метод с теоретическими методами построения профилей, базирующимися на решении обратной задачи гидромеханики турбомашин.

В заключение отметим, что изложенный метод реализован на ЭВМ типа «М-20» с выводом результатов построения на АЦПУ и перфоленту для чертежного автомата ИТЕКАН. Время построения одной решетки около минуты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г. Ю. Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей. М., Машгиз, 1958.
2. Дейч М. Е., Филиппов Г. А., Науман В. Лемнискатный метод построения профилей дозвуковых решеток. «Теплоэнергетика», 1964, № 7.
3. Аронов Б. М., Жуковский М. И., Журавлев В. А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. М., «Машиностроение», 1975.
4. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., «Наука», 1971.
5. Теплотехнический справочник. Т. 2, изд. 2-е. М., «Энергия», 1976.
6. Дейч М. Е., Филиппов Г. А., Лазарев Л. Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. М., «Машиностроение», 1965.
7. Майорский Е. В., Нойман К., Трояновский Б. М. Новый профиль турбинной лопатки. «Энергомашиностроение», 1971, № 4.