

1. Исходные данные

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные

Наименование параметра	Значение
Подача Q , м ³ /ч	650
Напор H , м	92
Давление на входе в насос P , МПа	0,03
Температура натрия на входе в насос T , °C	450
Плотность натрия при данной температуре 450 °C ρ , кг/м ³	844
Давление насыщенных паров натрия $P_{нп}$, Па	164,4

2. Определим располагаемый кавитационный запас:

Располагаемый кавитационный запас определяется по формуле

$$\Delta h_{рас} = \frac{P_c}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} - \frac{P_{нп}}{\rho \cdot g}$$

где: $P_c = P + P_a$ – абсолютное статическое давление на входе в насос, Па

$P_{нп}$ – давление насыщенных паров, Па

v – скорость среды на входе в насос, м/с

$$\frac{P_c}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} - \text{полная удельная энергия потока } (E_{вх}) \text{ на входе в насос.}$$

Т.к. на начальном этапе значение скоростей неизвестно, то опустим это слагаемое, в конечном итоге это допущение только лишь увеличит располагаемый кавитационный запас.

Таким образом:

$$\Delta h_{рас} = \frac{P_c - P_{нп}}{\rho \cdot g} = \frac{0,13 \cdot 10^6 - 164,4}{844 \cdot 9,81} = 15,681 \text{ м}$$

Тогда $\Delta h_{рас} = 15,7$ м. Расчет уточненного значения располагаемого кавитационного запаса будет проведен после расчета геометрии рабочего колеса насоса.

3. Выбор частоты вращения ротора

Расчет выполняется следующим образом.

3.1 Задаемся частотой вращения ротора.

$$n = n_{\sin} \cdot \left(1 - \frac{3}{100}\right) = 3000 \cdot \left(1 - \frac{3}{100}\right) = 2910 \frac{\text{об}}{\text{мин}}, \text{ где } s = 3\% - \text{скольжение.}$$

3.2 Определяем коэффициент быстроходности.

$$n_s = \frac{3,65 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}} = \frac{3,65 \cdot 2910 \cdot \sqrt{0,181/2}}{92^{0,75}} = 107$$

Тип рабочего колеса - центробежное тихоходное.

3.3 Определяем кавитационный коэффициент быстроходности.

Кавитационный коэффициент быстроходности определяем по рис. 3.1 [1, стр.35].

$$C_{кр} = 772$$

3.4 Определяем критический кавитационный запас.

$$\Delta h_{кр} = 10 \cdot \left[\frac{n \cdot \sqrt{Q}}{C_{кр}} \right]^{\frac{4}{3}} = 10 \cdot \left[\frac{3000 \cdot \sqrt{0,181/2}}{772} \right]^{\frac{4}{3}} = 11,8 \text{ м}$$

3.5 Определяем критический кавитационный запас.

$$\Delta h_{доп} = 1,2 \cdot h_{кр} = 14,2 \text{ м}$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчетов

Наименование параметра	Значение		
Частота вращения ротора синхронная $n_{\text{син}}$, об/мин	3000	1500	1000
Частота вращения ротора n , об/мин	2910	1455	970
Коэффициент быстроходности n_s	107	54	36
Кавитационный коэффициент быстроходности $C_{кр}$	772	686	657
Располагаемый кавитационный запас $\Delta h_{рас}$, м	15,7	15,7	15,7
Критический кавитационный запас $\Delta h_{кр}$, м	11,8	5,5	3,4
Допускаемый кавитационный запас $\Delta h_{доп} = 1,2 \Delta h_{кр}$, м	14,2	6,6	4,1

Кавитация отсутствует при условии $\Delta h_{рас} > \Delta h_{доп}$. Это условие выполняется при частоте вращения ротора 3000, 1500, 1000 об/мин. Для дальнейших расчетов принимаем частоту вращения $n_{\text{син}} = 1500$ об/мин.

4. Определение размеров рабочего колеса с помощью диаграмм

Для выбранного варианта определяются размеры рабочего колеса насоса с помощью диаграмм на рис. 3.3 [1, стр.37]. По диаграмме выбираем коэффициенты в зависимости от коэффициента быстроходности. Согласно данным диаграммы все определяемые параметры являются функцией быстроходности насоса и могут быть рассчитаны по формуле:

$$X = K_x \cdot \frac{\sqrt{H}}{n}$$

где: X – определяемый параметр;

K_x – соответствующий параметру коэффициент на диаграмме;

H – напор насоса;

n – частота вращения ротора насоса.

Тогда

$$D_0 = K_{D_0} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 28 \cdot \frac{\sqrt{92}}{1500} = 184,6 \text{ мм};$$

$$D_1 = K_{D_1} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 26,3 \cdot \frac{\sqrt{92}}{1455} = 173,2 \text{ мм};$$

$$b_1 = K_{b_1} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 6,1 \cdot \frac{\sqrt{92}}{1455} = 40,2 \text{ мм};$$

$$D_2 = K_{D_2} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 84,7 \cdot \frac{\sqrt{92}}{1455} = 558,1 \text{ мм};$$

$$b_2 = K_{b_1} \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} = 2,4 \cdot \frac{\sqrt{92}}{1455} = 15,8 \text{ мм};$$

Полученные результаты приведены в таблице 3

Таблица 3 - Результаты расчетов по диаграммам

Значение коэффициента	$KD_0 = 28$	$KD_1 = 26,3$	$Kb_1 = 6,1$	$KD_2 = 84,7$	$Kb_2 = 2,4$
Размер колеса, мм	$D_0 = 184,6$	$D_1 = 173,2$	$b_1 = 40,2$	$D_2 = 558,1$	$b_2 = 15,8$

5. Расчет мощности приточной части насоса

Мощность проточной части насоса определяется по формуле:

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta} = \frac{844 \cdot 0,181/2 \cdot 92}{102 \cdot 0,669} = 205,5 \text{ кВт}$$

где $\eta \approx 0,669$ – КПД одноступенчатого насоса при $n_s = 54$ и подаче $Q = 181$ л/с, значение определено по графику на рис. 3.2 [1, стр.36].

Снимок экрана из программы Mathcad – расчет габаритов колеса

Исходные данные:

Подача, м ³ /ч	Q ≡ 650
Напор, м	H ≡ 92
Расп. кав. запас, м	ΔH _{рас} ≡ 15.681
Плотность, кг/м ³	ρ ≡ 844

Принимаем:

Количество ступеней	Zst ≡ 1
Количество потоков	Zpot ≡ 2
Скольжение, %	S ≡ 3
Синхронная частота, об/мин	n _{син} ≡ 1500
Козфф. Скр (= 0, при расчете f(ns))	Ckr ≡ 0

Результаты расчета

Частота вращения, об/мин	n = 1455
Кэффициент быстроходности одной ступени и одного потока	ns = 54
КПД проточной части	η = 0.669
Мощность проточной части, кВт	N = 205.4
Кавитационный коэффициент Скр	Ckr = 686
Критический кав. запас, м	ΔH _{кр} = 5.48
Допускаемый кав. запас, м	ΔH _{доп} = 6.6
Отношение	$\frac{\Delta H_{рас}}{\Delta H_{кр}} = 2.9$

Варьируемые параметры

Рекомендуемый диапазон, либо значение

η_г = 0.9
η_{об} = 0.954
η_{дт} = 0.779
/Kvo=0.06 - 0.08/
/Kvm1=0.5 - 1.1/
/Kvm2=0.5 - 1 /
/D1osn_otn=D1/Do=0.8 -1/
/D1prom_otn=D1_pr/D1/
dval_1st = 82 dval_Zst = 82
/консольное ПК dvt = 0/ _dvt_Zst = 102.5
_S1 = 7.34
_S2 = 5.34
_Z2 = 9
/ W1D1/W2 < 1.4 ; для ns<80 до 2.5 /
/ β1= 20-25. δ1=3- 8 гр ; для ns<80 до 15 -18 /
/ Оптим. по опасн. возникн. кавитации β1р~18гр
mo=1-1.2;no=0.3-0.4 рек.принять mo=1.2 no=0.4 /

Принимае

η_г ≡ 0.9
η_{об} ≡ 0.954
η_{дт} ≡ 0.779
Kvo ≡ 0.06
Kvm1 ≡ 0.85
Kvm2 ≡ 1
D1osn_otn ≡ 0.95
D1prom_otn ≡ 1
dvt ≡ 102.5
S1 ≡ 7.34
S2 ≡ 7.34
Z1 ≡ 7 Z2 = 7
Z2otn ≡ 1
β2 ≡ 25
β1 ≡ 24
mo ≡ 1.2 no ≡ 0.4

Результаты расчета

ΔH _{кр} = 5.83	H = 92	$\frac{H}{Zst} = 92$
ΔH _{рас}	Ht = 102.22	
ΔH _{кр} = 2.69		
C _{кр} = 656	η _г = 0.669	
Do = 211.7	N _г = 205.5	
D1 = 201.1	Nmax _г = 246.6	
D1_pr = 201.1	P = 0.287	
b1 = 50.2	D2 = 519	
K1 = 1.25	b2 = 19.4	
Vo = 3.51	K2 = 1.08	
Vm1p = 2.98	Vu2 = 25.35	
Vm1 = 3.73	Vm2p = 2.98	
W1D1 = 9.17	Vm2 = 3.22	
W1oD1 = 15.77	W2 = 7.63	
u1D1 = 15.32	u2 = 39.54	
u1Do = 16.13	α2 = 6.71	
δ1 = 10.32	$\frac{W1D1}{W2} = 1.2$	
β1o = 13.7		
β1p = 11		

Диаграмма Айзенштейн (ns = 30 - 250)

D0ekv = 158.2	D1 = 173.2	D1oc = 0	D0 = 184.6	D2 = 558.1
	dvt = 95.1		b1 = 40.2	b2 = 15.8

6. Расчет размеров рабочего колеса на входе

Приведённый диаметр

$$D_{1np} = 4,25 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{Q}{n} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,25 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{0,181/2}{1445} \right)^{\frac{1}{3}} = 168,253 \text{ мм}$$

Диаметр вала

$$D_e = 10 \cdot \left(\frac{M}{0,2 \cdot 150} \right)^{\frac{1}{3}} = 10 \cdot \left(\frac{1,65 \cdot 10^4}{0,2 \cdot 150} \right)^{\frac{1}{3}} = 82 \text{ мм}$$

Диаметр втулки под рабочим колесом

$$D_{вт} = 1,25 \cdot D_e = 1,25 \cdot 82 = 102,5 \text{ мм}$$

Критический кавитационный запас

$$h_{кр} = 10 \cdot \left(\frac{n \cdot \sqrt{Q}}{C_{кр}} \right)^{4/3} = 10 \cdot \left(\frac{1445 \cdot \sqrt{0,181/2}}{686} \right)^{4/3} = 5,48 \text{ м}$$

Допускаемый кавитационный запас

$$h_{доп} = 1,2 \cdot h_{кр} = 1,2 \cdot 5,48 = 6,6 \text{ м}$$

Принимаем $K v_0 = 0,06$ – коэффициент входной скорости

Скорость на входе

$$v_0 = K v_0 \cdot (Q_m \cdot n^2)^{1/3} = 0,06 \cdot (0,095 \cdot 1445^2)^{1/3} = 3,51 \text{ м/с}$$

Диаметр входа в рабочее колесо

$$D_0 = 1000 \cdot \sqrt{\left(4 \cdot \frac{Q_m}{\pi \cdot v_0} \right) + \left(\frac{D_{эм}}{1000} \right)^2} = 1000 \cdot \sqrt{\left(4 \cdot \frac{0,095}{3,14 \cdot 3,51} \right) + \left(\frac{102,5}{1000} \right)^2} = 211,7 \text{ мм}$$

Принимаем $D_{1осн} = 0,95$

Диаметр расположения входных кромок лопаток

$$D_1 = D_{1осн} \cdot D_0 = 0,95 \cdot 211,7 = 201,1 \text{ мм}$$

Принимаем $K_{v1} = 0,85$

Меридианная скорость на входе

$$V_{m1p} = K_{v1} \cdot v_0 = 0,85 \cdot 4,7 = 2,98 \text{ м/с}$$

Ширина лопасти на входе

$$b_1 = \frac{1000 \cdot Q_m}{\pi D_1 V_{m1p} \cdot 0,001} = \frac{1000 \cdot 0,095}{3,14 \cdot 201,7 \cdot 2,98 \cdot 0,001} = 50,2 \text{ мм}$$

Окружная скорость лопасти на входе

$$u_1 = 0,001 D_1 \pi \frac{n}{60} = 0,001 \cdot 201,1 \cdot 3,14 \cdot \frac{1455}{60} = 15,32 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$$

Принимаем $\beta_1 = 24^\circ$ $Z = 7$

$$S = \left(\frac{1,25 - 1}{1,25} \right) \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \frac{\sin \left(\pi \cdot \frac{\beta_1}{180} \right)}{Z} = \left(\frac{1,25 - 1}{1,25} \right) \cdot 3,14 \cdot 201,09 \cdot \frac{\sin \left(\pi \cdot \frac{24}{180} \right)}{7} = 7,34 \text{ мм}$$

Коэффициент затеснения

$$K_1 = \frac{1}{1 - \frac{Z \cdot S}{\pi D_1 \sin \frac{\pi \beta_1}{180}}} = \frac{1}{1 - \frac{7 \cdot 7,34}{3,14 \cdot 201,1 \sin \frac{3,14 \cdot 24}{180}}} = 1,25$$

Угол потока на входе

$$\beta_{10} = \frac{180}{\pi} \arctg \frac{V_{m1p} \cdot K_1}{u_1} = \frac{180}{3,14} \arctg \frac{2,98 \cdot 1,25}{15,32} = 13,7^\circ$$

Угол атаки

$$\delta_1 = \beta_1 - \frac{180}{\pi} \arctg \frac{V_{m1p} \cdot K_1}{u_1} = 24 - \frac{180}{3,14} \arctg \frac{2,98 \cdot 1,25}{15,32} = 10,32^\circ$$

Меридианная скорость на входе с учетом затеснения

$$V_{m1} = K_{1p} \cdot V_{m1p} = 1,25 \cdot 2,98 = 3,73 \frac{M}{c}$$

Подача на ступень с учетом объемных протечек

$$Q_1 = \frac{Q_{pot}}{n_i} = \frac{0,181/2}{0,954} = 0,095 \frac{M^3}{c}$$

Относительная скорость на входе

$$W_1 = \frac{V_{m1}}{\sin \frac{\pi \beta_1}{180}} = \frac{3,73}{\sin \frac{3,14 \cdot 24}{180}} = 9,17 \frac{M}{c}$$

$$\Delta H_{kr} = m_o \frac{v_0^2}{2g} + n_o \frac{W_1^2}{2g} = 5,83 \text{ м}$$

$$C_{kr} = \frac{n \sqrt{Q_{pot}}}{(0,1 \cdot \Delta H_{kr})^{0,75}} = \frac{1445 \cdot \sqrt{0,181/2}}{(0,1 \cdot 5,83)^{0,75}} = 656$$

Принимаем $K_{vm2} = 1$

Меридианная скорость на выходе

$$V_{m2p} = K_{vm2} \cdot V_{m1p} = 1 \cdot 2,98 = 2,98 \frac{M}{c}$$

Теоретический напор

$$H_m = \frac{H}{\eta_z} = \frac{92}{0,9} = 102,22 \text{ м}$$

7. Расчет размеров рабочего колеса на выходе

Окружая скорость на выходном диаметре (начальное приближение)

$$u_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_m} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 102,22} = 44,8 \frac{M}{c}$$

Диаметр рабочего колеса на выходе (начальное приближение)

$$D_2 = \frac{1000 \cdot 2 \cdot u_2}{\frac{\pi n}{30}} = \frac{1000 \cdot 2 \cdot 44,8}{\frac{3,14 \cdot 1455}{30}} = 587,728 \text{ мм}$$

Принимаем $\beta_2 = 25^\circ$

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot \text{отн}} \cdot \frac{0,6 + 0,6 \cdot \sin \frac{\pi \beta_2}{180}}{1 - \left(\frac{D_1 p r}{D_2} \right)^2} \\
 K_2 &= \frac{1}{1 - \frac{Z \cdot S}{\pi D_2 \sin \frac{\pi \beta_2}{180}}} \\
 u_2 &= \frac{K_2 \cdot V_{m2p}}{2 \operatorname{tg} \frac{\pi \beta_2}{180}} + \sqrt{\left(\frac{K_2 \cdot V_{m2p}}{2 \operatorname{tg} \frac{\pi \beta_2}{180}} \right)^2 + g(1 + P_1) H m} \\
 D_2 &= 1000 \cdot \frac{60 u_2}{\pi n}
 \end{aligned}$$

Диаметр рабочего колеса на выходе

$$D_2 = 519 \text{ мм}$$

Окружная скорость на наружном диаметре

$$u_2 = 39,41 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Коэффициент затеснения

$$K_2 = 1,04$$

Поправка на конечное число лопастей

$$P_1 = 0,3$$

Окружная составляющая абсолютной скорости на выходе

$$V_{u2} = g \cdot \frac{H m}{u_2} = 9,81 \cdot \frac{102,22}{39,4} = 25,43 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Меридианная скорость на выходе с учетом затеснения

$$V_{m2} = K_2 \cdot V_{m2p} = 1 \cdot 2,98 = 3,11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Относительная скорость на выходе

$$W_2 = \frac{V_{m2p}}{\sin \frac{\pi \beta_2}{180}} = \frac{3,11}{\sin \frac{3,14 \cdot 25}{180}} = 7,36 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Коэффициент торможения относительной скорости в колесе

$$K_w = \frac{W_1}{W_2} = \frac{10,41}{7,36} = 1,41$$

Ширина колеса на выходе

$$b_2 = \frac{Q m}{\pi \cdot D_2 \cdot V_{m2p}} = \frac{0,095}{3,14 \cdot 517,3 \cdot 2,98} = 19,5 \text{ мм.}$$

Угол абсолютной скорости на выходе

$$\alpha_2 = \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \frac{V_{m2} p}{V_{u2}} = 6,7^\circ$$

Абсолютная скорость на выходе из колеса

$$V_2 p = \sqrt{V_{u2}^2 + V_{m2}^2} = \sqrt{25,4^2 + 2,98^2} = 25,4 \frac{M}{c}$$

8. Профилирование лопасти рабочего колеса

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛОПАСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

$$R_0 := 0.5-0.2117$$

$$R_1 := 0.5-0.2011 \quad b_1 := 0.0502 \quad \beta_1 := 24 \quad \delta_1 := 0.00734 \quad Q := \frac{650}{3600} \quad \eta_{ob} := 0.954 \quad n := 1455$$

$$R_{vt} := 0.5-0.1025$$

$$R_2 := 0.5-0.519 \quad b_2 := 0.0194 \quad \beta_2 := 25 \quad \delta_2 := 0.00734 \quad Z_1 := 7$$

$$R_{1_kor_lop} := 1-0$$

$$k_Z := 1 \quad Z_2 := k_Z \cdot Z_1$$

($k_Z=1$ - коротких лопаток нет)

$$N := 100 \quad i := 0..N$$

$$b_- = 0.45$$

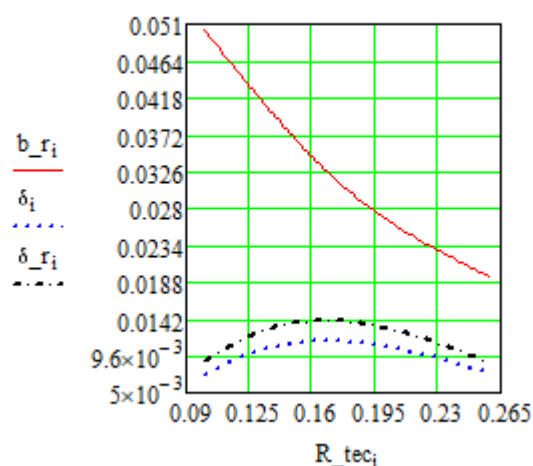
$$Rb_- = 0.465$$

$$\delta_- = 0.62$$

$$R\delta_- = 0.1$$

$$\beta_- = 0.5$$

$$R\beta_- = 0.7$$

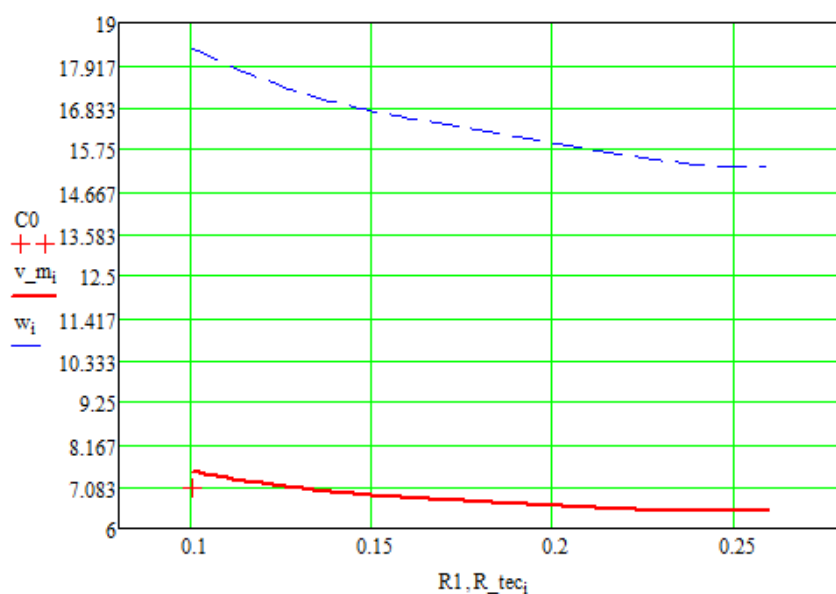
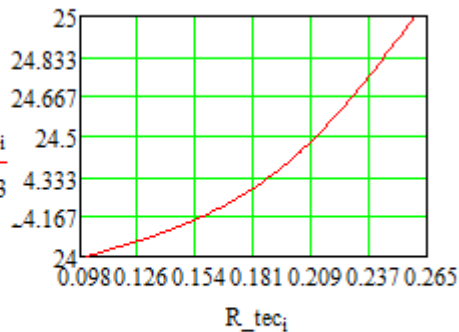


$$\delta_n = 7.34 \times 10^{-3}$$

$$\delta_{nT} = 7.34 \times 10^{-3}$$

$$\min(\delta) = 7.34 \times 10^{-3}$$

$$\max(\delta) = 0.011$$



$$\beta_{1 \text{ pot}} = 25.96$$

$$C_0 = 7.023 \quad u_1 = 15.321$$

$$v_{m_0} = 7.459 \quad \max(v_m) = 7.459$$

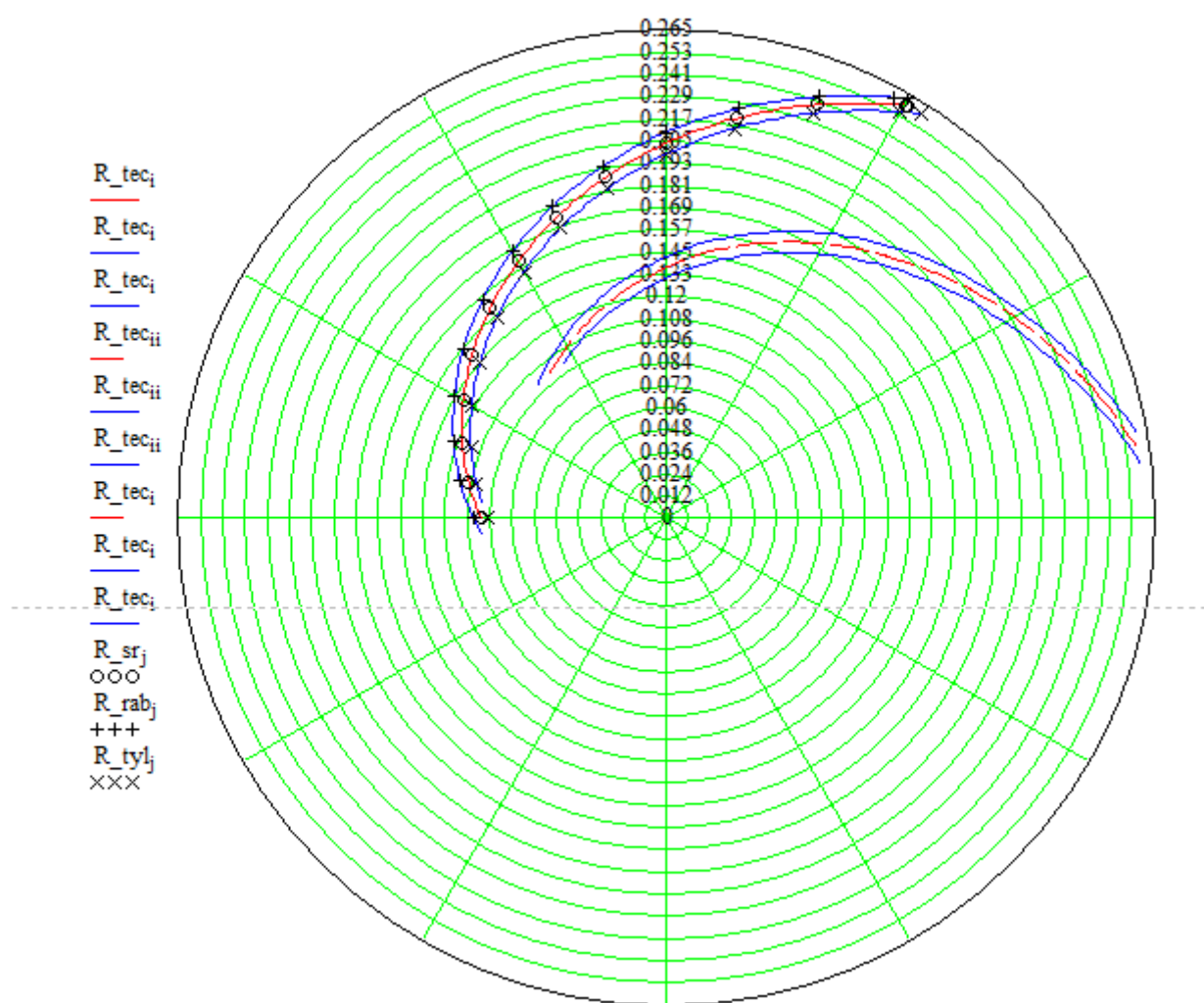
$$v_{m_N} = 6.465 \quad \min(v_m) = 6.434$$

$$\frac{\max(v_m)}{\min(v_m)} = 1.159$$

$$w_0 = 18.339 \quad \max(w) = 18.339$$

$$w_N = 15.298 \quad \min(w) = 15.288$$

$$\frac{\max(w)}{\min(w)} = 1.2$$



$$\theta_{1i}, \theta_{1_rab_i}, \theta_{1_tyl_i}, \theta_{2ii}, \theta_{2_rab_{ii}}, \theta_{2_tyl_{ii}}, \theta_{3i}, \theta_{3_rab_i}, \theta_{3_tyl_i}, \phi_{-j}, \phi_{rab_j}, \phi_{tyl_j}$$

$$R_{sr} := 1000 \cdot R_{sr} \quad R_{rab} := 1000 \cdot R_{rab} \quad R_{tyl} := 1000 \cdot R_{tyl}$$

Êïðàëíàòù áðíáííé êðííëë ìíàñòë

$$\phi_0 = 0 \quad R_{sr_0} = 100.55 \quad 0.5 \cdot 10^3 \cdot \delta_0 = 5$$

Êïðàëíàòù íðíðëëÿ ìíàñòë

Êïðàëíàòù ííëðóáííáí àëñëà

$$\phi_{rab_j} = \quad R_{rab_j} = \quad \phi_{tyl_j} = \quad R_{tyl_j} =$$

0	105.881	0	94.472
10	114.028	10	103.058
20	122.856	20	111.884
30	132.425	30	121.45
40	142.803	40	131.824
50	154.063	50	143.08
60	166.288	60	155.3
70	179.567	70	168.573
80	194.001	80	183
90	209.7	90	198.692
100	226.789	100	215.772
110	245.406	110	234.379
117.03	259.5	122.26	259.5

$$R_{sr_j} = \quad (1000b_{r_})_j =$$

100.55	50.2
108.685	47.653
117.501	44.921
127.059	42.027
137.426	39.012
148.676	35.943
160.891	32.923
174.16	30.086
188.584	27.5
204.273	25.174
221.352	23.091
239.958	21.188
259.5	19.4