

## ПРЯМАЯ РЕШЕТКА ТУРБИННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Л.В. Виноградов

Кафедра теплотехники и тепловых двигателей

Инженерный факультет

Российский университет дружбы народов

Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

В работе представлены программы для построения прямой решетки турбинных профилей со спинкой в виде параболы и корытца в виде окружности.

**Ключевые слова:** турбина, лопатка турбины, плоский поток, конформное отображение.

При проектировании турбин после газодинамического расчета ступени проектируется проточная часть — сопловой аппарат и рабочая решетка.

Существует ряд методов построения турбинных лопаток. В настоящей работе представлен вариант метода парабол [1. С. 607], реализованный в интегрированной среде Mathcad. В указанной среде разработан пакет прикладных программ построения сопловой решетки профилей, у которых спинка оформлена в виде одной параболы, а корытце — в виде дуги окружности одного радиуса.

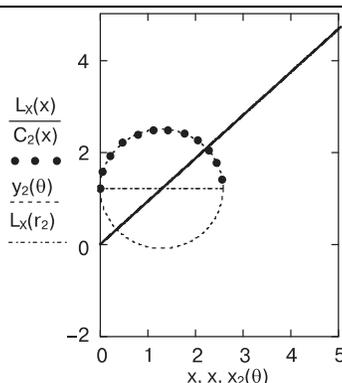
Программа построения прямой решетки ID\_LCPTB1.mcd представлена ниже. Исходными (входными) параметрами прямой решетки являются:  $\gamma$  — угол установки профиля в решетке;  $b$  — ширина решетки;  $r_1$  — радиус скругления входной кромки профиля;  $r_2$  — радиус скругления выходной кромки профиля;  $\gamma_{\text{вых}}$  — угол заострения выходной кромки;  $\alpha_1$  — угол выхода потока из решетки.

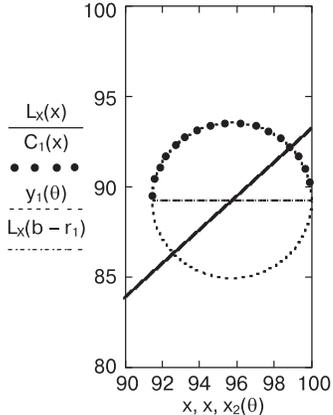
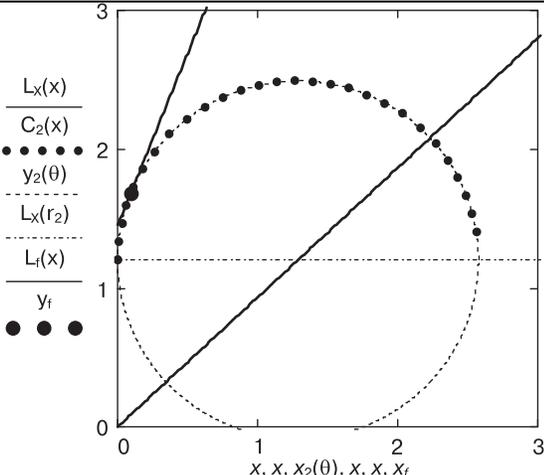
При проектировании профиля турбинной лопатки использованы два программных модуля, разработанных ранее и применяемых в других САПР: Pr\_Spr\_W+Rсопряжение.mcd — подпрограмма расчета параметров сопряжения окружности и точки с заданными геометрическими характеристиками; Pr\_PARMED RADIAL\_CASCADE.mcd — подпрограмма построения параболы.

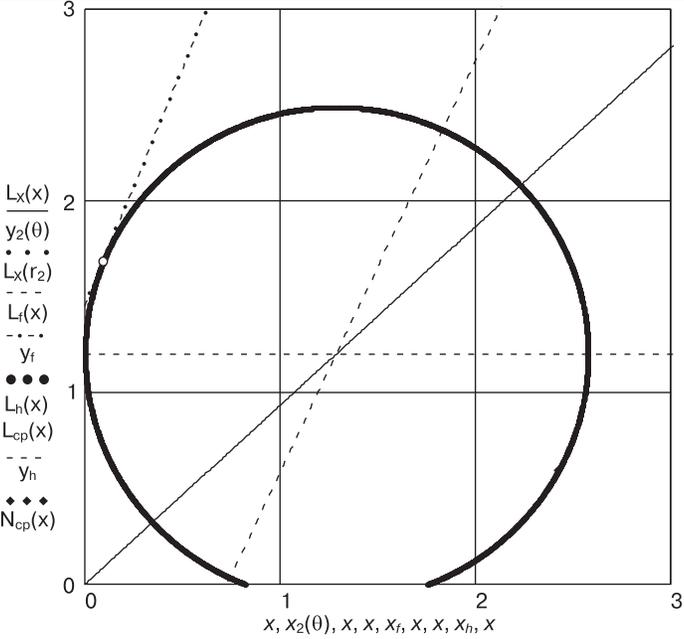
### ПРОГРАММА

построения турбинного профиля с параболической спинкой  
и корытцем в виде дуги окружности одного радиуса ID\_LCPTB1.mcd

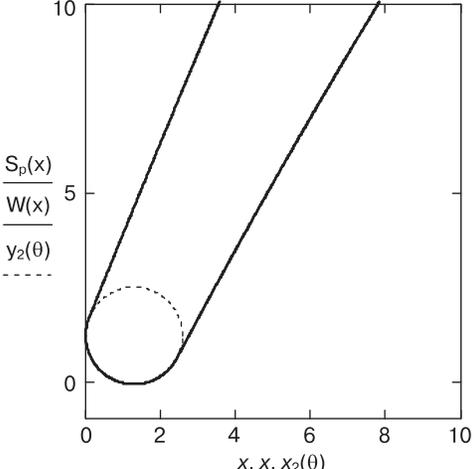
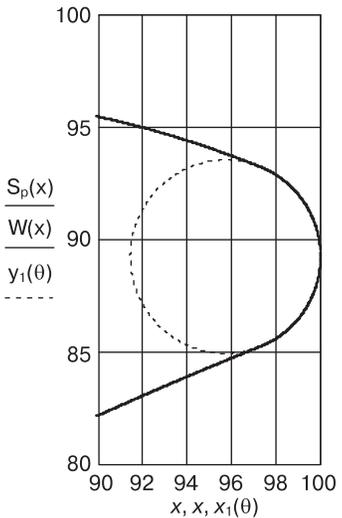
№ п/п	Наименование переменной	Формула, значение
1	Угол установки профиля в прямой решетке	$\gamma := 47 \cdot \frac{\pi}{180}$
2	Ширина прямой решетки	$b := 100$
3	Радиус скругления входной (правой) кромки профиля	$r_1 := 0.0314 \cdot \frac{b}{\sin(\gamma)}$ $r_1 = 4.293$
4	Радиус скругления выходной (левой) кромки профиля	$r_2 := 0.009425 \cdot \frac{b}{\sin(\gamma)}$ $r_2 = 1.289$

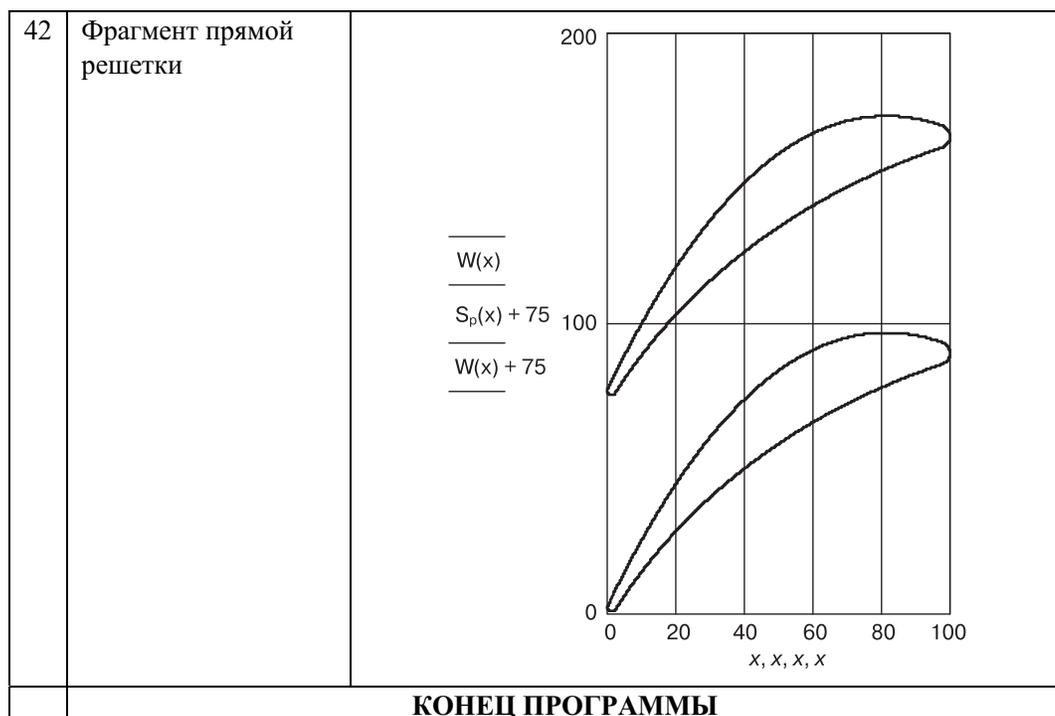
5	Уравнение хорды профиля	$L_X(x) := \cot(\gamma) \cdot x$
6	Определение абсциссы центра окружности выходной кромки профиля	$x_{02} := r_2 \quad x_{02} = 1.289$
7	Уравнение окружности выходной кромки профиля в прямоугольных координатах	$C_2(x) := \sqrt{r_2^2 - (x - r_2)^2} + L_X(r_2)$
8	Уравнение окружности выходной кромки профиля в параметрическом виде	$x_2(\theta) := r_2 \cdot \cos(\theta) + r_2$ $y_2(\theta) := r_2 \cdot \sin(\theta) + L_X(r_2)$
9	Хорда профиля и окружность выходной кромки	
	Построение выходной (правой) кромки профиля	
	Определение абсциссы и ординаты центра окружности входной кромки профиля	$x_{01} := (b - r_1) \quad x_{01} := 95.707$ $y_{01} := L_X(b - r_1) \quad y_{01} := 89.248$
11	Уравнения входной кромки в параметрическом виде и прямоугольных координатах	$x_1(\theta) := r_1 \cdot \cos(\theta) + (b - r_1)$ $y_1(\theta) := r_1 \cdot \sin(\theta) + L_X(b - r_1)$ $C_1(x) := \sqrt{r_1^2 - [x - (b - r_1)]^2} + L_X(b - r_1)$
11	Уравнения входной кромки в параметрическом виде и прямоугольных координатах	$x_1(\theta) := r_1 \cdot \cos(\theta) + (b - r_1)$ $y_1(\theta) := r_1 \cdot \sin(\theta) + L_X(b - r_1)$ $C_1(x) := \sqrt{r_1^2 - [x - (b - r_1)]^2} + L_X(b - r_1)$
12	Угол заострения выходной кромки	$\gamma_{vux} := 6 \cdot \frac{\pi}{180}$
13	Угол выхода потока из решетки	$\alpha_1 := 25 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha_1 := 0.436$

14	Входная (правая) кромка профиля и хорда	
15	Полярный угол точки $f$ сопряжения спинки профиля и выходной кромки	$\theta_f := \pi - \alpha_1 + \frac{\gamma_{vux}}{2}$
16	Координаты точки $f$	$x_f := x_2(\theta_f) \quad x_f := 0.094$ $y_f := y_2(\theta_f) \quad y_f := 1.684$
17	Угол наклона касательной в точке $f$	$\alpha_f := \frac{\pi}{2} - \left( \alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} \right) \quad \alpha_f \cdot \frac{180}{\pi} = 68$
18	Уравнение касательной в точке $f$	$L_f(x) := \tan(\alpha_f) \cdot (x - x_f) + y_f$
19	Область выходной кромки	
20	Полярный угол точке $h$	$\theta_h := 2 \cdot \pi - \alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2} \quad \theta_h \cdot \frac{180}{\pi} = 332$
21	Угол наклона касательной в точке $h$	$\alpha_h := \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \frac{\gamma_{vux}}{2}$
22	Координаты точке $h$	$x_h := x_2(\theta_h) \quad x_h = 2.427$ $y_h := y_2(\theta_h) \quad y_h = 0.597$
23	Уравнение касательной в точке $h$	$L_h(x) := \tan(\alpha_h) \cdot (x - x_h) + y_h$

24	Уравнение средней линии на выходе профиля	$L_{cp}(x) := \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot (x - r_2) + L_X(r_2)$
25	Область выходной кромки в прямой решетке	
26	Подключение библиотечной подпрограммы	<p>Reference: C:\Pp_Spr_W+Rсопряжение.mcd</p>
27	Матрица параметров сопряжения выходной и входной кромок радиусом	$M_{spr} := Pp\_W\_Okp\_P(x_{01}, y_{01}, r_1, x_h, y_h, \alpha_h)$ $(R_{spr} \alpha_{2s} \theta_{2s} x_{2s} y_{2s} x_{02s} y_{02s})$ $M_{spr} = (183.652 \quad -1.196 \quad -1.196 \quad 97.28 \quad 85.253)$
28	Уравнение окружности корытца	$C_w(x) := \sqrt{(M_{spr_{0,0}})^2 - (x - M_{spr_{0,5}})^2} + M_{spr_{0,6}}$
29	Угол наклона касательной в точке сопряжения на входной кромке (нижняя полуокружность)	$\alpha_w := \alpha_{2s} + \frac{\pi}{2}$
30	Уравнение касательной в точке сопряжения корытца с входной кромкой	$L_{2w}(x) := \tan(\alpha_w) \cdot (x - x_{2s}) + y_{2s}$
31	Угол наклона касательной к входной кромке в точке сопряжения (верхняя полуокружность)	$\alpha_s := -\alpha_w \quad \alpha_s \cdot \frac{180}{\pi} = -21.498$

32	Уравнение касательной на входной кромке в точке сопряжения спинки с входной кромкой	$L_s(x) := \tan(\alpha_s) \cdot (x - x_{2s}) + C_1(x_{2s})$																																																																				
33	Область входной кромки	<p> <math>L_x(x)</math>  <math>L_x(r_2)</math>  <math>y_1(\theta)</math>  <math>C_w(x)</math>  <math>y_{2s}</math>  <math>L_{2w}(x)</math>  <math>L_s(x)</math> </p> <p style="text-align: center;"><math>x, x, x_1(\theta), x, x, x_{2s}, x, x</math></p>																																																																				
34	Подключение библиотечной подпрограммы	<i>Reference: \Pp_PARMED RADIAL_CASCADE.mcd</i>																																																																				
35	Фрагмент матрицы параметров параболы	$CDRD(N, x_A, y_A, \epsilon_A, x_C, y_C, \epsilon_C)$ $M_L := CDRD(10, x_f, y_f, \alpha_f, x_{2s}, C_1(x_{2s}), \alpha_s)$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0.094</td> <td>1.684</td> <td>1.187</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.182</td> <td>1.903</td> <td>1.186</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.271</td> <td>2.122</td> <td>1.186</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.447</td> <td>2.558</td> <td>1.185</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.801</td> <td>3.427</td> <td>1.183</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1.51</td> <td>5.153</td> <td>1.179</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>2.929</td> <td>8.556</td> <td>1.172</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>5.777</td> <td>15.169</td> <td>1.156</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>11.512</td> <td>27.618</td> <td>1.121</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>23.139</td> <td>49.411</td> <td>1.034</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>47.018</td> <td>80.58</td> <td>0.756</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>71.732</td> <td>95.19</td> <td>0.247</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>84.402</td> <td>96.286</td> <td>-0.076</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>90.815</td> <td>95.282</td> <td>-0.232</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>94.041</td> <td>94.392</td> <td>-0.306</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>95.659</td> <td>93.849</td> <td>...</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><math>M_L =</math></p>		0	1	2	0	0.094	1.684	1.187	1	0.182	1.903	1.186	2	0.271	2.122	1.186	3	0.447	2.558	1.185	4	0.801	3.427	1.183	5	1.51	5.153	1.179	6	2.929	8.556	1.172	7	5.777	15.169	1.156	8	11.512	27.618	1.121	9	23.139	49.411	1.034	10	47.018	80.58	0.756	11	71.732	95.19	0.247	12	84.402	96.286	-0.076	13	90.815	95.282	-0.232	14	94.041	94.392	-0.306	15	95.659	93.849	...
	0	1	2																																																																			
0	0.094	1.684	1.187																																																																			
1	0.182	1.903	1.186																																																																			
2	0.271	2.122	1.186																																																																			
3	0.447	2.558	1.185																																																																			
4	0.801	3.427	1.183																																																																			
5	1.51	5.153	1.179																																																																			
6	2.929	8.556	1.172																																																																			
7	5.777	15.169	1.156																																																																			
8	11.512	27.618	1.121																																																																			
9	23.139	49.411	1.034																																																																			
10	47.018	80.58	0.756																																																																			
11	71.732	95.19	0.247																																																																			
12	84.402	96.286	-0.076																																																																			
13	90.815	95.282	-0.232																																																																			
14	94.041	94.392	-0.306																																																																			
15	95.659	93.849	...																																																																			

36	Формирование векторов координат точек параболы	$X := M_L^{(0)} \quad Y_1 := M_L^{(1)}$
37	Интерполяция параметров спинки кубическим сплайном	$\underline{S}(x) := \text{interp}(\text{lspline}(X, Y_1), X, Y_1, x)$
38	Уравнение спинки профиля лопатки	$S_p(x) := \begin{cases} C_2(x) & \text{if } 0 \leq x < x_f \\ S(x) & \text{if } x_f \leq x < x_{2s} \\ C_1(x) & \text{if } x_{2s} \leq x \leq b \end{cases}$
39	Уравнение корытца профиля лопатки	$\underline{W}(x) := \begin{cases} -\sqrt{r_2^2 - (x - r_2)^2} + L_X(r_2) & \text{if } 0 \leq x < x_h \\ C_w(x) & \text{if } x_h \leq x < x_{2s} \\ -\sqrt{r_1^2 - [x - (b - r_1)]^2} + L_X(b - r_1) & \text{if } x_{2s} \leq x \leq b \end{cases}$
40	Область выходной кромки	 <p>The graph shows the exit edge region. The vertical axis is labeled with <math>\frac{S_p(x)}{W(x)}</math> and <math>y_2(\theta)</math> (indicated by a dashed line). The horizontal axis is labeled <math>x, x_2(\theta)</math>. The plot shows a solid parabolic curve opening upwards, with a dashed circle below it. The x-axis ranges from 0 to 10, and the y-axis ranges from 0 to 10.</p>
41	Область входной кромки	 <p>The graph shows the inlet edge region. The vertical axis is labeled with <math>\frac{S_p(x)}{W(x)}</math> and <math>y_1(\theta)</math> (indicated by a dashed line). The horizontal axis is labeled <math>x, x_1(\theta)</math>. The plot shows a solid parabolic curve opening to the right, with a dashed circle below it. The x-axis ranges from 90 to 100, and the y-axis ranges from 80 to 100.</p>



Таким образом, проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

- 1) разработана программа построения профиля с параболической спинкой и корытцем, имеющим обводы в виде дуги окружности одного радиуса;
- 2) программа позволяет построить прямую решетку профилей;
- 3) приведенные в программе числовые данные могут быть использованы для тестирования программы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Жирицкий Г.С. и др.* Газовые турбины авиационных двигателей. — М.: Государственное научно-техническое издательство ОБОРОНГИЗ, 1963.

## LINE CASCADE OF TURBINE PROFILES

**L.V. Vinogradov**

Department of heating engineers and heat engines  
Faculty of Engineering  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Podolskoe shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093*

An article presents a new method for designing the Line Cascade of turbine profiles.

**Key words:** turbine, turbine blade, flat flow, conformal mapping.