

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.165.533

ПРОФИЛЬ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ИЗ КРИВЫХ BEZIER

Л.В. Виноградов¹, А.П. Алексеев¹,
А.В. Костюков²

¹Кафедра теплотехники и тепловых двигателей
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

²Кафедра транспортных газотурбинных двигателей
Московский государственный машиностроительный
университет «МАМИ»
ул. Б. Семёновская, 38, Москва, Россия, 107023

В работе рассмотрен вопрос профилирования лопатки турбины. Профиль лопаток очерчивается тремя кривыми Bezier: спинка профиля — одной параболой (кривой Bezier 2-го порядка), корытце — двумя параболой (кривыми Bezier 2-го порядка) с заданием максимальной толщины профиля.

Ключевые слова: турбина, лопатка, профиль, парабола, кривая Bezier, проектирование.

Проектирование лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из наиболее трудоемких, многофакторных задач. В процессе конструирования проточной части ГТД применяются два основных способа профилирования: первый способ — применение ранее разработанных профилей, представляемых в атласах профилей или в других нормативных документах, второй способ — разработка оригинального профиля.

Обводы профиля лопатки описывается многими кривыми: параболой, совокупностью сопряженных окружностей, лемнискатами, эллиптическими кривыми, дробной рациональной функцией, кривыми Bezier чаще всего порядка 2—5, комбинацией кривых и т.д. Несмотря на такое разнообразие исходных кривых, основные принципы проектирования и основные требования к контуру (обводу) профиля лопатки турбины остаются, практически, неизменными.

В работе реализован вариант расчетной схемы [1] для построения профиля лопатки турбины (рис. 1). При разработке расчетной схемы и математической модели положено: передний фронт решетки совмещен с осью ординат, поток набегаёт слева, установочная (базовая) линия, положение которой определяется углом установки профиля в решетке, касается окружностей входной и выходной кромок профиля, окружность передней кромки касается переднего фронта решетки, а окружность выходной кромки касается заднего фронта решетки, направление окружной скорости совпадает с противоположным направлением оси ординат.

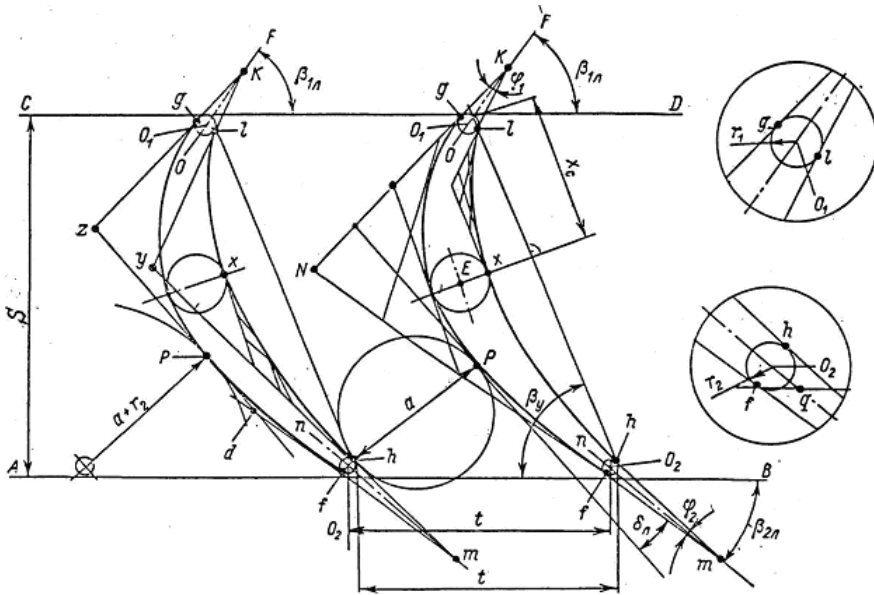


Рис. 1. Расчетная схема построения профиля турбинной решетки [1]

На рис. 1 показаны параметры, которые используются при построении профиля лопатки турбин: β_{1n} — входной угол профиля лопатки, образованный касательной к средней линии ОК профиля в его входной части и передним фронтом решетки; β_{2n} — выходной угол профиля лопатки, образованный касательной к средней линии профиля nm в его выходной части и задним фронтом решетки (для соплового аппарата указанные углы обозначаются через α); S — ширина решетки; a — горло межлопаточного канала (минимальное расстояние между двумя соседними лопатками); δ_n — угол отгиба (затылочный угол); r_1 и r_2 — радиусы входной и выходной кромки профиля; t — шаг решетки; φ_1 — угол заострения входной кромки; φ_2 — угол заострения выходной кромки; X_C — расстояние, на котором расположено сечение максимальной толщины профиля S_{max} .

Для решения задачи в соответствии с расчетной схемой (рис. 1) была разработана программа для ЭВМ в среде Mathcad: The program for the automated profiling blades Turbomachines by Bezier curves (Программа автоматизированного проектирования лопаток турбомашин кривыми Bezier). Разработанный модуль встроен в CAD (computer-aided design) систему проектирования турбомашин.

В данной работе спинка профиля описывается кривой Bezier 2-го порядка, для расчета параметров которой были определены векторы трех опорных точек кривой (точки g, N, f (см. рис. 1)). Уравнение в формате Безье—Бернштейна для Mathcad имеет вид:

$$\begin{aligned}XS_{12}(t) &:= x_g (1-t)^2 + 2 x_{s_{12}} t(1-t) + t^2 x_f \\YS_{12}(t) &:= y_g (1-t)^2 + 2 y_{s_{12}} t(1-t) + t^2 y_f,\end{aligned}$$

где $XS_{12}(t)$ — абсцисса; $YS_{12}(t)$ — ордината; $0 \leq t \leq 1$ — параметр параболы Bezier; $x_{s_{12}}, y_{s_{12}}$ — вектор координат опорной точки N (см. рис. 1).

Входная и выходная кромки профиля описывались дугами окружностей принятых в соответствии с рекомендациями для данного класса профилей радиусов ($r_1 = 2,17$ мм; $r_2 = 0,847$ мм).

Для расчета векторов опорных точек кривых, описывающих корытце, следует задаться величиной относительной абсциссы положения сечения максимальной толщины профиля ($X_{rc} = 0,326$). Используя свойство сечения максимальной толщины профиля лопатки, заключающееся в том, что угол наклона касательной в этом сечении к кривой спинки и кривой корытца равны, определяем вектор опорной точки X (см. рис. 1), являющейся точкой сопряжения левой (IX) и правой (Xh) ветвями корытца.

В работе было принято, что корытце будет синтезироваться двумя кривыми Bezier 2-го порядка, сопряженными в точке X . Естественно, что точки l и h являются точками сопряжения окружностей кромок профиля и параболами.

На рис. 2 показан профиль типа P5140 лопатки турбины: угол входа потока на решетку 51° , угол выхода потока из решетки — 40° , угол установки профиля — 75° ; относительная максимальная толщина — $0,172$, обводы которого синтезированы параболическими кривыми Bezier. На графике показаны: профиль лопатки (сплошная линия), окружность в максимальном сечении профиля (сплошная линия тонкая), касательная в точке сопряжения двух кривых Bezier 2-го порядка корытца (пунктирная линия).

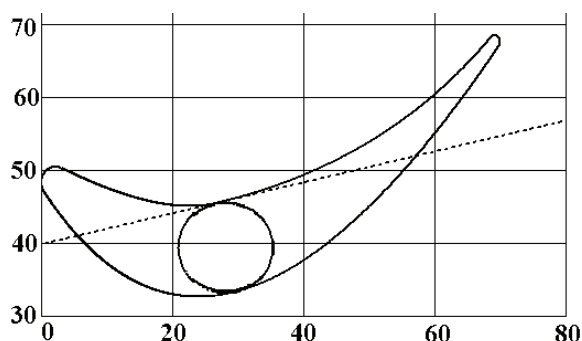


Рис. 2. Профиль типа P5140 с однопараболической спинкой (Bezier 2-го порядка) и двухпараболическим корытцем (две кривые Bezier 2-го порядка)

На рис. 3 показана решетка из выше указанных профилей с относительным шагом решетки — $t_{rm} = 0,614$.

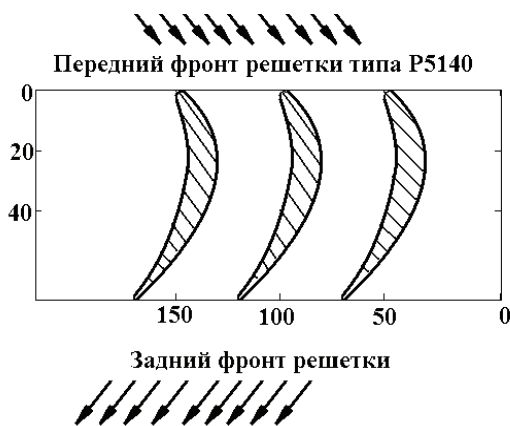


Рис. 3. Развертка решетки типа P5140

В работе исследованы геометрические характеристики профилей типа P5140 при изменении максимальной толщины профиля при постоянстве других исходных параметров.

На рис. 4 показано изменение угла наклона касательной к обводу спинки (штрихпунктирная линия), корытца (линия из точек) при описании двумя парабололами и корытца при описании его одной кривой Bezier 2-го порядка (сплошная линия) при опорных точках l , y , h . Из графиков видно, что при формировании обвода в виде одной кривой, наблюдается плавное монотонное изменение угла наклона касательной к кривой от меньшего до большего значений угла наклона в опорных точках парабол.

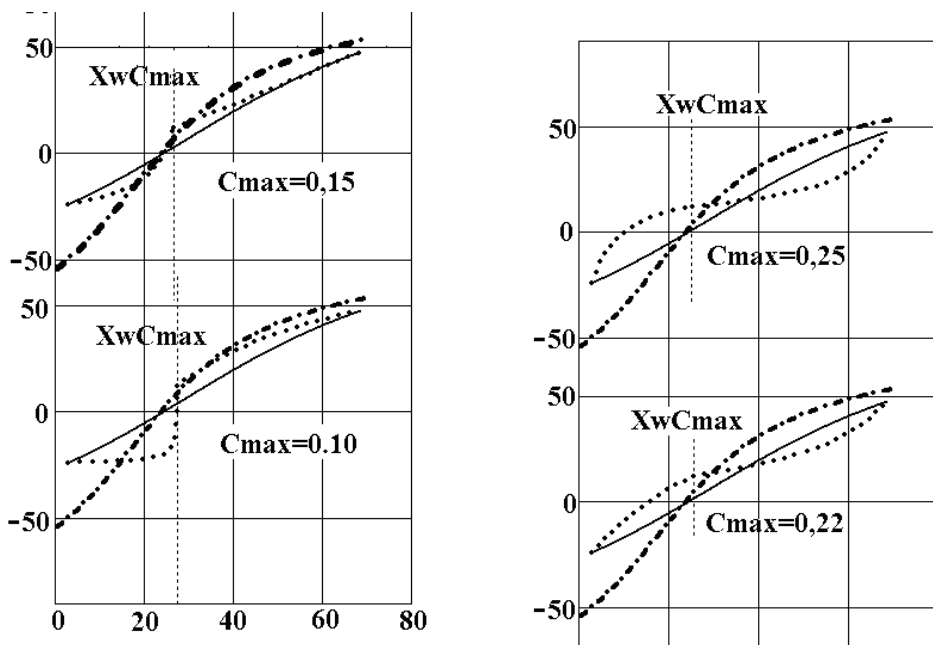


Рис. 4. Изменение угла наклона касательной к обводу спинки и корытца профиля типа P5140 при различной максимальной толщине профиля C_{max}

При синтезе корытца из двух кривых в точке сопряжения характер изменения угла меняется и может практически иметь разрыв при меньших значениях максимальной толщины профиля (например, при $C_{max} = 0,10$). Это является следствием излома контура корытца.

Одним из важнейших параметров обводов профилей лопаток является кривизна, которая определяет знак и величину поперечного градиента газодинамических параметров течения в решетке.

На рис. 5 показано изменение кривизны обводов спинки (штрихпунктирная линия), корытца (сплошная линия). Из графиков видно, что при обводе одной кривой кривизна изменяется плавно, имея максимум. В месте сопряжения парабол корытца при всех значениях максимальной толщины профиля имеет место разрыв кривизны. Для ликвидации разрыва кривизны при сопряжении кривых 2-го порядка одним из путей решения может быть повышение порядка (3 и выше) кривой Bezier.

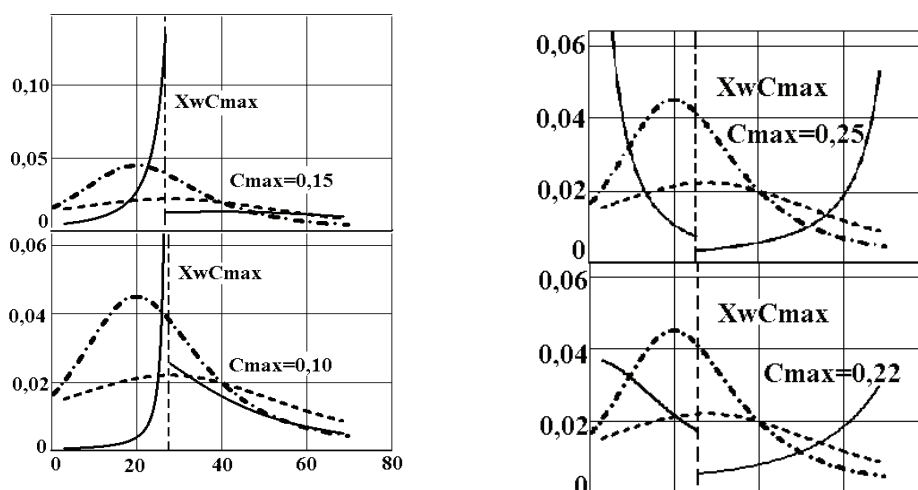


Рис. 5. Изменение кривизны спинки и корытца профиля типа P5140 при различной максимальной толщине профиля C_{max}

Таким образом, проведенная работа позволяет сделать следующие выводы. Разработана для ЭВМ на языке Mathcad программа проектирования профиля лопатки с обводами в виде кривых Bezier 2-го порядка.

Исследование геометрических характеристик обводов профиля при разной величине максимальной толщины профиля показало, что реальный диапазон рекомендуемых максимальных толщин профиля сужается по сравнению с общим диапазоном.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Кустарев Ю.С., Костюков А.В.* Осевые турбины транспортных ГТД: Учебное пособие. — М.: МГТУ «МАМИ», 2006. [*Kustarev Yu.S. Osevyey turbiny transportnyh GTD: Utchebnoye posobie.* — М.: MG TU “MAMI”, 2006.]

- [2] *Виноградов Л.В.* Спинка лопатки турбины из двух сопряженных парабол // Вестник РУДН. Серия «Информационные технологии и управление». — 2007. — № 1. — С. 15—20.
[*Vinogradov L.V.* Spinka lopatki turbiny iz dvuh soprtjagennyh parabol // Vestnik RUDN. Serija “Informatcionnye tehnologii i upravlenie”. — 2007. — N 1. — S. 15—20.]

TURBINE BLADE PROFILE OF CURVES BEZIER

L.V. Vinogradov¹, A.P. Alekseev¹, A.V. Kostjukov²

¹The Department of heating engineers and heat engines
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

²The Department of transport gas turbine engines
Moscow state engineering university (MAMI)
B. Semenovskaya str., 38, Moscow, Russia, 107023

An article presents profiling turbine blades. The computer program in Mathcad is an element of CAD design system turbine. Blade profile outlines three curves Bezier: (back profile — one parabola (Bezier curve of order 2); trough — two parabolas (Bezier curves of order 2). In the construction was given the maximum thickness of the profile.

Key words: turbine blade, profile, parabola, curve Bezier, software package, design.