

Список сокращений и условных обозначений

Примечание: при выполнении пользоваться В.С. Бекнев, А.Ф. Куфтов, Р.З. Тумашев "Расчет и проектирование центробежных компрессоров", методические указания, 1996

- К - компрессор
- ОК - осевой компрессор
- ЦБК - центробежный компрессор
- НА - направляющий аппарат
- ВУ - входное устройство
- ЗУ - заборное устройство
- Л - лопатка
- ЛТ - линия тока
- М - Мах
- Т - тело
- РК - рабочее колесо
- КПД - коэффициент полезного действия
- ГДФ - газодинамическая функция
- З-н - закон
- Раб - рабочий
- Ср. - средний
- СЛ - средняя линия
- Относ. - относительный
- Ном. - номинальный
- Абс. - абсолютный
- Коэф. - коэффициент
- Св-во - свойство
- Ур-е - уравнение
- Ф-я - функция

Исходные данные

Общий адрес вывода вайлов:      Address = "D:\Учеба\ЛМ (Лопаточные машины)\ЛМ Ч1 К\ЛМ Ч1 К ЦБК\"

Рабочее тело:      воздух

Показатель адиабаты:      k = 1.4

Газовая постоянная рабочего тела (Дж/ кг/К):      R<sub>T</sub> = 287.4

Теплоемкость рабочго тела (Дж/кг/К):      Cp = 1006

Полная температура (К) и давление (Па) на входе:      T\*<sub>н</sub> = 298      P\*<sub>н</sub> = 101300

Массовый расход (кг/с):      G = 4

Степень повышения давления в РК:      π\*<sub>РК</sub> = 4.5

Изоэнтропический КПДРК:      η\*<sub>РК</sub> = 0.872

Температура среды (К):      T<sub>окр.ср.</sub> = 273.15 + 5 = 278.15

Коэф. трения диска РК:      α<sub>f</sub> = 0.04

Угол наклона ЛТ в ср. сечении при входе в РК:      γ<sub>ср1</sub> = 5°

Теплообменом с окружающей средой пренебречь:      Q<sub>вн</sub> = 0

Угол Л:      β<sub>Л2</sub> = 70°

Угол потока перед РК:      α<sub>1</sub> = 65°

Относительный диаметр втулки на входе в РК:      d̄ = 0.45

Относительный диаметр периферии на входе в РК:      D̄ = 0.5

Сторонность РК:      side = 1      (side = 1) ∨ (side = 2) = 1

Степень дискритизации:      N<sub>dis</sub> = 100

ГДФ температуры:
$$\tau_T(\lambda) = 1 - \lambda^2 \cdot \frac{k-1}{k+1}$$

ГДФ давления:
$$\pi_p(\lambda) = \left(1 - \lambda^2 \cdot \frac{k-1}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

ГДФ плотности:
$$\epsilon_\rho(\lambda) = \left(1 - \lambda^2 \cdot \frac{k-1}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Исходные данные

Подключаемые библиотеки

Газодинамический расчет

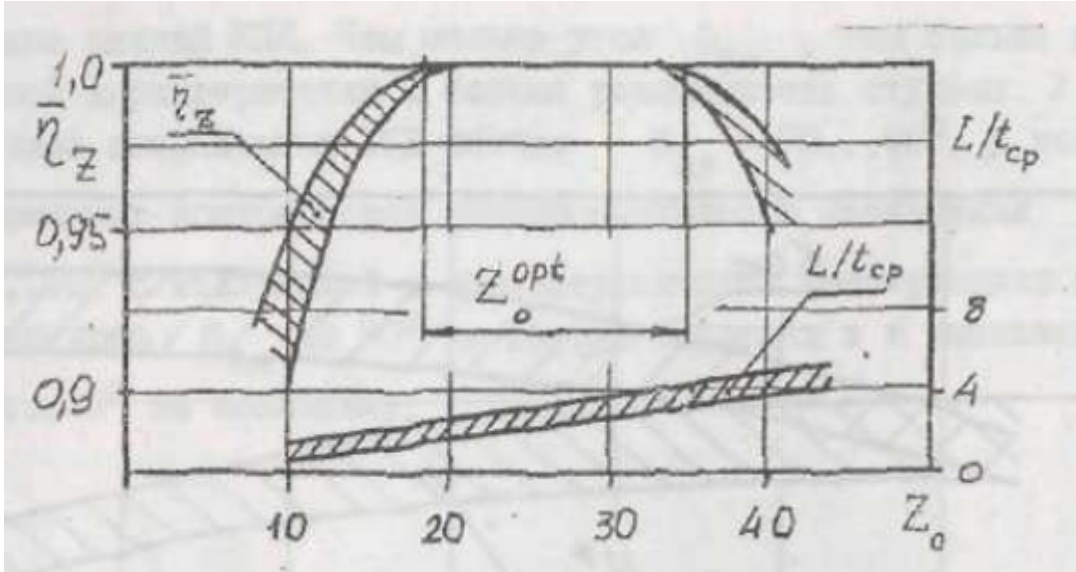


Рисунок 1 - Изменение относ. КПД РК

Число Л:

$$Z_{\text{Л}} = 28$$

Фактическое число Л:

$$Z_{\text{Л.РК}} = Z_{\text{Л}} \cdot \sin(\beta_{\text{Л2}}) = 28 \cdot \sin(70^\circ) = 26.311$$

Целое четное фактическое число Л:

$$Z_{\text{Л.РК}} = 2 \cdot \text{round}(0.5 \cdot Z_{\text{Л.РК}}) = 26$$

Оптимальной диапазон числа Л:

$$16 \leq Z_{\text{Л.РК}} \leq 32 = 1$$

Обобщенный коэф. расхода на выходе из РК:

$$C_{\text{m0.2.отн}} = 0.3$$

Диапазон второго обобщенного коэф. расхода на выходе из РК:

$$0.22 \leq C_{\text{m0.2.отн}} \leq 0.4 = 1$$

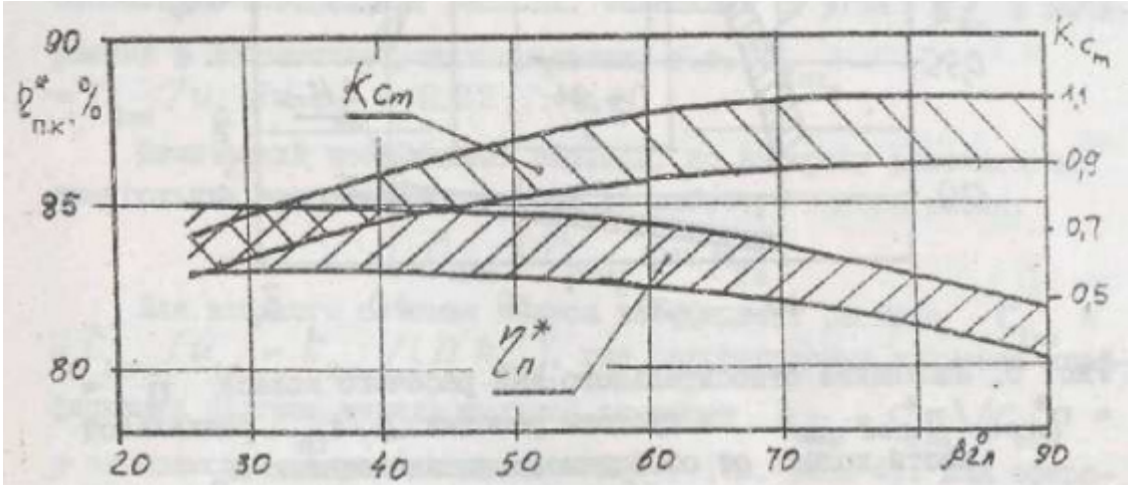


Рисунок 2 - Диаграмма изменения политропического КПД ступени и коэф. разгона меридиональной скорости от угла выхода Л

Коэф. разгона меридиональной скорости для входного сечения:

$$\beta_{\text{Л2}} = 70^\circ$$

$$k_{\text{cm}} = 0.95$$

Физический коэф. расхода на выходе из РК:

$$C_{\text{m2.отн}} = C_{\text{m0.2.отн}} \cdot \sin(\beta_{\text{Л2}}) = 0.3 \cdot \sin(70^\circ) = 0.282$$

Физический коэф. расхода на входе в РК:

$$C_{\text{m1.отн}} = \frac{C_{\text{m2.отн}}}{k_{\text{cm}} \cdot D} = \frac{0.282}{0.95 \cdot 0.5} = 0.593$$

Коэф. скольжения:

$$\sigma_{\nu} = 1 - \frac{\sqrt{\sin(\beta_{\text{Л2}})}}{Z_{\text{Л.РК}}^{0.7}} = 1 - \frac{\sqrt{\sin(70^\circ)}}{26^{0.7}} = 0.901$$

Коэф. уменьшения подведенной работы за счет конечного числа Л и реактивности Л:

$$\mu_{\infty} = \frac{\sigma_{\nu} - C_{m0.2.отн} \cdot \cos(\beta_{Л2})}{1 - C_{m0.2.отн} \cdot \cos(\beta_{Л2})} = \frac{0.901 - 0.3 \cdot \cos(70^{\circ})}{1 - 0.3 \cdot \cos(70^{\circ})} = 0.89$$

$$\text{Ср. относ. диаметр на входе в РК:} \quad \overline{r}_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1 + \overline{d}^2}{2}} = 0.775$$

Кэф. эффективного напора:

$$H_{\text{к.отн}} = \mu_{\infty} + \alpha_{\text{f}} - \mu_{\infty} \cdot C_{\text{m}2.\text{отн}} \cdot \cot(\beta_{Л2}) - C_{\text{m}2.\text{отн}} \cdot \overline{D} \cdot \overline{r}_{\text{ср}} \cdot \frac{\cot(\alpha_1)}{k_{\text{см}}} = 0.785$$

Адиабатический КПД ступени:

$$\eta_{\text{РК}}^* = \frac{\pi_{\text{РК}}^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\pi_{\text{РК}}^{*\frac{k-1}{k \cdot \eta_{\text{РК}}^*}} - 1} = 0.843$$

Адиабатический (изоэнтропический) напор (Дж/кг):

$$H_{\text{ад.рк}}^* = C_p \cdot T_{\text{н}}^* \cdot \left( \pi_{\text{РК}}^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = 160.942 \times 10^3$$

$$\text{Эффективный напор (Дж/кг):} \quad H_{\text{к}} = \frac{H_{\text{ад.рк}}^*}{\eta_{\text{РК}}^*} = 190.941 \times 10^3$$

$$\text{Адиабатическая (изоэнтрапическая) работа (Дж/кг):} \quad \overline{H} = H_{\text{к.отн}} \cdot \eta_{\text{РК}}^* = 0.661$$

$$\text{Окружная скорость раб. Т на выходе из РК (м/с):} \quad u_2 = \sqrt{\frac{H_{\text{ад.рк}}^*}{\overline{H}}} = \sqrt{\frac{160941.894}{0.661}} = 493.298$$

$$\text{Окружная скорость раб. Т на входе в РК (м/с):} \quad u_1 = u_2 \cdot \overline{D} = 493.298 \cdot 0.5 = 246.649$$

Меридиональная составляющая абс. скорости раб. Т на выходе из РК (м/с):

$$c_{\text{m}2} = C_{\text{m}2.\text{отн}} \cdot u_2 = 0.282 \cdot 493.298 = 139.064$$

Меридиональная составляющая абс. скорости раб. Т на входе в РК (м/с):

$$c_{\text{m}1} = C_{\text{m}1.\text{отн}} \cdot u_1 = 0.593 \cdot 246.649 = 146.384$$

Критическая скорость раб. Т на входе (м/с):

$$a_{\text{кр}1} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k + 1} \cdot R_{\text{г}} \cdot T_{\text{н}}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.4}{1.4 + 1} \cdot 287.4 \cdot 298} = 316.1$$

$$\text{Абс. скорость раб. Т на входе в РК (м/с):} \quad c_1 = \frac{c_{\text{m}1}}{\sin(\alpha_1)} = \frac{146.384}{\sin(65^{\circ})} = 161.516$$

$$\text{Приведенная скорость раб. Т на входе в РК:} \quad \lambda_1 = \frac{c_1}{a_{\text{кр}1}} = \frac{161.516}{316.1} = 0.511$$

$$\text{Коэффициент потерь во входном патрубке:} \quad \xi_{\text{ВХ}} = 0.04$$

$$\xi_{\text{на}} = 0.01 + 0.5 \cdot \left( \frac{90 - \frac{\alpha_1}{\text{deg}}}{100} \right)^2 = 0.041$$

$$\xi_{\text{ВУ}} = \xi_{\text{ВХ}} \cdot \left( \frac{c_{\text{m}1}}{c_1} \right)^2 + \xi_{\text{на}} = 0.074$$

$$\text{Кэф. сохранения полного давления ВУ:} \quad \sigma_{\text{ВУ}} = \frac{1}{1 + \xi_{\text{ВУ}} \cdot \frac{k}{k + 1} \cdot \epsilon_{\rho}(\lambda_1) \cdot \lambda_1^2} = 0.99$$

Плотность раб. Т на входе в РК (кг/м³): 
$$\rho^*_1 = \frac{\sigma_{BY} \cdot P^*_H}{R_{\Gamma} \cdot T^*_H} = \frac{0.99 \cdot 101300}{287.4 \cdot 298} = 1.171$$

Коэф. загромождения на входе в РК: 
$$\mu_{BY} = 0.985$$

Диапазон коэф. загромождения на входе в РК: 
$$0.98 \leq \mu_{BY} \leq 0.99 = 1$$

Статическая плотность раб. Т на входе в РК (кг/м³): 
$$\rho_1 = \rho^*_1 \cdot \varepsilon_{\rho}(\lambda_1) = 1.171 \cdot 0.895 = 1.048$$

Давление торможения раб. Т на входе в РК (Па): 
$$P^*_1 = P^*_H \cdot \sigma_{BY} = 101300 \cdot 0.99 = 100287.268$$

Статическое давление раб. Т на входе в РК (Па): 
$$P_1 = P^*_1 \cdot \pi_p(\lambda_1) = 100287.268 \cdot 0.856 = 85826.3$$

Площадь на входе в РК (м²): 
$$F_1 = \frac{G}{c_{m1} \cdot \rho^*_1 \cdot \varepsilon_{\rho}(\lambda_1) \cdot \mu_{BY}} = 0.026$$

▼ Расчет характерных диаметров

Периферийный диаметр на входе в РК: 
$$D_{\Pi 1} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1 \cdot \cos(\gamma_{cp1})}{\pi \cdot (1 - \bar{d}^2)}} = 0.205$$

Втулочный диаметр на входе в РК: 
$$D_{BT1} = D_{\Pi 1} \cdot \bar{d} = 0.092$$

Ср. диаметр на выходе из РК: 
$$D_2 = \frac{D_{\Pi 1}}{\bar{D}} = 0.41$$

▲ Расчет характерных диаметров

Обобщённый коэф. производительности: 
$$\Phi_0 = 4 \cdot \frac{G}{\pi \cdot \rho^*_1 \cdot D_2^2 \cdot u_2 \cdot \sin(\beta_{Л2})} = 0.056$$

Окружная составляющая абс. скорости раб. Т на выходе из РК (м/с):

$$c_{u2} = \mu_{\infty} \cdot (u_2 - c_{m2} \cdot \cot(\beta_{Л2})) = 0.89 \cdot (493.298 - 139.064 \cdot \cot(70.^{\circ})) = 393.804$$

Абс. скорость раб. Т на выходе из РК (м/с):

$$c_2 = \sqrt{c_{u2}^2 + c_{m2}^2} = \sqrt{393.804^2 + 139.064^2} = 417.636$$

Угол потока раб. Т на выходе в абс. движении на выходе из РК: 
$$\alpha_2 = \operatorname{atan}\left(\frac{c_{m2}}{c_{u2}}\right) = 19.45.^{\circ}$$

Температура раб. Т на выходе из РК (К):

$$T^*_2 = T^*_H + \frac{H_K}{C_p} = 298 + \frac{190941.24}{1006} = 487.802$$

Критическая скорость звука на выходе из РК (м/с):

$$a_{кр2} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R_{\Gamma} \cdot T^*_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.4}{1.4+1} \cdot 287.4 \cdot 487.802} = 404.426$$

Приведенная скорость на выходе из РК: 
$$\lambda_2 = \frac{c_2}{a_{кр2}} = \frac{417.636}{404.426} = 1.033$$

Параметры РК на входе

Периферийный радиус РК на входе (м): 
$$r_{\Pi 1} = \frac{D_{\Pi 1}}{2} = \frac{0.205}{2} = 0.103$$

Ср. радиус РК на входе (м):

$$r_{cp1} = \sqrt{r_{\Pi 1}^2 - \frac{F_1 \cdot \cos(\gamma_{cp1})}{2\pi}} = \sqrt{0.103^2 - \frac{0.026 \cdot \cos(5.^{\circ})}{2 \cdot \pi}} = 0.08$$

Втулочный радиус РК на входе (м):

$$r_{BT1} = \sqrt{r_{\Pi 1}^2 - \frac{F_1 \cdot \cos(\gamma_{cp1})}{\pi}} = \sqrt{0.103^2 - \frac{0.026 \cdot \cos(5.^{\circ})}{\pi}} = 0.046$$

Высота Л на входе (м): 
$$b_1 = \frac{r_{п1} - r_{вт1}}{\cos(\gamma_{ср1})} = \frac{0.103 - 0.046}{\cos(5^\circ)} = 0.057$$

Ср. относ. диаметр на входе в РК: 
$$d_{ср.отн} = \frac{r_{ср1}}{r_{п1}} = \frac{0.08}{0.103} = 0.775$$

Частота вращения РК (об/мин): 
$$n = \frac{60u_2}{\pi \cdot D_2} = \frac{60 \cdot 493.298}{\pi \cdot 0.41} = 22954.745$$

Частота вращения РК (рад/с): 
$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 2403.815$$

Ср. окружная скорость потока на входе в РК (м/с):

$$u_{ср1} = \frac{\pi \cdot r_{ср1} \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 0.08 \cdot 22954.745}{30} = 191.252$$

Окружная составляющая абс. скорости потока (м/с):

$$c_{u1} = \sqrt{c_1^2 - c_{m1}^2} = \sqrt{161.516^2 - 146.384^2} = 68.26$$

Окружная составляющая относ. скорости потока (м/с):

$$w_{u1} = u_{ср1} - c_{u1} = 191.252 - 68.26 = 122.992$$

Относ. скорость потока (м/с):

$$w_1 = \sqrt{w_{u1}^2 + c_{m1}^2} = \sqrt{122.992^2 + 146.384^2} = 191.194$$

Угол входа в РК: 
$$\beta_1 = \operatorname{atan}\left(\frac{c_{m1}}{w_{u1}}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{146.384}{122.992}\right) = 49.963^\circ$$

Температура торможения в относ. движении (К):

$$T^*_{w1} = T^*_н + \frac{w_1^2 - c_1^2}{2 \cdot C_p} = 298 + \frac{191.194^2 - 161.516^2}{2 \cdot 1006} = 303.203$$

Критическая скорость звука в относ. движении (м/с):

$$a_{wкр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot R_\Gamma \cdot T^*_{w1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.4}{1.4+1} \cdot 287.4 \cdot 303.203} = 318.848$$

Приведенная скорость в относ. движении: 
$$\lambda_{w1} = \frac{w_1}{a_{wкр}} = \frac{191.194}{318.848} = 0.6$$

Диапазон приведенной скорости в относ. движении: 
$$\lambda_{w1} < 0.85 = 1$$

ГДФ температуры в относ. движении: 
$$\tau_{w1} = \tau_\tau(\lambda_{w1}) = 0.94$$

Статическая температура раб. Т (К): 
$$T_1 = T^*_{w1} \cdot \tau_{w1} = 303.203 \cdot 0.94 = 285.032$$

Параметры РК на выходе

Окружная составляющая относ. скорости раб. Т за РК (м/с):

$$w_{u2} = u_2 - c_{u2} = 493.298 - 393.804 = 99.494$$

Относительная скорость раб. Т за РК(м/с):

$$w_2 = \sqrt{w_{u2}^2 + c_{m2}^2} = \sqrt{99.494^2 + 139.064^2} = 170.991$$

Торможение относ. скорости: 
$$w_{отн2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{170.991}{191.194} = 0.894$$

Диапазон торможения относ. скорости: 
$$w_{отн2} > 0.6 = 1$$

Коэф. отвода теплоты через корпус ступени: 
$$\alpha_q = 0.6$$

Диапазон коэф. отвода теплоты через корпус ступени: 
$$0.2 \leq \alpha_q \leq 0.6 = 1$$

Потери на трение диска (Дж/кг): 
$$\Delta H_f = \alpha_f \cdot u_2^2 = 9.734 \times 10^3$$

Температура раб. Т на выходе из РК (К):

$$T_2 = \left| \begin{array}{l} T_{\text{н}}^* + \frac{w_1^2 - w_2^2 - u_{\text{ср}1}^2 + u_2^2 - c_1^2}{2 \cdot C_p} + \frac{(1 - \alpha_q) \cdot \Delta H_f}{C_p} \\ T_2^* \cdot \tau_T(\lambda_2) \end{array} \right. = 401.104$$

ВОТ ВОПРОС

Температура торможения раб. Т на выходе из РК (К):

$$T_2^* = T_2 + \frac{c_2}{2 \cdot C_p} = 401.104 + \frac{417.636}{2 \cdot 1006} = 401.311$$

$$T_2^* = 487.802$$

Приведенная скорость на выходе из РК:

$$\lambda_2 = \frac{c_2}{a_{\text{кр}2}} = 1.033$$

Давление торможения раб. Т на выходе из РК (Па):

$$P_2^* = P_1^* \cdot \pi_{\text{РК}}^* = 100287.268 \cdot 4.5 = 451292.706$$

Плотность торможения раб. Т на выходе из РК (кг/м³):

$$\rho_2^* = \frac{P_2^*}{R_{\text{г}} \cdot T_2^*} = \frac{451292.706}{287.4 \cdot 401.311} = 3.913$$

Статическое давление раб. Т на выходе из РК (Па):

$$P_2 = P_2^* \cdot \pi_{\text{р}}(\lambda_2) = 451292.706 \cdot 0.504 = 227511.546$$

Плотность раб. Т на выходе из РК (Па):

$$\rho_2 = \rho_2^* \cdot \epsilon_{\rho}(\lambda_2) = 3.913 \cdot 0.613 = 2.399$$

Коэф. загромождения на выходе из РК:

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{\eta_{\text{РК}}^* \cdot \tau_T(\lambda_2)}}{\tau_T(\sqrt{\eta_{\text{РК}}^* \cdot \lambda_2})} = 0.888$$

Высота Л на выходе из РК (м):

$$b_2 = \frac{G}{\pi \cdot \rho_2 \cdot c_{\text{м}2} \cdot D_2 \cdot \mu_2} = 0.01$$

Относ. высота Л на выходе из РК:

$$b_{\text{отн}2} = \frac{b_2}{D_2} = 0.026$$

Профиль РК

Осевая протяженность крыльчатки (м):

$$B_{\text{кр}} = \left[ 0.1 \cdot (1 - \overline{D}) + b_{\text{отн}2} \right] \cdot D_2 = 0.031$$

Коэф. радиуса внутреннего контура проточной части:

$$k_{\text{г}0} = 0.5$$

Диапазон коэф. радиуса внутреннего контура проточной части:

$$0.45 \leq k_{\text{г}0} \leq 0.55 = 1$$

Радиус внутреннего контура проточной части (м):

$$r_0 = k_{\text{г}0} \cdot (D_{\text{п}1} - D_{\text{вт}1}) = 0.056$$

Коэф. отрезка, сопрягаемого с окружностью большего радиуса r<sub>1</sub> в точке А:

$$k_{\text{л}0} = 0.0435$$

Диапазон коэф. отрезка, сопрягаемого с окружностью большего радиуса r<sub>1</sub> в точке А:

$$0.043 \leq k_{\text{л}0} \leq 0.44 = 1$$

Отрезок, сопрягаемый с окружностью большего радиуса r<sub>1</sub> в точке А (м):

$$l_0 = \frac{k_{\text{л}0} \cdot D_2}{\overline{D}} = 0.036$$

$$\gamma_{2\text{п}2} = 10^\circ$$

Вспомогательный отрезок (м):

$$r_{1\text{к}} = 0.58 \cdot D_{\text{п}1} = 0.119$$

Угол Л на выходе ЗУ:

$$\beta_{\text{Л}3\text{У}} = \left| \begin{array}{l} 90^\circ \text{ if } 60^\circ \leq \beta_{\text{Л}2} \leq 90^\circ = 90^\circ \\ 70^\circ \text{ if } 40^\circ \leq \beta_{\text{Л}2} \leq 60^\circ \\ \text{NaN} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Угол атаки:

$$i = 1.5^\circ$$

Диапазон угла атаки:

$$0^\circ \leq i \leq 2^\circ = 1$$

$$\beta_{\text{Л}1} = \beta_1 + i = 51.463^\circ$$



Угол поворота в ЗУ:  $\Delta\beta_{Л.ЗУ} = \beta_{Л.ЗУ} - \beta_{Л1} = 38.537^\circ$

Угол поворота, отнесенный к углу поворота осевой решетки единичной густоты:

$$\Delta\beta_{Л.ЗУ.отн} = \frac{\Delta\beta_{Л.ЗУ}}{0.38 \cdot \beta_{Л.ЗУ}} = 64.562^\circ$$

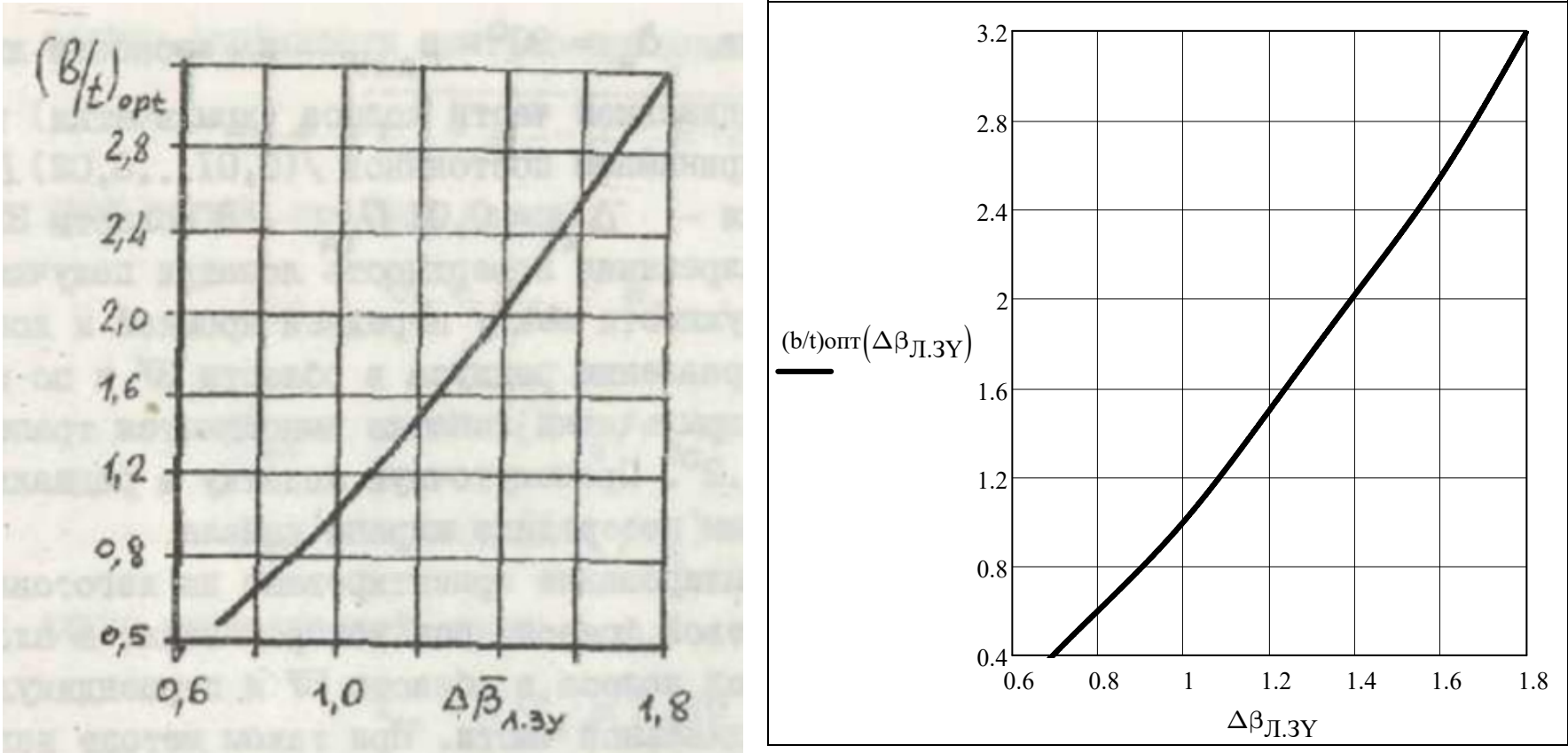


Рисунок 3 - Оптимальная густота решетки ЗУ от относ. угла поворота

Оптимальная густота решетки ЗУ:  $bt_{\text{опт}} = (b/t)_{\text{опт}}(\Delta\beta_{Л.ЗУ.отн}) = 1.309$

Коэф. осевой протяженности ЗУ:  $k_{В.ЗУ} = 1$

Диапазон коэф. осевой протяженности ЗУ:  $0.9 \leq k_{В.ЗУ} \leq 1.1 = 1$

Осевая протяженность ЗУ (м):

$$B_{ЗУ} = k_{В.ЗУ} \cdot bt_{\text{опт}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ср1}}}{Z_{Л.РК}} \cdot \sin\left(\frac{\beta_{Л1} + \beta_{Л.ЗУ}}{2}\right) = 0.048$$

Отношение осевой протяженности ЗУ к относ. диаметру РК на выходе:  $\frac{B_{ЗУ}}{D_2} = 0.116$

Диапазон отношения осевой протяженности ЗУ к относ. диаметру РК на выходе:  $0.15 \leq \frac{B_{ЗУ}}{D_2} \leq 0.35 = 0$

Длина хорды (м):  $b = \frac{B_{ЗУ}}{\sin[0.5(\beta_{Л1} + \beta_{Л.ЗУ})]} = 0.05$

Радиус СЛ профиля (м):  $R_{\text{ср}} = \frac{0.5 \cdot b}{\sin(0.5 \Delta\beta_{Л.ЗУ})} = 0.076$

Радиус изогнутой пластины (Л) (м):

$$R_{\text{Л}} = \begin{cases} 0.25 \cdot \frac{D_2^2 - D_{\text{п1}}^2}{D_2 \cdot \cos(\beta_{Л2})} & \text{if } \beta_{Л2} < 90^\circ = 0.225 \\ \infty & \text{if } \beta_{Л2} = 90^\circ \\ \text{NaN} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Угол установки хорды Л:  $\nu = \frac{\beta_{Л1} + \beta_{Л.ЗУ}}{2} = 70.731^\circ$

Коэф. толщины Л радиальной части РК на периферийном контуре:  $k_{\Delta} = 0.015$

Диапазон коэф. толщины Л радиальной части РК на периферийном контуре:  $0.01 \leq k_{\Delta} \leq 0.02 = 1$

Толщина Л радиальной части колеса на периферийном контуре (м):

$$\Delta_2 = k_{\Delta} \cdot D_2 = 6.156 \times 10^{-3}$$

Толщина входной кромки Л (м):  $\Delta_1 = 0.01 \cdot D_{\text{п1}} = 2.052 \times 10^{-3}$

Размеры проточной части осерадиального РК ЦБК в СИ

Втулочный диаметр РК на входе:  $D_{\text{вТ1}} = 0.092$

Ср. диаметр и радиус РК на выходе:  $D_2 = 0.41$

Периферийный диаметр РК на входе:  $D_{\text{п1}} = 0.205$

Ср. радиус РК на входе:  $r_{\text{ср1}} = 0.08$

Вспомогательный отрезок:  $r_{1\text{к}} = 0.119$

Осевая протяженность крыльчатки:  $B_{\text{кр}} = 0.031$

Осевая протяженность ЗУ:  $B_{\text{ЗУ}} = 0.048$

Высота Л на входе в РК:  $b_1 = 0.057$

Высота Л на выходе из РК:  $b_2 = 0.01$

Отрезок, сопрягаемый с окружностью большего радиуса  $r_1$  в точке А:  $l_0 = 0.036$

Радиус внутреннего контура проточной части:  $r_0 = 0.056$

Радиус СЛ профиля:  $R_{\text{ср}} = 0.076$

Угол поворота в ЗУ:  $\Delta\beta_{\text{Л.ЗУ}} = 38.5^\circ$

Угол Л на входе:  $\beta_{\text{Л1}} = 51.5^\circ$

Толщина Л радиальной части колеса на периферийном контуре:  $\Delta_2 = 6.156 \times 10^{-3}$

Толщина входной кромки Л:  $\Delta_1 = 2.052 \times 10^{-3}$

Длина хорды:  $b = 0.05$

$b_{\text{Д}} = 5 \cdot 10^{-3}$

Диаметр центрального отв. (м):  $d_{\text{О}} = 20 \cdot 10^{-3}$

РК ЦБК

Количество сечений:  $n_{\text{сеч}} = 9$

Дискритизация сечений:  $i_{\text{сеч}} = 1 \dots n_{\text{сеч}}$

Радиусы границ (м):

Толщины границ по периферии (м):

Толщины границ по втулке (м):

$h_{\text{пер}, i_{\text{сеч}}} =$

$h_{\text{вТ}, i_{\text{сеч}}} =$

$0.5d_{\text{О}}$
$0.5D_{\text{вТ1}}$
$0.5D_{\text{вТ1}} + B_{\text{ЗУ}} \cdot \tan(\gamma_{2\text{п2}})$
$0.5\left[0.5 \cdot D_{\text{п1}} + \left(0.5D_{\text{вТ1}} + B_{\text{ЗУ}} \cdot \tan(\gamma_{2\text{п2}})\right)\right]$
$0.5D_{\text{п1}}$
$0.5\left(0.5D_{\text{п1}} + r_{1\text{к}}\right)$
$r_{1\text{к}}$
$0.5D_2 - l_0 \cdot \cos(\gamma_{2\text{п2}})$
$0.5D_2$

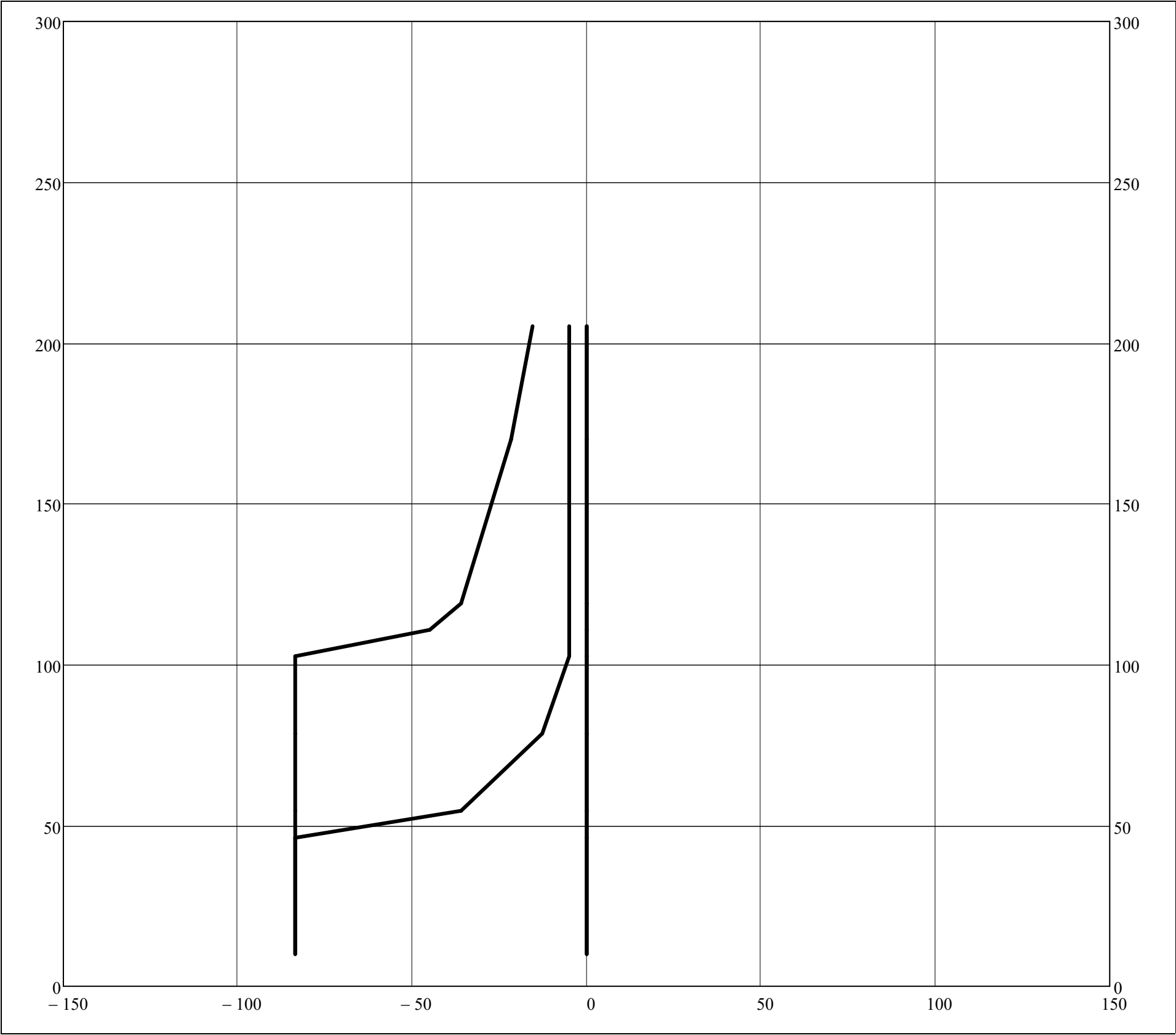
$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$1.25 \cdot (B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}})$
$B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$b_2 + l_0 \cdot \sin(\gamma_{2\text{п2}}) + b_{\text{Д}}$
$b_2 + b_{\text{Д}}$

$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$B_{\text{ЗУ}} + B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$0.25B_{\text{кр}} + b_{\text{Д}}$
$b_{\text{Д}}$
$b_{\text{Д}}$
$b_{\text{Д}}$
$b_{\text{Д}}$
$b_{\text{Д}}$

$h_{\text{ср.пер}}(l) = \text{interp}\left(\text{lspline}\left(r, h_{\text{пер}}\right), r, h_{\text{пер}}, l\right)$

$h_{\text{ср.вТ}}(l) = \text{interp}\left(\text{lspline}\left(r, h_{\text{вТ}}\right), r, h_{\text{вТ}}, l\right)$





▲ РК ЦБК

► Выбор материала Д РК

Напряжения на втулке Д (Па):  $P_0 = 0$

Количество эксцентричных отв.:  $n_{\text{экс.отв}} = 0$

Радиус нахождения эксцентричных отв. (м):  $R_{\text{экс.отв}} = 54 \cdot 10^{-3}$

Диаметр эксцентричных отв. (м):  $d_{\text{отв}} = 12 \cdot 10^{-3}$

Расстояние между краями отверстий по окружности, по которой расположены центры отверстий (м): 
$$b_{\text{отв}} = \begin{cases} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{экс.отв}}}{n_{\text{экс.отв}}} - d_{\text{отв}} \right) & \text{if } n_{\text{экс.отв}} \neq 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases}$$

Температурные деформации:

На втулке:  $\theta_1 = \alpha_T \cdot (T_1 - T_{\text{окр.ср.}}) = 20 \cdot 10^{-6} \cdot (285.032 - 278.15) = 0$

На ободе:  $\theta_2 = \alpha_T \cdot (T_2 - T_{\text{окр.ср.}}) = 20 \cdot 10^{-6} \cdot (401.104 - 278.15) = 0.002$

З-н изменения температурных деформаций по радиусу Д: 
$$\theta(r) = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{(r - 0.5d_o)^2}{(0.5 \cdot D_2 - 0.5d_o)^2}$$

З-н изменения температуры по радиусу Д: 
$$T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \cdot \left( \frac{r - 0.5d_o}{0.5 \cdot D_2 - 0.5d_o} \right)^2$$

З-н изменения физических св-тв Д по его радиусу: Коэф. Пуассона:



$\begin{pmatrix} \sigma_{I_t} & \sigma_{II_t} \\ \sigma_{I_r} & \sigma_{II_r} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} C_2 \\ \sigma_{II_{r,i+1}} = C_1 - \frac{C_2}{(r_{i+1})^2} \\ \sigma_{II_{t,i+1}} = C_1 + \frac{C_2}{(r_{i+1})^2} \end{pmatrix}$	$\left[ (r_i)^2 \cdot (\sigma_{II_{t,i}} - \sigma_{II_{r,i}}) \right]$
--	---	--

Коэф. Мора:

$$k_{\text{Mop}} = \frac{-\sigma_{I_r_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}}{\sigma_{II_r_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} = 0.1534$$

$\begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_t \end{pmatrix}$	<div>for i ∈ 1..n<sub>ceч</sub> - 1</div> <div> <math display="block">\begin{pmatrix} \sigma_{r_{i,i}} = \sigma_{I_{r,i}} + k_{\text{Mop}} \cdot \sigma_{II_{r,i}} \\ \sigma_{r_{i,i+1}} = \sigma_{I_{r,i+1}} + k_{\text{Mop}} \cdot \sigma_{II_{r,i+1}} \\ \sigma_{t_{i,i}} = \sigma_{I_{t,i}} + k_{\text{Mop}} \cdot \sigma_{II_{t,i}} \\ \sigma_{t_{i,i+1}} = \sigma_{I_{t,i+1}} + k_{\text{Mop}} \cdot \sigma_{II_{t,i+1}} \end{pmatrix}</math> </div>	$\begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_t \end{pmatrix}$
--	--	--

$\begin{pmatrix} \sigma_{I_{r.cp}} & \sigma_{II_{r.cp}} & \sigma_{r.cp} \\ \sigma_{I_{t.cp}} & \sigma_{II_{t.cp}} & \sigma_{t.cp} \end{pmatrix}$	<div>for i ∈ 1..n<sub>ceч</sub> - 1</div> <div> <math display="block">\begin{pmatrix} \sigma_{I_{r.cp_i}} = \begin{cases} \sigma_{I_{r,i}} &amp; \text{if } i = 1 \\ 0.5 \cdot (\sigma_{I_{r_{i-1},i}} + \sigma_{I_{r,i}}) &amp; \text{otherwise} \end{cases} \\ \sigma_{I_{t.cp_i}} = \begin{cases} \sigma_{I_{t,i}} &amp; \text{if } i = 1 \\ 0.5 \cdot (\sigma_{I_{t_{i-1},i}} + \sigma_{I_{t,i}}) &amp; \text{otherwise} \end{cases} \\ \sigma_{II_{r.cp_i}} = \begin{cases} \sigma_{II_{r,i}} &amp; \text{if } i = 1 \\ 0.5 \cdot (\sigma_{II_{r_{i-1},i}} + \sigma_{II_{r,i}}) &amp; \text{otherwise} \end{cases} \\ \sigma_{II_{t.cp_i}} = \begin{cases} \sigma_{II_{t,i}} &amp; \text{if } i = 1 \\ 0.5 \cdot (\sigma_{II_{t_{i-1},i}} + \sigma_{II_{t,i}}) &amp; \text{otherwise} \end{cases} \\ \sigma_{r.cp_i} = \begin{cases} \sigma_{r,i} &amp; \text{if } i = 1 \\ 0.5 \cdot (\sigma_{r_{i-1},i} + \sigma_{r,i}) &amp; \text{otherwise} \end{cases} \\ \sigma_{t.cp_i} = \begin{cases} \sigma_{t,i} &amp; \text{if } i = 1 \\ 0.5 \cdot (\sigma_{t_{i-1},i} + \sigma_{t,i}) &amp; \text{otherwise} \end{cases} \end{pmatrix}</math> </div>	$\begin{pmatrix} \sigma_{I_{r.cp_{n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{II_{r.cp_{n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{r.cp_{n_{\text{ceч}}}} \\ \sigma_{I_{t.cp_{n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{II_{t.cp_{n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{t.cp_{n_{\text{ceч}}}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{I_{r_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{II_{r_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{r_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} \\ \sigma_{I_{t_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{II_{t_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} & \sigma_{t_{n_{\text{ceч}}-1, n_{\text{ceч}}}}} \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} \sigma_{I_{r.cp}} & \sigma_{II_{r.cp}} & \sigma_{r.cp} \\ \sigma_{I_{t.cp}} & \sigma_{II_{t.cp}} & \sigma_{t.cp} \end{pmatrix}$	

$\sigma_{\text{ЭKB}} =$	<div>for i ∈ 1..n<sub>ceч</sub></div> <div> <math display="block">\sigma_{\text{ЭKB}_i} = \sqrt{(\sigma_{t.cp_i})^2 - \sigma_{t.cp_i} \cdot \sigma_{r.cp_i} + (\sigma_{r.cp_i})^2}</math> </div>
	$\sigma_{\text{ЭKB}}$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max(\sigma_{t.cp}, \sigma_{r.cp}, \sigma_{\text{эKB}}) \\ \min(\sigma_{t.cp}, \sigma_{t.cp}, \sigma_{\text{эKB}}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 461.4 \times 10^6 \\ -62.2 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{эKB}}(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{\text{эKB}}\big), r, \sigma_{\text{эKB}}, l\big)$$

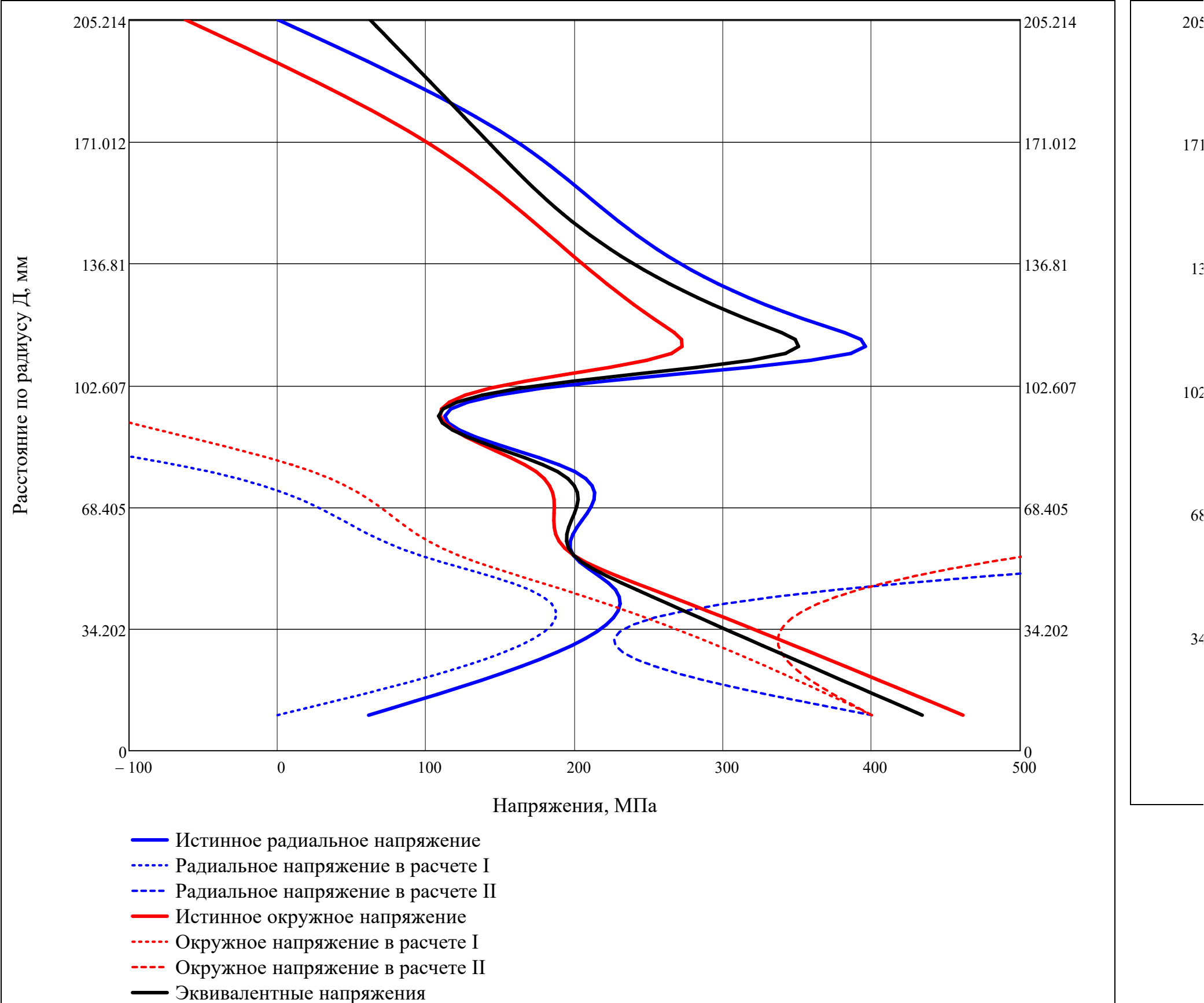
$$\begin{pmatrix} \sigma_{I_t} & \sigma_{I_r} \\ \sigma_{II_t} & \sigma_{II_r} \\ \sigma_t & \sigma_r \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \sigma_{I_t}(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{I_t.cp}\big), r, \sigma_{I_t.cp}, l\big) \\ \sigma_{II_t}(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{II_t.cp}\big), r, \sigma_{II_t.cp}, l\big) \\ \sigma_t(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{t.cp}\big), r, \sigma_{t.cp}, l\big) \\ \sigma_{I_r}(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{I_r.cp}\big), r, \sigma_{I_r.cp}, l\big) \\ \sigma_{II_r}(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{II_r.cp}\big), r, \sigma_{II_r.cp}, l\big) \\ \sigma_r(l) = \text{interp}\big(\text{lspline}\big(r, \sigma_{r.cp}\big), r, \sigma_{r.cp}, l\big) \\ \begin{pmatrix} \sigma_{I_t} & \sigma_{I_r} \\ \sigma_{II_t} & \sigma_{II_r} \\ \sigma_t & \sigma_r \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

▲ Расчет на прочность Д РК

▼ Результаты расчета на прочность

$$l_{\text{w}} = 0.5d_o, 0.5d_o + \frac{0.5 \cdot D_2 - 0.5d_o}{N_{\text{dis}}} .. 0.5 \cdot D_2$$



$$\begin{pmatrix} \sigma_t(R_{\text{экс.отв}}) \\ \sigma_r(R_{\text{экс.отв}}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 202.6 \times 10^6 \\ 200.7 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

Теоретический коэф. концентрации напряжений:

$$k_T = 3 - \frac{d_{\text{отв}}}{b_{\text{отв}}} - \frac{\sigma_r(R_{\text{экс.отв}})}{\sigma_t(R_{\text{экс.отв}})} = 2.0091$$

Местное окружное напряжение  
заниженное на 10..15 % (Па):

$$\sigma_{\text{тм}} = k_T \cdot \sigma_t(R_{\text{экс.отв}}) = 406.95 \times 10^6$$

Действительне местное окр. напряжение (Па):

$$\sigma_{\text{тм}} = \sigma_{\text{тм}} \cdot 1.15 = 467.992 \times 10^6$$

▲ Результаты расчета на прочность

▼ Вывод данных для построения Л РК и НА в формате .xlsx

OUTPUT = 0

$$\text{ПОЧТА} = 10^3 \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ B_{3y} & 0 & 0 \\ B_{3y} + B_{\text{кр}} & 0 & 0 \\ B_{3y} + B_{\text{кр}} & 0.5D_{\text{п1}} & 0 \\ B_{3y} + B_{\text{кр}} & 0.5D_2 & 0 \\ B_{3y} + B_{\text{кр}} - b_2 & 0.5D_2 & 0 \\ B_{3y} + B_{\text{кр}} - b_2 - l_0 \cdot \sin(\gamma_{2\text{п2}}) & 0.5D_2 - l_0 \cdot \cos(\gamma_{2\text{п2}}) & 0 \\ B_{3y} & r_{1\text{к}} & 0 \\ 0 & 0.5D_{\text{п1}} & 0 \\ 0 & r_{\text{ср1}} & 0 \\ 0 & 0.5D_{\text{БТ1}} & 0 \end{pmatrix}$$

ПОЧТА =

	1	2	3
1	0	0	0
2	47.52	0	0
3	78.514	0	0
4	78.514	102.607	0
5	78.514	205.214	0
6	68.041	205.214	0
7	61.841	170.05	0
8	47.52	119.024	0
9	0	102.607	0
10	0	79.562	0
11	0	46.173	0

output2excel =

if OUTPUT = 1

NameOfFile = concat(Adress, "ЦБК.xlsx")

WRITEEXCEL(ПОЧТА, NameOfFile, "A1")

NaN otherwise

ПОЧТА = 10<sup>3</sup>.

0

0.5D<sub>BT1</sub>

0

0

r<sub>cp1</sub>

0

0

0.5D<sub>П1</sub>

0

B<sub>3Y</sub>

0.5D<sub>BT1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

B<sub>3Y</sub>

r<sub>cp1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

B<sub>3Y</sub>

0.5D<sub>П1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

0.5D<sub>BT1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

r<sub>cp1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

0.5D<sub>П1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5·Δ<sub>1</sub>·sin(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5D<sub>BT1</sub>

–0.5·Δ<sub>1</sub>·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5·Δ<sub>1</sub>·sin(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

r<sub>cp1</sub>

–0.5·Δ<sub>1</sub>·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5·Δ<sub>1</sub>·sin(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5D<sub>П1</sub>

–0.5·Δ<sub>1</sub>·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

–0.5·Δ<sub>1</sub>·sin(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5D<sub>BT1</sub>

0.5·Δ<sub>1</sub>·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

–0.5·Δ<sub>1</sub>·sin(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

r<sub>cp1</sub>

0.5·Δ<sub>1</sub>·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

–0.5·Δ<sub>1</sub>·sin(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

0.5D<sub>П1</sub>

0.5·Δ<sub>1</sub>·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>)

B<sub>3Y</sub>

0.5D<sub>BT1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) – 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub>

r<sub>cp1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) – 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub>

0.5D<sub>П1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) – 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub>

0.5D<sub>BT1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) + 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub>

r<sub>cp1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) + 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub>

0.5D<sub>П1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) + 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

0.5D<sub>BT1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) – 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

r<sub>cp1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) – 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

0.5D<sub>П1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) – 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

0.5D<sub>BT1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) + 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

r<sub>cp1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) + 0.5·Δ<sub>2</sub>

B<sub>3Y</sub> + B<sub>кр</sub>

0.5D<sub>П1</sub>

b – b·cos(Δβ<sub>Л.3Y</sub>) + 0.5·Δ<sub>2</sub>

ПОЧТА =

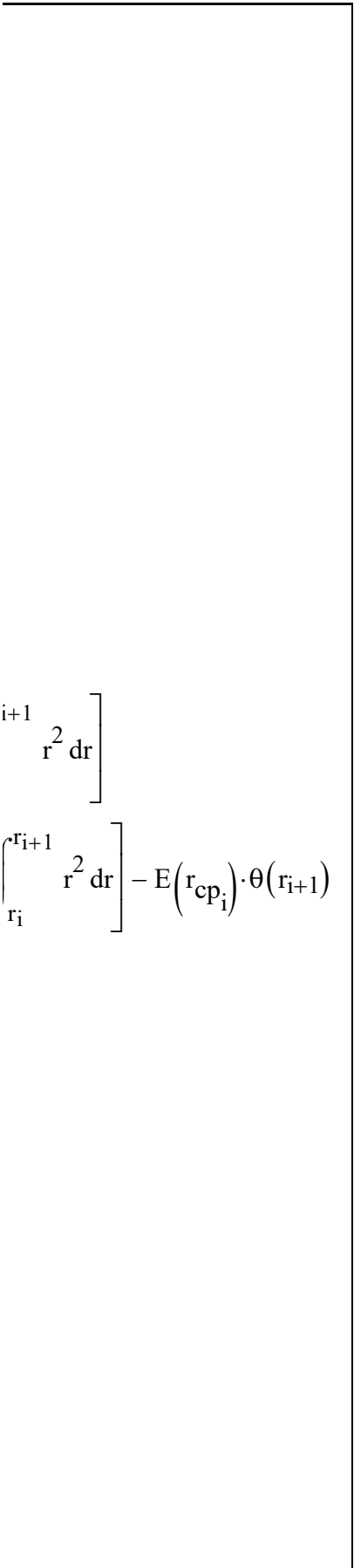
	1	2	3
1	0	46.173	0
2	0	79.562	0
3	0	102.607	0
4	47.52	46.173	10.964
5	47.52	79.562	10.964
6	47.52	102.607	10.964
7	78.514	46.173	10.964
8	78.514	79.562	10.964
9	78.514	102.607	10.964
10	0.639	46.173	-0.803
11	0.639	79.562	-0.803
12	0.639	102.607	-0.803
13	-0.639	46.173	0.803
14	-0.639	79.562	0.803
15	-0.639	102.607	0.803
16	47.52	46.173	7.886
17	47.52	79.562	7.886
18	47.52	102.607	7.886
19	47.52	46.173	14.042
20	47.52	79.562	14.042
21	47.52	102.607	14.042
22	78.514	46.173	7.886
23	78.514	79.562	7.886
24	78.514	102.607	7.886
25	78.514	46.173	14.042
26	78.514	79.562	14.042
27	78.514	102.607	14.042

27	70.517	102.007	17.072
----	--------	---------	--------

output2excel =

if OUTPUT = 1
|
NameOfFile = concat(Adress,"Л ЦБК.xlsx")
|
WRITEEXCEL(ПОЧТА,NameOfFile,"A1")
NaN otherwise





$$\left[ \int_{r_i}^{r_{i+1}} r^2 dr \right] - E(r_{cp_i}) \cdot \theta(r_{i+1})$$

