

Расчет тепловых схем парогазовых установок тепловых электростанций

Издательство: НИЦ ИНФРА-М

Авторы: Кудинов Анатолий Александрович, Зиганшина Светлана Камиловна, Хусаинов Кирилл Русланович

Год издания: 2024

Кол-во страниц: 256

6.1 Двухконтурная ПГУ - стр. 90



2. Химический состав природного газа

(<https://znanium.ru/catalog/document?id=424961>)

$$CH_4 := 98 \% \quad C_2H_6 := 1,5 \% \quad C_3H_8 := 0,5 \% \quad H_2 := 0 \% \quad CO := 0 \% \quad \rho_{T,Г} := 0,678 \frac{кг}{м^3}$$

3. Характеристики каждой ГТУ

$N_{ГТУ_э} := 100 \text{ МВт}$

$G_B := 360 \frac{кг}{с}$

$\theta_d := 530 \text{ }^\circ\text{C}$

$\eta_{ГТУ_э} := 35 \%$

4. Температура и давление наружного воздуха

$T_{нв} := 15 \text{ }^\circ\text{C}$

$p_{нв} := 1 \text{ бар}$

5. Давление в конденсаторе

$p_k := 5 \text{ кПа}$

$t_k := \text{wspTSP}(p_k) = 32,88 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_k := \text{CoolProp_Props}("T"; "P"; p_k; "Q"; 1; "IF97::H2O") = 32,88 \text{ }^\circ\text{C}$

6. Давление перед стопорно-регулирующим клапаном СРК ЦВД (вд) и СРК ЦНД (нд)

$p_{вд_0} := 6,5 \text{ МПа}$

$p_{нд_0} := 0,6 \text{ МПа}$

7. Давление в деаэраторе

$p_d := 0,55 \text{ МПа}$

8. Коэффициент полезного действия генератора

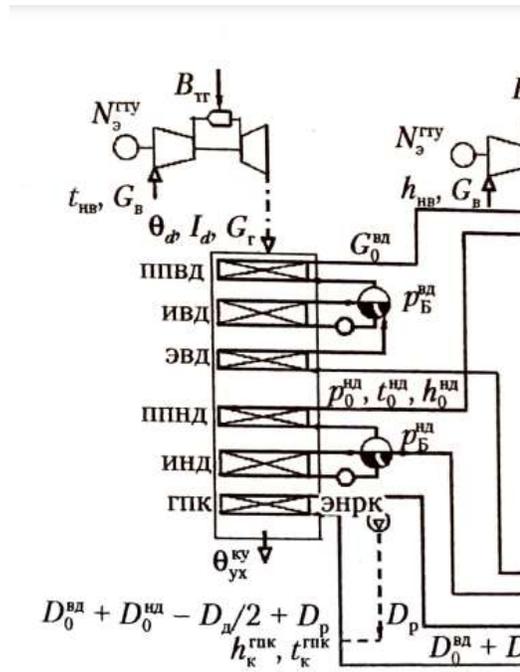
$\eta_{эГ} := 0,98$

$\eta_{мех} := 0,99$

Расчет схемы

Теплофизические характеристики уходящих газов

$$Q_{Н}^P := (35820 \cdot CH_4 + 63746 \cdot C_2H_6 + 86005 \cdot C_3H_8 + 10798 \cdot H_2 + 12636 \cdot CO) \frac{кДж}{м^3 \cdot T \cdot Г} = 36490 \frac{кДж}{м^3 \cdot T \cdot Г} \quad \text{Теплотворная способно}$$



Расчетная схема двухконтурной ПГУ

$$B_{T,G} := \frac{N_{ГТУ} \cdot \varepsilon}{\eta_{ГТУ} \cdot Q_{P_H}} = 7,83 \frac{\text{НМ}^3 \cdot \text{Т.Г}}{\text{С}}$$

Расход природного газа в камеру сгорания ГТУ:

$$G_G := G_B + \rho_{T,G} \cdot B_{T,G} = 365,3 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Массовый расход уходящих газов ГТУ:

$$V^0 := 4,76 \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8) = 9,7 \frac{\text{НМ}^3 \text{ВОЗДУХА}}{\text{НМ}^3 \text{Т.Г}}$$

Стехиометрический (теоретически необходимый) расход возд

$$\rho_{B,0} := 1,293 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

плотность воздуха при нормальных условиях

$$\alpha := \frac{G_B}{\rho_{B,0} \cdot V^0} = 3,67$$

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах ГТУ:

Теоретические объемы компонентов продуктов сгорания:

$$V_{N_2}^0 := 0,79 \cdot V^0 = 7,662 \frac{\text{НМ}^3 \text{П.С}}{\text{НМ}^3 \text{Т.Г}}$$

теоретический объем Азота

$$V_{RO_2} := \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 = 1,025 \frac{\text{НМ}^3 \text{П.С}}{\text{НМ}^3 \text{Т.Г}}$$

теоретический объем Трехатомных газов

$$V_{H_2O}^0 := 2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 0,0161 \cdot V^0 = 2,1811 \frac{\text{НМ}^3 \text{П.С}}{\text{НМ}^3 \text{Т.Г}}$$

теоретический объем Водяных паров

$$V_{H_2O} := V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0 = 2,5975 \frac{\text{НМ}^3 \text{П.С}}{\text{НМ}^3 \text{Т.Г}}$$

Действительный объем водяных паров

$$V_G := V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha - 1) \cdot V^0 = 37,1443 \frac{\text{НМ}^3 \text{П.С}}{\text{НМ}^3 \text{Т.Г}}$$

Полный объем продуктов сгорания

Объемные теплоемкости составляющих уходящих газов

$$C_{CO_2} := \text{wspgCPGST}(\text{"CO2"; } \theta_d) = 1,1699 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ К}}$$

Удельная массовая изобарная теплоёмкость CO₂

$$V_{ну} := 22,4 \frac{\text{М}^3}{\text{КМОЛЬ}}$$

Молярный объем 1 Н.МЗ при нормальных условиях

$$M_{CO_2} := (12 + 2 \cdot 16) \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

молярная масса CO₂

$$C_{Vol_{CO_2}} := \frac{C_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{V_{ну}} = 2,298 \frac{\text{КДЖ}}{\text{М}^3 \text{К}}$$

Объемная изобарная теплоёмкость CO₂

$$H_{Vol_{CO_2}} := C_{Vol_{CO_2}} \cdot (\theta_d - 273,15 \text{ К}) = 1200 \frac{\text{КДЖ}}{\text{М}^3}$$

Объемная энтальпия CO₂

$$h_{1CO_2} := \text{wspgHGST}(\text{"CO2"; } \theta_d)$$

$$H_{1Vol_{CO_2}} := h_{1CO_2} \cdot \frac{M_{CO_2}}{V_{ну}} = 106$$

$$C_{N_2} := \text{wspgCPGST}(\text{"N2"; } \theta_d) = 1,1228 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ К}}$$

Удельная массовая изобарная теплоёмкость N₂

$$M_{N_2} := (2 \cdot 14) \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

молярная масса N₂

$$C_{Vol_{N_2}} := \frac{C_{N_2} \cdot M_{N_2}}{V_{ну}} = 1,4035 \frac{\text{КДЖ}}{\text{М}^3 \text{К}}$$

Объемная изобарная теплоёмкость N₂

$$v_{\text{нУ}}$$

$$\frac{\text{м}^3}{\text{К}}$$

$$H_{\text{Vol}_{\text{N}_2}} := C_{\text{Vol}_{\text{N}_2}} \cdot (\theta_d - 273,15 \text{ К}) = 743,9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad \text{Объемная энтальпия N}_2$$

$$h_{1\text{N}_2} := \text{wspgHGST}(\text{"N}_2"; \theta_d)$$

$$H_{1\text{Vol}_{\text{N}_2}} := h_{1\text{N}_2} \cdot \frac{M_{\text{N}_2}}{V_{\text{нУ}}} = 708,2$$

$$C_{\text{Air}} := \text{wspgCPGST}(\text{"Air"}; \theta_d) = 1,0994 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{Удельная массовая изобарная теплоёмкость воздуха}$$

$$M_{\text{Air}} := 28,96 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \quad \text{молярная масса воздуха}$$

$$C_{\text{Vol}_{\text{Air}}} := \frac{C_{\text{Air}} \cdot M_{\text{Air}}}{V_{\text{нУ}}} = 1,4214 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{ К}} \quad \text{Объемная изобарная теплоёмкость воздуха}$$

$$h_{1\text{Air}} := \text{wspgHGST}(\text{"Air"}; \theta_d)$$

$$H_{1\text{Vol}_{\text{Air}}} := h_{1\text{Air}} \cdot \frac{M_{\text{Air}}}{V_{\text{нУ}}} = 7$$

$$H_{\text{Vol}_{\text{Air}}} := C_{\text{Vol}_{\text{Air}}} \cdot (\theta_d - 273,15 \text{ К}) = 753,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad \text{Объемная энтальпия воздуха}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} := \text{wspgCPGST}(\text{"H}_2\text{O"}; \theta_d) = 2,152 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{Удельная массовая изобарная теплоёмкость H}_2\text{O}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} := (2 \cdot 1 + 16) \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \quad \text{молярная масса H}_2\text{O}$$

$$C_{\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}} := \frac{C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{нУ}}} = 1,7293 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{ К}} \quad \text{Объемная изобарная теплоёмкость воздуха}$$

$$h_{1\text{H}_2\text{O}} := \text{wspgHGST}(\text{"H}_2\text{O"}; \theta_d)$$

$$H_{1\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}} := h_{1\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{нУ}}} = 8$$

$$H_{\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}} := C_{\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (\theta_d - 273,15 \text{ К}) = 916,5 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad \text{Объемная энтальпия H}_2\text{O}$$

$$H_{\Gamma}^{\circ} := (V_{\text{RO}_2} \cdot C_{\text{Vol}_{\text{CO}_2}} + V_{\text{N}_2}^{\circ} \cdot C_{\text{Vol}_{\text{N}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} \cdot C_{\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}}) \cdot (\theta_d - 273,15 \text{ К}) = 8946,73 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \text{ Т. Г}} \quad \text{Энтальпия чистых продуктов сгорания}$$

$$H_{\Gamma}^{\circ} := V_{\text{RO}_2} \cdot H_{\text{Vol}_{\text{CO}_2}} + V_{\text{N}_2}^{\circ} \cdot H_{\text{Vol}_{\text{N}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} \cdot H_{\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}} = 8946,73 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \text{ Т. Г}}$$

$$H_{1\Gamma}^{\circ} := V_{\text{RO}_2} \cdot H_{1\text{Vol}_{\text{CO}_2}} + V_{\text{N}_2}^{\circ} \cdot H_{1\text{Vol}_{\text{N}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} \cdot H_{1\text{Vol}_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$H_{\text{Air}}^{\circ} := V^{\circ} \cdot C_{\text{Vol}_{\text{Air}}} \cdot (\theta_d - 273,15 \text{ К}) = 7306,096 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \text{ Т. Г}} \quad \text{Энтальпия воздуха в уходящих газах ГТУ}$$

$$H_{1\text{Air}}^{\circ} := V^{\circ} \cdot H_{1\text{Vol}_{\text{Air}}} = 69$$

$$H_{\Gamma} := H_{\Gamma}^{\circ} + (\alpha - 1) \cdot H_{\text{Air}}^{\circ} = 28427,65 \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \text{ Т. Г}} \quad \text{Энтальпия уходящих газов, отнесенного к 1 н.м3 сожженного газа}$$

$$H_{1\Gamma} := H_{1\Gamma}^{\circ} + (\alpha - 1) \cdot H_{1\text{Air}}^{\circ}$$

$$B_{\text{нУ}} \cdot H_{\Gamma}$$

$$B_{\text{нУ}} \cdot H_{1\Gamma}$$

$$h_r := \frac{q_{r,1}}{G_r} = 609,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Удельная весовая энтальпия уходящих газов

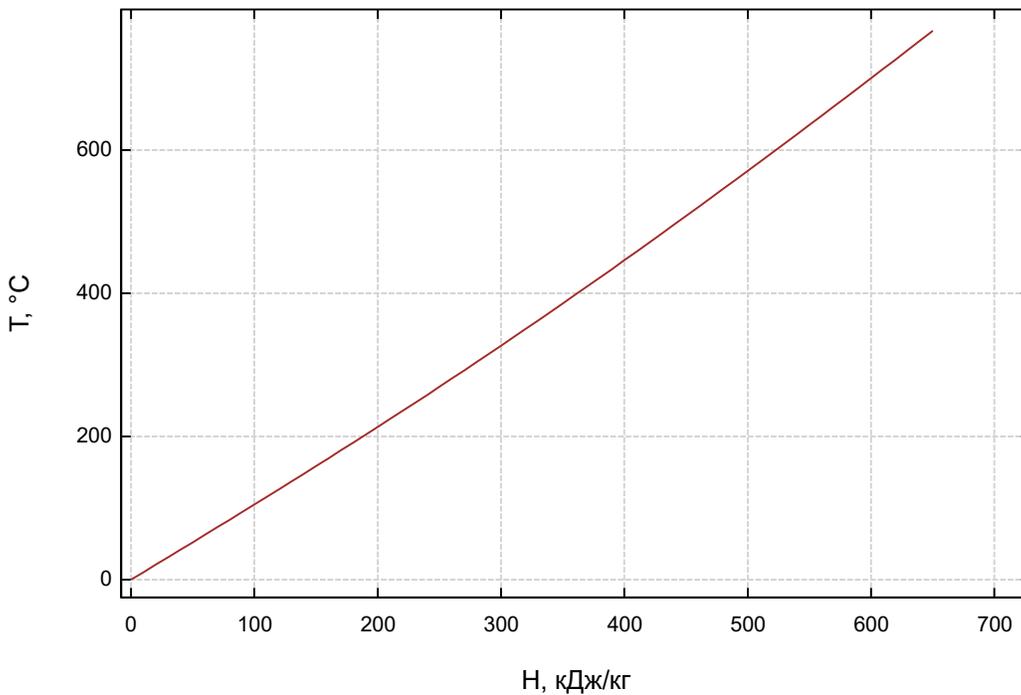
$$h_{1r} := \frac{q_{r,1}}{G_r} = 575,0$$

Расчет удельной энтальпии газов

$$H_{rT}(T) := \begin{cases} H_{CO_2} := (\text{wspgCPGST}("CO_2"; T)) \cdot \frac{M_{CO_2}}{V_{Hy}} \cdot (T - 273,15 \text{ K}) \\ H_{N_2} := (\text{wspgCPGST}("N_2"; T)) \cdot \frac{M_{N_2}}{V_{Hy}} \cdot (T - 273,15 \text{ K}) \\ H_{Air} := (\text{wspgCPGST}("Air"; T)) \cdot \frac{M_{Air}}{V_{Hy}} \cdot (T - 273,15 \text{ K}) \\ H_{H_2O} := (\text{wspgCPGST}("H_2O"; T)) \cdot \frac{M_{H_2O}}{V_{Hy}} \cdot (T - 273,15 \text{ K}) \\ \frac{B_{T,r}}{G_r} \cdot \left((V_{RO_2} \cdot H_{CO_2} + V_{N_2}^o \cdot H_{N_2} + V_{H_2O}^o \cdot H_{H_2O}) + (\alpha - 1) \cdot V^o \cdot H_{Air} \right) \end{cases}$$

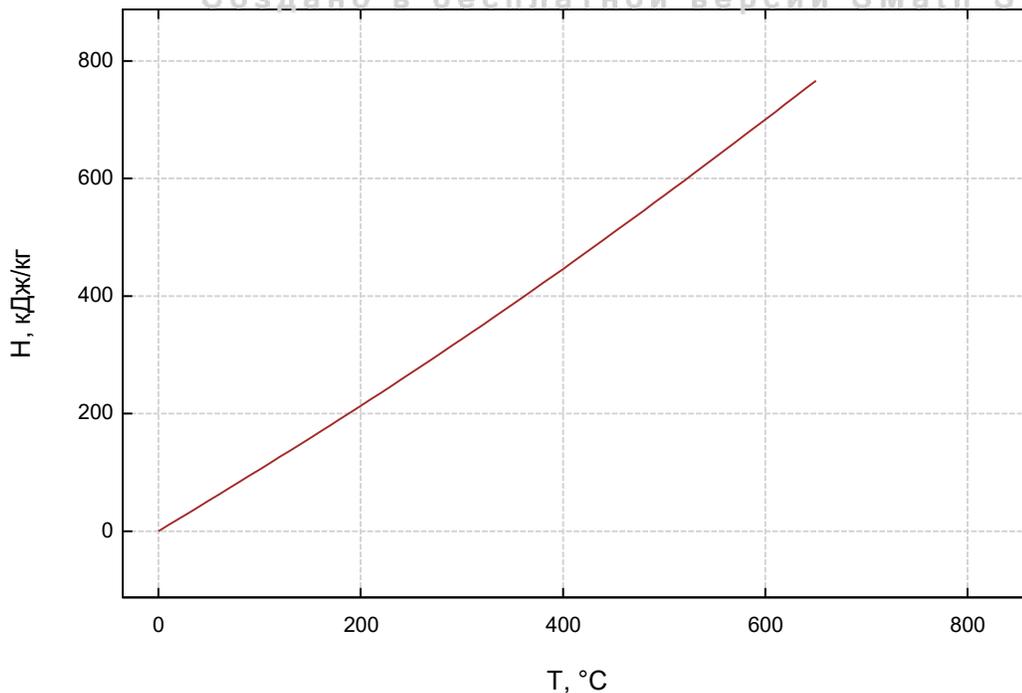
$$TT := \overrightarrow{[(0 \text{ } ^\circ\text{C}); 10 \text{ } ^\circ\text{C}..(650 \text{ } ^\circ\text{C})]}$$

$$H_{r,T} := \overrightarrow{H_{rT}(TT)}$$



$$\text{augment} \left(\frac{TT}{\text{K}} - 273,15; \frac{H_{rT}(TT)}{1000} \right)$$

Рис. 6.2. Зависимость энтальпии H_{rT} рабочего тела (газов) от температуры T газов



$$\text{augment} \left(\frac{T_T}{K} - 273,15; \frac{H_{гг}(T_T)}{1000} \right)$$

Рис. 6.3. Зависимость температуры T рабочего тела (газов) от энтальпии $H_{гг}$ газов

6.1.3. Расчет котла-утилизатора

— Контур высокого давления котла утилизатора НД КУ

— Контур низкого давления котла утилизатора НД КУ

— Построение Q, T - диаграммы

Для построения Q, T диаграммы

$$\theta_d = 530 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{пп_вд} = 461,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{s_вд} = 292,1219 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{ух_вд} = 226,6007 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{s_нд} = 169,9488 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{ух_кд} = 98,4947 \text{ } ^\circ\text{C}$$

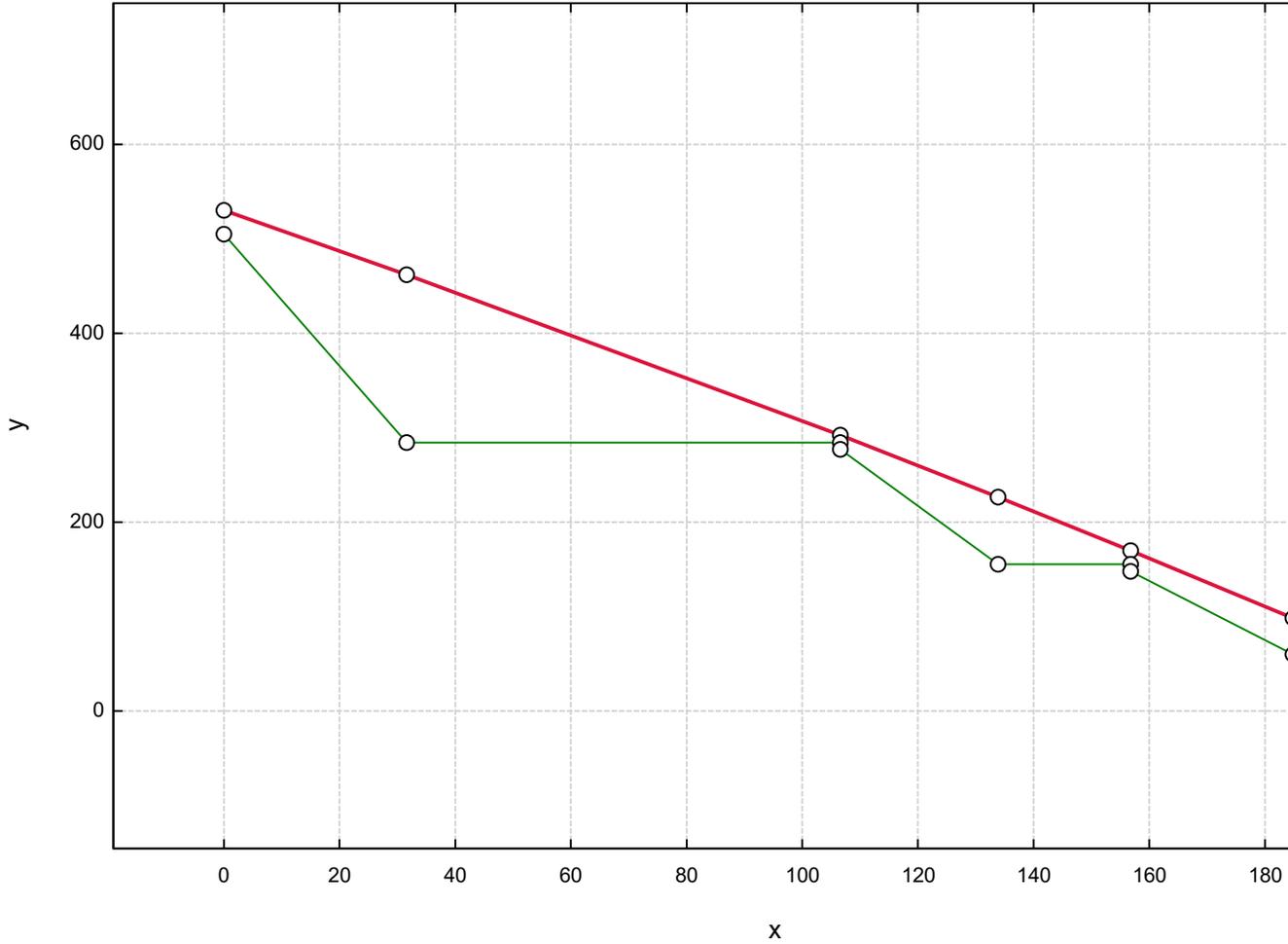
$$X := \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Q_{пп_вд}}{1000 \text{ кВт}} \\ \frac{Q_{и_вд} + Q_{пп_вд}}{1000 \text{ кВт}} \\ \frac{Q_{э_вд} + Q_{и_вд} + Q_{пп_вд}}{1000 \text{ кВт}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 31,5861 \\ 106,5713 \\ 133,8765 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} \frac{\theta_d}{K} - 273,15 \\ \frac{\theta_{пп_вд}}{K} - 273,15 \\ \frac{\theta_{s_вд}}{K} - 273,15 \\ \frac{\theta_{ух_вд}}{K} - 273,15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 530 \\ 461,9587 \\ 292,1219 \\ 226,6007 \end{bmatrix} \quad B := \begin{bmatrix} 169,9488 \end{bmatrix}$$

$$\left[\begin{array}{l} \frac{1000 \text{ кВт}}{\left(Q_{И_НД} + Q_{ПП_НД} \right) + Q_{Э_ВД} + Q_{И_ВД} + Q_{ПП_ВД}} \\ \frac{Q_{Э_НД} + \left(Q_{И_НД} + Q_{ПП_НД} \right) + Q_{Э_ВД} + Q_{И_ВД} + Q_{ПП_ВД}}{1000 \text{ кВт}} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} 156,7788 \\ 184,8687 \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\theta_{s_НД}}{К} - 273,15 \\ \frac{\theta_{УХ_КД}}{К} - 273,15 \end{array} \right]$$

$$\left[98,4947 \right]$$



```

{
  {
    augment (X; A)
    [ 5 355 num2str (x; "n3") 4 "red" ]
  }
  {
    augment (G; B)
    [ 7 55 num2str (x; "n2") 5 "blue" ]
  }
}
    
```

□ Приближенный расчет паровой турбины

6.1.4. Приближённый расчёт паровой турбины

1. Суммарный полный расход водяного пара, расширяющийся в последних ступенях паровой турбины

$$v'' := \text{wspVSST}(t_k) = 28,1863 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$D_{\Sigma} := \left(2 \cdot (D_{0_ВД} + D_{0_НД}) - D_{л}\right) \cdot v'' = 3259,9 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Суммарный полный расход водяного пара, расширяющийся в последних

2. Двухцилиндровая паровая турбина

$$p_{пк} := 1,8 \text{ МПа} \quad \text{давление в поворотной камере}$$

$$p_{цнд,0} := 0,16 \text{ МПа} \quad \text{давление перед ЦНД}$$

$$T_{s_цнд} := \text{wspTSP}(p_{цнд,0}) = 113,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура насыщения}$$

3. Потери давления в СРК НД

$$\xi_{нд_срк} := 0,03 \quad \text{потери давления в СРК НД}$$

$$p_{см} := (1 - \xi_{нд_срк}) \cdot p_{нд,0} = 0,582 \text{ МПа} \quad \text{давление в камере смешения}$$

$$p_{'ВД,0} := (1 - \xi_{нд_срк}) \cdot p_{ВД,0} = 6,305 \text{ МПа} \quad \text{давление водяного пара перед проточной частью ЦВД}$$

$$\xi_{ВД_срк} := 0,03 \quad \text{потери давления в СРК ВД}$$

$$T_0 := \text{CoolProp}$$

4. Параметры в т."0"

$$h_{0_ВД} := \text{wspHPT}(p_{ВД,0}; T_{ВД,0}) = 3429 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{энтальпия в т. "0"}$$

$$t_0 := \text{wspTRH}(p_{'ВД,0}; h_{0_ВД}) = 504,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура в т. "0"}$$

$$v_0 := \text{wspVPT}(p_{'ВД,0}; t_0) = 0,0541 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad \text{удельный объем в т. "0"}$$

$$s_{0_ВД} := \text{wspSPT}(p_{'ВД,0}; t_0) = 6,8685 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{энтропия в т. "0"}$$

$$T_0 := \text{wspTRH}(p_{'ВД,0}; h_{0_ВД})$$

$$v_0 := \text{CoolProp_Prop}$$

5. Расширение в первом отсеке турбины при $s_{0_ВД}$

$$h_{пк,t} := \text{wspHPS}(p_{пк}; s_{0_ВД}) = 3055 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{энтальпия в конце процесса расширения}$$

$$v_{пк,zt} := \text{wspVPH}(p_{пк}; h_{пк,t}) = 0,1435 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad \text{удельный объем в конце процесса расширения}$$

$$v_0 := \text{wspVPH}(p_{пк}; h_{пк,t})$$

$$s_0 := \text{CoolProp_Pr}$$

$$s_0 := \text{wspSPH}(p_{пк}; h_{пк,t})$$

6. Перепад в 1 отсеке турбины

$$\Delta h_{01} := h_{0_ВД} - h_{пк,t} = 373,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{изэнтропический теплоперепад пара в первом отсеке турбины}$$

7. Внутренний относительный КПД турбины первого отсека:

$$D_{0_ВД} = 48,2743 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad A1 := 2 \cdot D_{0_ВД} \cdot \sqrt{v_0 \cdot v_{пк,zt}} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}} = 8,5097$$

$v_{пк,zt} = 0,1435 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$\eta_1 := 1$

$$\eta_{1_oi} := \left(0,92 - \frac{0,2}{A1} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta h_{01_oi} - 700}{20000} \right) \cdot k_1 = 0,8819 \quad \text{Внутренний относительный КПД турбины первого отсека}$$

8. Перепад использованный в 1 отсеке турбины

$$\Delta h_{01_д} := \Delta h_{01} \cdot \eta_{1_oi} = 329,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{использованный теплоперепад первого отсека}$$

9. Внутренняя мощность первого отсека

$$N_1 := 2 \cdot D_{0_ВД} \cdot \Delta h_{01_д} = 31,829 \text{ МВт} \quad \text{Внутренняя мощность первого отсека}$$

10. Параметры в поворотной камере

$$h_{0_пк} := h_{0_ВД} - \Delta h_{01_д} = 3099 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{энтальпия}$$

$$t_{0_пк} := \text{wspTRH}(p_{пк}; h_{0_пк}) = 330,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{температура}$$

$$v_{0_пк} := \text{wspVPH}(p_{пк}; h_{0_пк}) = 0,1492 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad \text{удельный объем}$$

$$s_{0_пк} := \text{wspSPH}(p_{пк}; h_{0_пк}) = 6,943 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{энтропия}$$

11. Расширение во втором отсеке при $s_{0_пк}$

$$h_{см,t} := \text{wspHPS}(p_{см}; s_{0_пк}) = 2832 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{энтальпия смешения во втором отсеке}$$

$$v_{см,zt} := \text{wspVPS}(p_{см}; s_{0_пк}) = 0,3556 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad \text{удельный объем смешения во втором отсеке}$$

12. Перепад в 2 отсеке турбины

$$\Delta h_{02} := h_{0_пк} - h_{см,t} = 267,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{изоэнтропический теплоперепад пара во 2 отсеке турбины}$$

13. Внутренний относительный КПД турбины второго отсека:

$$D_{0_ВД} = 48,2743 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad A2 := 2 \cdot D_{0_ВД} \cdot \sqrt{v_{0_пк} \cdot v_{см,zt}} \cdot \frac{\text{с}}{3} = 22,2384 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$k_2 := 1 \quad \Delta h_{02_oi} := \Delta h_{02} \frac{\text{кДж}}{\text{кДж}} = 267,1123$$

$$\eta_{2_oi} := \left(0,92 - \frac{0,2}{A2} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta h_{02_oi} - 700}{20000} \right) \cdot k_2 = 0,8913 \quad \text{внутренний относительный КПД турбины второго отсека}$$

14. Перепад использованный в 2 отсеке турбины

$$\Delta h_{02_д} := \Delta h_{02} \cdot \eta_{2_oi} = 238,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{использованный теплоперепад пара во 2 отсеке}$$

15. Внутренняя мощность второго отсека

$$N_2 := 2 \cdot D_{0_ВД} \cdot \Delta h_{02_д} = 22,986 \text{ МВт} \quad \text{внутренняя мощность пара второго отсека}$$

16. Энтальпия пара, поступающего в камеру смешения из 2-го отсека

$$h_{к_вд} := h_{0_пк} - \Delta h_{02_д} = 2861,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Энтальпия пара, поступающего в камеру смешения из 2-го отсека

17. Параметры пара в камере смешения (перед ЧНД) т."01"

$$h_{см} := \frac{(2 \cdot D_{0_вд} \cdot h_{к_вд} + (2 \cdot D_{0_нд} - D_{д}) \cdot h_{нд,0})}{2 \cdot (D_{0_вд} + D_{0_нд}) - D_{д}} = 2860,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия в камере смешения

$$t_{см} := \text{wspTPH}(p_{см}; h_{см}) = 204,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

температура пара в камере смешения

$$t_{см} := \text{wspTPH}$$

$$v_{см} := \text{wspVPH}(p_{см}; h_{см}) = 0,3671 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

удельный объем в камере смешения

$$s_{см} := \text{wspSPH}(p_{см}; h_{см}) = 7,003 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

энтропия пара в камере смешения

18. Расширение в третьем отсеке при $s_{см}$

$$h_{цнд,t} := \text{wspHPS}(p_{цнд,0}; s_{см}) = 2619 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия в ЦНД

$$v_{цнд,t} := \text{wspVPS}(p_{цнд,0}; s_{см}) = 1,0538 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

удельный объем в ЦНД

$$x_{цнд,t} := \text{wspXPH}(p_{цнд,0}; h_{цнд,t}) = 0,9655$$

степень сухости пара в конце процесса расширения в 3 отсеке

Перепад энтальпии в 3 отсеке турбины

$$\Delta h_{03} := h_{см} - h_{цнд,t} = 241,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

изоэнтропический теплоперепад пара в 3 отсеке турбины

$$s(T) := \text{wspSSST}(T)$$

$$T_{s_нд} := [(100 \text{ } ^\circ\text{C}); 101 \text{ } ^\circ\text{C}..(500 \text{ } ^\circ\text{C})]$$

$$T_{s_нд} := \left| \begin{array}{l} a := 100 \text{ } ^\circ\text{C} \\ b := t_{см} \\ \text{while } |a - b| > 0,001 \text{ К} \\ \quad \left| \begin{array}{l} T := \frac{a + b}{2} \\ \text{if } (s(T) - s_{см}) \cdot (s(a) - s_{см}) > 0 \\ \quad a := T \\ \quad \text{else} \\ \quad \quad b := T \end{array} \right. \\ T_{s_нд} = 132,85 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

Найдем температуру

$$h_{цнд,,(T)} := \text{wspHSST}(T_{s_нд}) = 2723 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Энтальпия при $x := 1$

$$\Delta h_{03_вл} := h_{цнд,,(T)} - h_{цнд,t} = 103,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Перепад энтальпии для "влажной" части процесса

19. Расход пара через третий отсек

$$D_3 := 2 \cdot (D_{0_вл} + D_{0_нд}) - D_{д} = 115,7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход пара через третий отсек

$$v_{cp} := \sqrt{v_{цнд,t} \cdot v_{см,zt}} = 0,6122 \frac{\text{м}}{\text{кг}}^3 \quad \text{Средний для третьего отсека удельный объем пара}$$

20. Коэффициент, учитывающий влажность пара

$$Y_{вуз} := 0 \quad \text{т.к. отсутствует система влагоудаления}$$

$$Y_3 := 0,02 \quad \text{влажность в конце действительного процесса расширения в качестве приближения}$$

$$Y_{03} := 0 \quad \text{влажность перед отсеком}$$

$$k_{влз} := 1 - 0,8 \cdot (1 - Y_{вуз}) \cdot \frac{Y_3 + Y_{03}}{2} \cdot \left(\frac{\Delta h_{03_вл}}{\Delta h_{03}} \right)$$

$$k_{влз} = 0,9966 \quad \text{Коэффициент, учитывающий влажность пара}$$

21. Относительный внутренний КПД третьего отсека

$$A3 := 2 \cdot D_3 \cdot v_{cp} \frac{\text{с}}{3} = 141,6067$$

$$\eta_{3_oi} := \left(0,92 - \frac{0,2}{A3} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta h_{03_oi} - 700}{20000} \right) \cdot k_{влз} = 0,8944 \quad \text{Относительный внутренний КПД третьего отсека}$$

22. Перепад использованный в 3 отсеке турбины

$$\Delta h_{03_д} := \Delta h_{03} \cdot \eta_{3_oi} = 215,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{использованный теплоперепад пара в 3 отсеке}$$

23. Внутренняя мощность 3 отсека

$$N_3 := D_3 \cdot \Delta h_{03_д} = 24,959 \text{ МВт} \quad \text{Внутренняя мощность 3 отсека}$$

24. Энтальпия пара на выходе из ЦВД

$$h_{0_цнд} := h_{см} - \Delta h_{03_д} = 2644,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{Энтальпия пара на выходе из ЦВД}$$

25. Степень сухости за ЦВД

$$x_{цнд} := \text{wspXPH} \left(p_{цнд,0}; h_{0_цнд} \right) = 0,977 \quad \text{Степень сухости за ЦВД}$$

$$Y_{цнд} := 1 - x_{цнд} = 0,023$$

26. Расход пара через один поток ЦНД (четвертый отсек)

$$D_4 := \frac{D_3}{2} = 57,83 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \text{Расход пара через один поток ЦНД}$$

27. Расширение в четвертом отсеке

$$s_{цнд,kt} := \text{wspSPH} \left(p_{цнд,0}; h_{0_цнд} \right) = 7,069 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{энтропия пара на выходе в четвертый отсек}$$

$$h_{цнд,kt} := \text{wspHPS} \left(p_{цнд,kt}; s_{цнд,kt} \right) = 2155,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{энтальпия пара на выходе в четвертый отсек}$$

$$v_{\text{цнд},4kt} := \text{wspVPS}(p_k; s_{\text{цнд},kt}) = 23,4699 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad \text{удельный объем пара на выходе в четвертый отсек}$$

$$\Delta h_{04} := h_{0_цнд} - h_{\text{цнд},kt} = 489,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{изоэнтальпический теплоперепад энтальпии в 4 отсеке турбины}$$

28. Коэффициент, учитывающий влажность пара

$$Y_{\text{в}y4} := 0,15 \quad Y_k := 0,1 \quad \Delta h_{04_вл} := \Delta h_{04} \quad \text{т.к. весь процесс протекает в области влажного пара}$$

$$k_{\text{вл}4} := 1 - 0,8 \cdot (1 - Y_{\text{в}y4}) \cdot \frac{(Y_{\text{цнд}} + Y_k)}{2} \cdot \left(\frac{\Delta h_{04_вл}}{\Delta h_{04}} \right) \quad Y_{\text{цнд}} = 0,023$$

$$k_{\text{вл}4} = 0,9582 \quad \text{Коэффициент, учитывающий влажность пара}$$

29. Относительный внутренний КПД четвертого отсека

$$\Delta h_{\text{вс}} := 16 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad A4 := \frac{\Delta h_{04} \frac{\text{кг}}{\text{кДж}} - 400}{10000} = 0,009$$

$$\eta_{4_oi} := 0,87 \cdot (1 + A4) \cdot k_{\text{вл}4} - \frac{\Delta h_{\text{вс}}}{\Delta h_{04}} = 0,8084 \quad \text{Относительный внутренний КПД четвертого отсека} \quad \Delta h_{03_oi} := \Delta h_{03} \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}$$

30. Перепад использованный в 4 отсеке турбины

$$\Delta h_{04_д} := \Delta h_{04} \cdot \eta_{4_oi} = 395,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{использованный теплоперепад 4 отсека}$$

31. Энтальпия пара на выходе из ЦНД

$$h_k := h_{0_цнд} - \Delta h_{04_д} = 2249,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{Энтальпия пара на выходе из ЦНД}$$

32 Степень сухости за ЦНД

$$x_k := \text{wspXPH}(p_k; h_k) = 0,8714 \quad \text{Степень сухости за ЦНД}$$

$$Y_k := 1 - x_k = 0,1286 \quad Y_{\text{в}y_цнд} := 0,15$$

$$k_{\text{вл},k} := 1 - 0,8 \cdot (1 - Y_{\text{в}y_цнд}) \cdot \frac{(Y_{\text{цнд}} + Y_k)}{2} \cdot \left(\frac{\Delta h_{04_вл}}{\Delta h_{04}} \right) = 0,9484$$

$$k_{\text{вл},k} = 0,9484$$

$$A5 := \frac{\Delta h_{04} \frac{\text{кг}}{\text{кДж}} - 400}{10000} = 0,009$$

$$\eta_{5_oi} := 0,87 \cdot (1 + A5) \cdot k_{\text{вл},k} - \frac{\Delta h_{\text{вс}}}{\Delta h_{04}} = 0,7999$$

$$\Delta h_{04_д} := \Delta h_{04} \cdot \eta_{5_oi} = 391,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \text{перепад использованный в отсеке турбины перед конденсатором}$$

$$h_{\text{кд}} := h_{0_цнд} - \Delta h_{04_д} = 2253,3028 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Параметры за ЦНД

$$x_{\text{кд}} := \text{wspXPH}(p_{\text{к}}; h_{\text{кд}}) = 0,8731 \quad \text{степень сухости за ЦНД}$$

$$s_{\text{кд}} := \text{wspSPH}(p_{\text{к}}; h_{\text{кд}}) = 7,3892 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{энтропия за ЦНД}$$

33 Внутренняя мощность ЦНД

$$N_{\text{цнд}} := D_3 \cdot \Delta h_{04_д} = 45,29 \text{ МВт} \quad \text{Внутренняя мощность ЦНД}$$

34 Внутренняя мощность ЦВД

$$N_{\text{цвд}} := N_1 + N_2 + N_3 = 79,7741 \text{ МВт} \quad \text{Внутренняя мощность ЦВД}$$

35 Внутренняя мощность паровой турбины

$$N_{\text{т}} := N_{\text{цвд}} + N_{\text{цнд}} = 125,0641 \text{ МВт} \quad \text{Внутренняя мощность паровой турбины}$$

35 Электрическая мощность паровой турбины

$$N_{\text{э}} := N_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{эГ}} \cdot \eta_{\text{мех}} = 121,3372 \text{ МВт} \quad \text{Электрическая мощность паровой турбины}$$

□ — Определение экономических показателей ПГУ

1 Абсолютный электрический КПД паровой турбины

$$\eta_{\text{эГ_ПГУ}} := \frac{N_{\text{э}}}{2 \cdot Q_{\text{кУ}}} = 0,3282 \quad \text{Абсолютный электрический КПД паровой турбины}$$

2 Абсолютный электрический КПД паросиловой установки

$$\eta_{\text{эГ_ПСУ}} := \eta_{\text{эГ_ПГУ}} \cdot \eta_{\text{кУ}} = 0,2797 \quad \text{Абсолютный электрический КПД паросиловой установки}$$

3 Электрическая мощность ПГУ

$$N_{\text{э,ПГУ}} := 2 \cdot N_{\text{ГТУ_э}} + N_{\text{э}} = 321,3372 \text{ МВт} \quad \text{Электрическая мощность ПГУ}$$

4 Теплота, подведенная в камеру сгорания одной ГТУ

$$Q_{\text{кС}} := \frac{N_{\text{ГТУ_э}}}{\eta_{\text{ГТУ_э}}} = 285,7143 \text{ МВт} \quad \text{Теплота, подведенная в камеру сгорания одной ГТУ}$$

5. Абсолютный электрический КПД брутто ПГУ

$$\eta_{\text{э_ПГУ}} := \frac{N_{\text{э,ПГУ}}}{2 \cdot Q_{\text{кС}}} = 0,5623 \quad \text{Абсолютный электрический КПД брутто ПГУ}$$

□ — Данные для графика

H2O := "IF97::H2O"

T_{...} := \text{CoolProp Props}("Ttriple"; "", 0; "", 1; H2O) = 0,01 °C

$$T_{cr} := \text{CoolProp_Props} ("Tcrit"; ""; 0; ""; 1; H2O) = 373,946 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{Sat} := \left[T_{tr}; T_{tr} + \frac{T_{cr} - T_{tr}}{1000} \dots T_{cr} \right]$$

$$h_{Sat} := \overrightarrow{\text{wspHSST}}(T_{Sat}) \quad s_{Sat} := \overrightarrow{\text{wspSSST}}(T_{Sat})$$

$$s_{p0} := \left[\left(6,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \right); 6,51 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \dots \left(7,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \right) \right]$$

$$h_{p0} := \overrightarrow{\text{wspHPS}}(p_{ВД_0}; s_{p0}) \quad h_{p1} := \overrightarrow{\text{wspHPS}}(p_{ВД_0}; s_{p0}) \quad h_{pk} := \overrightarrow{\text{wspHPS}}(p_{pk}; s_{p0})$$

$$p_{12} := \left[p_{ВД_0}; p_{ВД_0} - \frac{p_{ВД_0} - p_{pk}}{300} \dots p_{pk} \right]$$

$$s_{12} := \overrightarrow{\text{wspSEXPANSIONPTPEFF}}(p_{ВД_0}; \overrightarrow{\text{wspTPH}}(p_{ВД_0}; h_{ВД_0}); p_{12}; \eta_{oi})$$

$$h_{12} := \overrightarrow{\text{wspHEXPANSIONPTPEFF}}(p_{ВД_0}; \overrightarrow{\text{wspTPH}}(p_{ВД_0}; h_{ВД_0}); p_{12}; \eta_{oi})$$

$$hsDiargam := \begin{cases} \text{augment}(s_{Sat}; h_{Sat}) \cdot 0,001 \\ \text{augment}(s_{p0}; h_{p0}) \cdot 0,001 \\ \text{augment}(s_{p0}; h_{p1}) \cdot 0,001 \\ \text{augment}(s_{p0}; h_{pk}) \cdot 0,001 \\ \left[\begin{array}{cc} s_0 & h_{ВД_0} \\ s_0 & h_{pk_t} \end{array} \right] \cdot 0,001 \\ \text{augment}(s_{12}; h_{12}) \cdot 0,001 \\ \left[\begin{array}{cc} s_0 & h_{ВД_0} \\ \text{wspSPH}(p_{ВД_0}; h_{ВД_0}) & h_{ВД_0} \end{array} \right] \cdot 0,001 \end{cases}$$

