

СПИНКА ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ИЗ ДВУХ СОПРЯЖЕННЫХ ПАРАБОЛ

Л.В. Виноградов

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей

Российский университет дружбы народов

Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В работе рассмотрено автоматизированное профилирование спинки лопатки турбины из двух сопряженных парабол.

При проектировании турбины после этапа термодинамического и газодинамического расчета проточной части, в частности ступеней, наступает этап профилирования, суть которого — построение обводов сечений лопаток турбины, а на их базе и решеток профилей.

При проектировании лопаток наиболее целесообразно пользоваться заводскими нормами профилей или профилями, рекомендуемыми научно-исследовательскими организациями [1]. Это тем более удобно, что для таких профилей указываются оптимальные величины шага, угла установки, угла атаки, а также приводятся опытные данные по исследованию данной решетки, которые позволяют установить идентичность угла выхода β_2 с заданным и найти КПД решетки (или коэффициент скорости φ , ψ).

Однако в практике проектирования встречаются случаи, когда нет подходящего профиля, и поэтому приходится вначале строить профиль, а затем и решетку из этих профилей. Один из таких методов (графоаналитический) достаточно подробно рассмотрен в работе [1].

На рис. 1 представлена расчетная схема для построения профиля ([1]).

Наиболее трудоемкая задача — построение кривой lpf (рис. 1). Эта кривая, формирующая спинку профиля, может быть очерчена сопряженными дугами окружностей, одной или двумя лемнискатами Бернулли, параболлами и т.д. В статье рассматривается описанный в работе [1] графоаналитический вариант — кривая lpf в виде параболлы, являющейся огибающей сетки касательных, проведенных соответствующим способом [1].

Собственно задача построения одиночной параболлы решена в работе [2], где представлена автоматизированная система построения параболического участка профиля лопатки. Следует отметить, что математическая модель (ММ) рассматриваемой параболлы — алгоритмическая, так как аналитического выражения параболла не имеет.

Для того, чтобы построить параболлу lf , необходимо знать координаты точек l и f , а также наклон касательных в этих точках к параболле [2] (l — начальная точка параболлы, f — конечная точка параболлы). В расчете координат r_5 этих точек в основном участвуют: ширина решетки b , угол установки профиля в решетке $\beta_{уст}$, угол на входе в решетку β_1 , угол на выходе из решетки β_2 , углы заострения на входе $\gamma_{вх}$ и выходе $\gamma_{вых}$ (рис. 1).

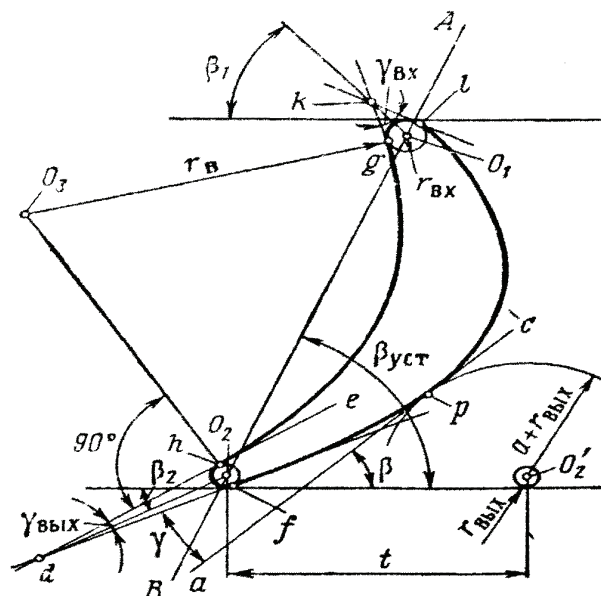


Рис. 1. Расчетная схема для построения профиля лопатки

После построения точек l и f , задавая шаг решетки t , коэффициентом m и затылочным углом γ , в соответствии с [1] определяют величину горла решетки a и его положение (координаты точки p и угол наклона линии ac , проходящей через точку p). Если профиль лопатки и решетка спрофилированы правильно, то точка p принадлежит параболе lf , а линия ac является касательной к параболе.

Опыт проектирования турбинных лопаток показывает, что никогда не удастся изначально так задать исходные параметры для параболы, чтобы выполнялись выше изложенные условия. Иными словами, может оказаться, что построенная парабола не пройдет через точку p [1]. В этом случае надо изменить наклон линии df , что сводится к изменению затылочного угла γ . В большинстве случаев перестраивать вогнутую поверхность gh (корытце) при этом не приходится. В случае необходимости можно варьировать углами γ_{vyx} и β_1 ; можно, однако, допустить некоторый угол атаки и т.д.

Следует отметить, что вышеуказанные рекомендации не приводят к однозначному решению, т.е. к комбинации параметров для выполнения условий для точки p . Необходима проработка ряда вариантов. При применении автоматизированной системы построения параболы [2] поиск необходимого варианта по сравнению с графоаналитическим методом, когда каждый вариант изменения любого параметра необходимо вычерчивать, существенно упрощается. Однако и при применении САПР алгоритм поиска варианта, обеспечивающего выполнение условий в точке p , остается неоднозначным. Возможны случаи, когда нельзя, вычерчивая одну параболу lf , обеспечить условия в точке p .

Для разрешения этой проблемы спинку лопатки очерчивают не одной параболой lf , а двумя сопряженными в точке p параболой lp и pf .

Для построения сопряженных парабол была разработана математическая модель, включающая две программных модуля: подпрограмма расчета матрицы координат параболы и программа расчета матрицы координат двух сопряженных парабол и их построение.

Подпрограмма расчета матрицы координат параболы в параметрическом виде *Pp_PARMED.mcd* по существу аналогична подпрограмме *Pp_par_med_spnk.mcd*, рассмотренной в [2], однако более компактная. Поэтому в данной работе не приводится.

Программа *R_PARMED_2.mcd* — программа расчета матрицы координат сопряженных парабол и их построение. Текст программы представлен в таблице.

Таблица

Порядок расчета по программе R_PARMED_2.mcd

№№ п/п	Исходные данные — параметры точек параболы
1	$x_A:=0$ $y_A:=30$ $\varepsilon_A:=60 \cdot \pi \cdot 180^{-1}$
2	$x_P:=63$ $y_P:=25$ $\varepsilon_P:=-45 \cdot \pi \cdot 180^{-1}$
3	$x_C:=80$ $y_C:=0$ $\varepsilon_C:=-60 \cdot \pi \cdot 180^{-1}$
4	$N:=10$
5	Reference:C:\Pp_PARMED.mcd
6	Формирование матрицы координат параболы на участке <i>lp</i> (рис. 1) $z_{AP}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P):=\text{CrdprmdR}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P)$
7	Формирование матрицы координат параболы на участке <i>pc</i> $z_{PC}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C):=\text{CrdprmdR}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C)$
8	$jr:=\text{rows}(z_{PC}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C))-1$ $jc:=\text{cols}(z_{PC}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C))-1$
9	Формирование подматрицы координат сопряженных парабол, участок <i>pf</i> $\text{SBM}_{PC}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C):=\text{submatrix}(z_{PC}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C), 1, jr, 0, jc)$
10	Формирование единой матрицы сопряженных парабол - участок <i>lpf</i> $\text{ZSAPC}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P):=\text{stack}(z_{AP}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P), \text{SBM}_{PC}(N, x_P, y_P, \varepsilon_P, x_C, y_C, \varepsilon_C))$
11	Вектор ординат сопряженных парабол (спинки профиля) $Y_{p2}^{<1>}:=\text{ZSAPC}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P)^{<1>}$
12	Вектор абсцисс сопряженных парабол $X_{p2}^{<0>}:=\text{ZSAPC}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P)^{<0>}$
13	Интерполяция кубическим сплайном параболической спинки для тестовых исходных данных (п.п. 1—4) $\text{Pr1}:=\text{cspline}(X_{p2}^{<0>}, Y_{p2}^{<1>})$ $\text{Pr1}(x):=\text{interp}(\text{Pr1}, X_{p2}^{<0>}, Y_{p2}^{<1>}, x)$
14	Формирование матрицы координат сопряженной параболы в зависимости от ординаты точки сопряжения y_p $\text{ZSAPC3}(y_p):=\text{ZSAPC}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P)$
15	Формирование матрицы координат сопряженной параболы в зависимости от абсциссы точки сопряжения x_p $\text{ZSAPC2}(x_p):=\text{ZSAPC}(N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P)$
16	Интерполяция кубическим сплайном координат спинки профиля для различных значений ординат точки сопряжения P при $x_p=\text{const}$ $\text{Pr2}:=\text{cspline}(\text{ZSAPC3}(15)^{<0>}, \text{ZSAPC3}(15)^{<1>})$ $\text{Pr2}(x):=\text{interp}(\text{Pr2}, \text{ZSAPC3}(15)^{<0>}, \text{ZSAPC3}(15)^{<1>}, x)$ $\text{Pr3}:=\text{cspline}(\text{ZSAPC3}(30)^{<0>}, \text{ZSAPC3}(30)^{<1>})$ $\text{Pr3}(x):=\text{interp}(\text{Pr3}, \text{ZSAPC3}(30)^{<0>}, \text{ZSAPC3}(30)^{<1>}, x)$

Продолжение таблицы

17	Построение изменения формы спинки Изменение формы спинки из двух сопряженных парабол в зависимости от ординаты точки P ($y_p = 15, 25, 30$ мм)
18	Интерполяция координат сопряженной параболы при изменении абсциссы точки сопряжения P при постоянной ординате $y_p = \text{const}$ Pr2:=cspline(ZSAPC2(57)^{<0>}, ZSAPC2(57)^{<1>}) Pr2(x):=interp(Pr2, ZSAPC2(57)^{<0>}, ZSAPC2(57)^{<1>}, x) Pr3:=cspline(ZSAPC2(60)^{<0>}, ZSAPC2(60)^{<1>}) Pr3(x):=interp(Pr3, ZSAPC2(60)^{<0>}, ZSAPC2(60)^{<1>}, x)

В качестве выводов по работе можно считать то, что проведенный численный эксперимент с использованием программ *Pp_PARMED.mcd* и *R_PARMED_2.mcd* подтвердил работоспособность автоматизированной системы расчета параметров сопряженной параболы. В пунктах таблицы 17, 19, 21 показаны только некоторые результаты, которые могут быть получены при применении предложенной системы расчета.

Следует также отметить, что рассмотренные в данной работе программные модули *Pp_PARMED.mcd* и *R_PARMED_2.mcd*, могут быть без нарушения функционирования основной САПР турбинной лопатки встроены в качестве расширения или дополнения указанной системы.

Продолжение таблицы

19	Изменение положения спинки из двух сопряженных парабол при изменении абсциссы точки P ($x_p = 57, 60, 63$ мм)
----	---

Продолжение таблицы

20	Запись матрицы координат в текстовый файл WRITEPRN("C:\...\MATRSPR1.prn"):= ZSAPC($N, x_A, y_A, \varepsilon_A, x_P, y_P, \varepsilon_P$)		
21	<pre> 0 0 1.396 0.0213 0.1206 1.396 0.04264 0.2411 1.395 0.08541 0.4816 1.394 0.1714 0.9609 1.392 0.345 1.912 1.388 75.15 6.758 -1.176 78 -1.37 -1.289 79.11 -5.622 -1.344 79.58 -7.796 -1.37 80 -10 -1.396 </pre> Фрагмент текстового файла MATRSPR1 с координатами сопряженных парабол		
22	Конец программы		

Необходимо учитывать, что основное назначение разработанной системы автоматизированного расчета сопряженных парабол состоит в том, чтобы при проектировании профилей и решеток турбин объект проектирования обладал всеми геометрическими характеристиками, которые были заложены в исходных данных. Часть исходных данных, как это уже отмечалось, является результатами термодинамического и газодинамического расчетов турбинной ступени (комплекса сопловой и рабочей решеток), а часть практическими рекомендациями, являющимися отражением огромного накопленного опыта построения профилей и решеток научными организациями и предприятиями.

Таким образом, автоматизированная система должна однозначно обеспечить получение необходимой совокупности геометрических параметров и возможность оперативного проведения многовариантных расчетов и построений. Это объясняется тем, что окончательный ответ, удовлетворяет ли данная решетка турбинных профилей требованиям по геометрии и эффективным показателям, заложенным при проектировании или нет, дает только трудоемкий и дорогостоящий натурный эксперимент — опытные продувки решеток на экспериментальных стендах. В лучшем случае расчетный эксперимент, проводимый с использованием САПР, может только уберечь разработчика от серьезных ошибок при проектировании и дать возможность для проведения натурального эксперимента выбрать наиболее рациональные решения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жирицкий Г.С., Локай В.И., Максutowa М.К., Струнkin В.А. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1971.
- [2] Виноградов Л.В. Система автоматизированного проектирования параболического контура // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования» — 2004. — № 1(8). — С. 43—47.

A TURBO BLADE PROFILE OF TWO CONJUGATE PARABLES

L.V. Vinogradov

The Department of Combined ICE
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

An article presents a new method for calculating the coordinates of a turbo blade profile based of conjugate paraboles/