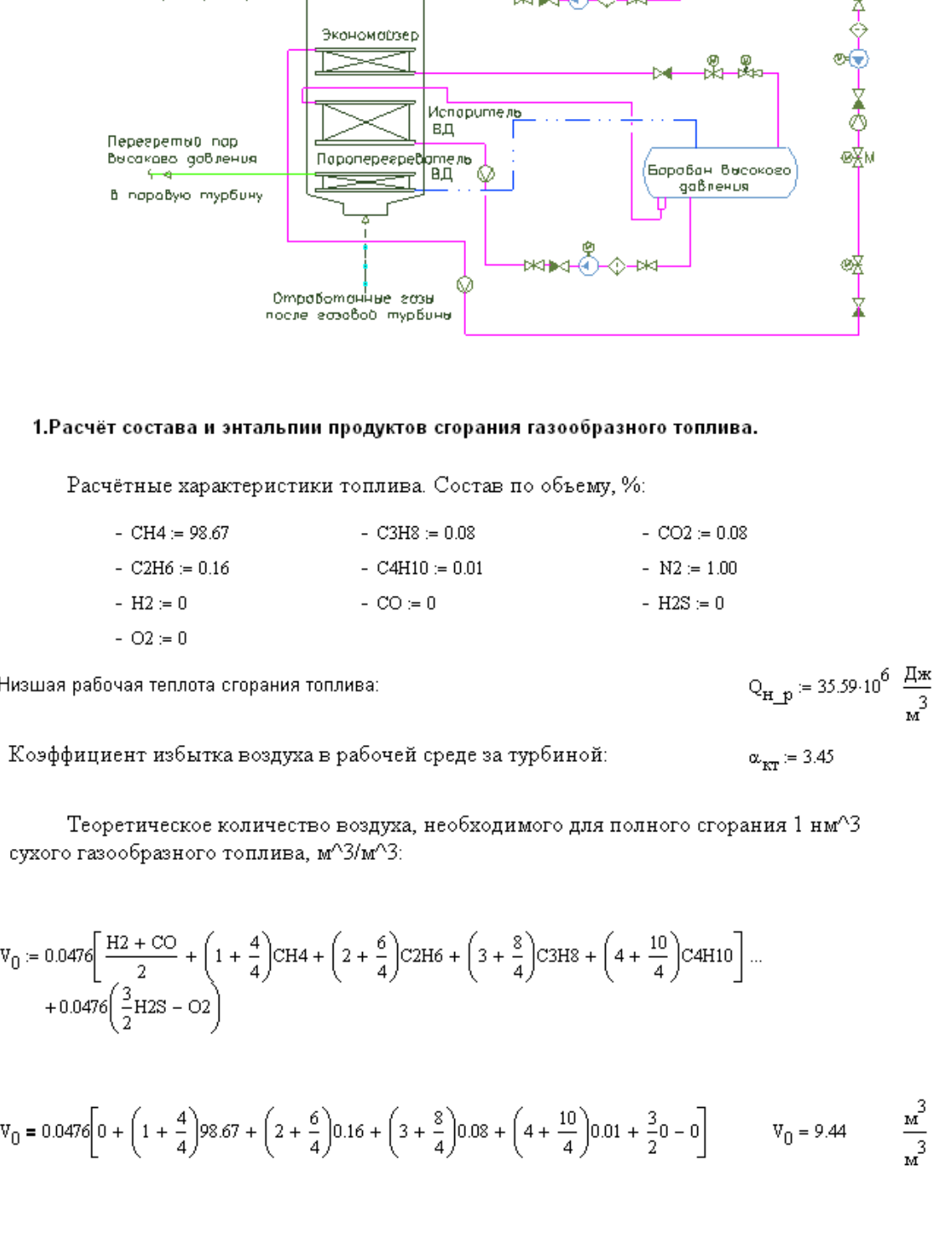


Исходные данные

Характеристики ГТУ (Siemens GT10С) в расчётном режиме (температура наружного воздуха 15°С):

Топливо	Природный газ и жидкое топливо	
Частота	50 Гц	
Электрическая мощность	29,1 МВт в простом цикле	N _{э-шт} = 29,1 · 10 ⁶ Вт
Электрический КПД	36% в простом цикле	
Тепловая мощность	10 000 кДж/кВтч (простой цикл)	
Скорость турбины	6 500 об/мин	
Степень повышения давления в компрессоре	18,0	
Расход выхлопных газов	91,1 кг/сек	G _{к-т} = 91,1 $\frac{кг}{с}$
Температура выхлопных газов	518 С	
Уровень выбросов NOx (15% O2)	< 15 ppm	

Принципиальная тепловая схема котла-утилизатора



1. Расчёт состава и энтальпии продуктов сгорания газообразного топлива.

Расчётные характеристики топлива. Состав по объему, %:

- CH4 = 98,67 - C3H8 = 0,08 - CO2 = 0,08
- C2H6 = 0,16 - C4H10 = 0,01 - N2 = 1,00
- H2 = 0 - CO = 0 - H2S = 0
- O2 = 0

Низшая рабочая теплота сгорания топлива: Q_{н-р} = 35,59 · 10⁶ Дж/м³

Коэффициент избытка воздуха в рабочей среде за турбиной: α_{к-т} = 3,45

Теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 м³ сухого газообразного топлива, м³/м³:

$$V_0 = 0,0476 \left[\frac{H_2 + CO}{2} + \left(1 + \frac{4}{C}\right)CH_4 + \left(2 + \frac{6}{C}\right)C_2H_6 + \left(3 + \frac{8}{C}\right)C_3H_8 + \left(4 + \frac{10}{C}\right)C_4H_{10} \right] + 0,0476 \left(\frac{H_2S}{2} - O_2 \right)$$

$$V_0 = 0,0476 \left[0 + \left(1 + \frac{4}{C}\right)98,67 + \left(2 + \frac{6}{C}\right)0,16 + \left(3 + \frac{8}{C}\right)0,08 + \left(4 + \frac{10}{C}\right)0,01 + \frac{3}{2} \cdot 0 - 0 \right] \quad V_0 = 9,44 \quad \frac{м^3}{м^3}$$

Объемный состав продуктов сгорания газообразного топлива:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_0 \cdot \alpha_{к-т} + \frac{N_2}{100} \quad V_{N_2} = 0,79 \cdot 9,44 \cdot 3,45 + \frac{1,00}{100} \quad V_{N_2} = 25,74 \quad \frac{м^3}{м^3}$$

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO + CO_2 + H_2S + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10}) \quad V_{RO_2} = 0,9935 \quad \frac{м^3}{м^3}$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left(H_2 + \frac{4}{C}CH_4 + \frac{6}{C}C_2H_6 + \frac{8}{C}C_3H_8 + \frac{10}{C}C_4H_{10} \right) + 0,0161 \cdot V_0 \cdot \alpha_{к-т}$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left(0 + \frac{4}{C}98,67 + \frac{6}{C}0,16 + \frac{8}{C}0,08 + \frac{10}{C}0,01 \right) + 0,0161 \cdot 9,44 \cdot 3,45 \quad V_{H_2O} = 2,506 \quad \frac{м^3}{м^3}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha_{к-т} - 1) \cdot V_0 \quad V_{O_2} = 0,21 \cdot (3,45 - 1) \cdot 9,44 \quad V_{O_2} = 4,858 \quad \frac{м^3}{м^3}$$

Полный относительный объем продуктов сгорания газового топлива:

$$V_r = V_{N_2} + V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} \quad V_r = 25,74 + 0,9935 + 2,506 + 4,858 \quad V_r = 34,10 \quad \frac{м^3}{м^3}$$

Объемные доли продуктов сгорания:

$$\tau_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_r} = \frac{25,74}{34,10} \quad \tau_{N_2} = 0,7549$$

$$\tau_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_r} = \frac{0,9935}{34,10} \quad \tau_{RO_2} = 0,02913$$

$$\tau_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r} = \frac{2,506}{34,10} \quad \tau_{H_2O} = 0,0735$$

$$\tau_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_r} = \frac{4,858}{34,10} \quad \tau_{O_2} = 0,1425$$

Параметр β для газовой смеси известного состава:

$$\beta_r = 0,94 \cdot \tau_{N_2} + 4,00 \cdot \tau_{RO_2} + 2,20 \cdot \tau_{H_2O} + 1,23 \cdot \tau_{O_2}$$

$$\beta_r = 0,94 \cdot 0,7549 + 4,00 \cdot 0,02913 + 2,20 \cdot 0,0735 + 1,23 \cdot 0,1425 \quad \beta_r = 1,16$$

Молекулярная масса продуктов сгорания:

$$\mu_r = 28,15 \cdot \tau_{N_2} + 44,01 \cdot \tau_{RO_2} + 18,02 \cdot \tau_{H_2O} + 32,00 \cdot \tau_{O_2}$$

$$\mu_r = 28,15 \cdot 0,7549 + 44,01 \cdot 0,02913 + 18,02 \cdot 0,0735 + 32,00 \cdot 0,1425 \quad \mu_r = 28,42 \quad \frac{г}{моль}$$

При температуре T_{к-т} = 518 °С определяем энтальпию газов:

$$\mu_{h_{к-т}} = f(\beta_r, T_{к-т}) \quad \mu_{h_{к-т}} = 16011 \quad \frac{кДж}{кмоль}$$

$$h_{к-т} = \frac{\mu_{h_{к-т}}}{\mu_r} \quad h_{к-т} = \frac{16054}{28,42} \quad h_{к-т} = 563,5 \quad \frac{кДж}{кг}$$

2. Тепловой расчёт КУ.

2.1. Контур высокого давления.

2.1.1. Пароперегреватель высокого давления.

- уравнение теплового баланса: G_{к-т}(h_{к-т} - h₁)ϕ = D_{пе_вд}(h_{пе_вд} - h_{вд})

- давление перегретого пара на выходе из КУ: P_{пе_вд} = 5,5 МПа

- давление пара в барабане высокого давления: P_{б_вд} = 1,012 · P_{пе_вд} = 1,012 · 5,5 P_{б_вд} = 5,57 МПа

- по давлению пара в барабане высокого давления находим: T_{н_вд} = wprTSP(P_{б_вд} · 10⁶) - 273,15 T_{н_вд} = 271 °С

h_{вд} = wprHSST(T_{н_вд} + 273,15) · 10⁻³ h_{вд} = 2789 $\frac{кДж}{кг}$

Принимаю величину недогрева перегретого пара высокого давления: θ_{пе_вд} = 30 °С

- параметры перегретого пара высокого давления: T_{пе_вд} = T_{к-т} - θ_{пе_вд} T_{пе_вд} = 518 - 30 T_{пе_вд} = 488 °С

h_{пе_вд} = wprHPT(P_{пе_вд} · 10⁶, T_{пе_вд} + 273,15) · 10⁻³

h_{пе_вд} = f(5,5 МПа, 488 °С) h_{пе_вд} = 3400 $\frac{кДж}{кг}$

- температура газов за испарительной поверхностью высокого давления.

Принимаю значение недогрева: θ₁ = 8 °С

T₂ = T_{н_вд} + θ₁ T₂ = 271 + 8 T₂ = 279 °С

- при температуре T₂ = 279 °С определяем энтальпию газов (μ_r = 28,42 $\frac{г}{моль}$):

$$\mu_{h_2} = f(\beta_r, T_2) = f(1,16, 279 °С) \quad \mu_{h_2} = 8125,7 + \frac{8434,8 - 8125,7}{10} \cdot (T_2 - 270) \quad \mu_{h_2} = 8395,6 \quad \frac{кДж}{кмоль}$$

$$h_2 = \frac{\mu_{h_2}}{\mu_r} \quad h_2 = \frac{8395,6}{28,42} \quad h_2 = 295 \quad \frac{кДж}{кг}$$

- коэффициент рассеивания: ϕ = 0,996

- параметры питательной воды за экономайзером высокого давления:

$$T_{эк_ввк} = T_{н_вд} - 3 \quad T_{эк_ввк} = 271 - 3 \quad T_{эк_ввк} = 268 \quad °С$$

$$P_{эк_ввк} = 1,14 \cdot P_{б_вд} \quad P_{эк_ввк} = 1,14 \cdot 5,57 \quad P_{эк_ввк} = 6,35 \quad МПа$$

$$h_{эк_ввк} = wprHPT(P_{эк_ввк} \cdot 10^6, T_{эк_ввк} + 273,15) \cdot 10^{-3} \quad h_{эк_ввк} = 1173 \quad \frac{кДж}{кг}$$

- расход пара, генерируемого в контуре высокого давления:

$$D_{пе_вд} = \frac{G_{к-т}(h_{к-т} - h_2)\phi}{(h_{пе_вд} - h_{эк_ввк})} \quad D_{пе_вд} = \frac{91,1(563,5 - 296) \cdot 0,996}{(3400 - 1173)} \quad D_{пе_вд} = 10,92 \quad \frac{кг}{с}$$

- параметры газовой среды за парогенератором высокого давления:

$$h_1 = h_{к-т} - \frac{D_{пе_вд}(h_{пе_вд} - h_{вд})}{G_{к-т}\phi} \quad h_1 = 563,5 - \frac{10,92(3400 - 2789)}{91,1 \cdot 0,996} \quad h_1 = 490 \quad \frac{кДж}{кг}$$

$$\beta_r = 1,16 \quad \mu_r = 28,42 \quad \frac{г}{моль} \quad \mu_r \cdot h_1 = 13921 \quad \frac{кДж}{кмоль}$$

$$T_1 = f(\beta_r, \mu_r \cdot h_1) \quad T_1 = 453,7 \quad °С$$

- количество теплоты, передаваемое в парогенераторе высокого давления:

$$Q_{пе_вд} = G_{к-т}(h_{к-т} - h_1)\phi \quad Q_{пе_вд} = 91,1(563,5 - 490) \cdot 0,996 \quad Q_{пе_вд} = 6675 \quad кВт$$

2.1.2. Испаритель высокого давления.

- уравнение теплового баланса: G_{к-т}(h₁ - h₂)ϕ = D_{пе_вд}(h_{вд} - h_{эк_ввк})

- количество теплоты, передаваемое в испарителе высокого давления:

$$Q_{и_вд} = G_{к-т}(h_1 - h_2)\phi \quad Q_{и_вд} = 91,1(490 - 295,5) \cdot 0,996 \quad Q_{и_вд} = 17642 \quad кВт$$

2.1.3. Экономайзер высокого давления.

- уравнение теплового баланса: G_{к-т}(h₂ - h₃)ϕ = D_{пе_вд}(h_{эк_ввк} - h_{гпкн})

- оцениваем давление воды перед питательным насосом высокого давления, которое равно давлению насыщения в барабане низкого давления:

Давление перегретого пара контура низкого давления: P_{пе_нд} = 0,63 МПа

$$P_{б_нд} = 1,02 \cdot P_{пе_нд} \quad P_{б_нд} = 1,02 \cdot 0,63 \quad P_{б_нд} = 0,64 \quad МПа$$

- давление воды за питательным электронасосом: P_{гпкн} = 1,15 · P_{б_нд} P_{гпкн} = 1,15 · 5,57 P_{гпкн} = 6,40 МПа

примем в первом приближении КПД насоса: η_н = 0,85

- параметры воды перед питательным электронасосом: P_{б_нд} = 0,64 МПа

$$T_{н_нд} = wprTSP(P_{б_нд} \cdot 10^6) - 273,15 \quad T_{н_нд} = 162 \quad °С$$

$$h'_{н_нд} = wprHSWT(T_{н_нд} + 273,15) \cdot 10^{-3} \quad h'_{н_нд} = 682,2 \quad \frac{кДж}{кг}$$

- подогрев воды в питательном электронасосе:

$$\tau_{гпкн} = \frac{(P_{гпкн} - P_{б_нд}) \cdot v_{ср} \cdot 10^3}{\eta_n} \quad \tau_{гпкн} = \frac{(6,40 - 0,64) \cdot 0,0011 \cdot 10^3}{0,85} \quad \tau_{гпкн} = 7,5 \quad \frac{кДж}{кг}$$

- параметры воды за питательным электронасосом: P_{гпкн} = 6,40 МПа

$$h_{гпкн} = h'_{н_нд} + \tau_{гпкн} \quad h_{гпкн} = 682,2 + 7,5 \quad h_{гпкн} = 689,7 \quad \frac{кДж}{кг}$$

$$T_{гпкн} = wprTRH(P_{гпкн} \cdot 10^6, h_{гпкн} \cdot 10^5) - 273,15 \quad T_{гпкн} = 162 \quad °С$$

- параметры газовой среды за экономайзером высокого давления:

$$h_3 = h_2 - \frac{D_{пе_вд}(h_{эк_ввк} - h_{гпкн})}{G_{к-т}\phi} \quad h_3 = 295,5 - \frac{10,92(1173 - 689,7)}{91,1 \cdot 0,996} \quad h_3 = 237 \quad \frac{кДж}{кг}$$

$$\beta_r = 1,16 \quad \mu_r = 28,42 \quad \frac{г}{моль} \quad \mu_r \cdot h_3 = 6742 \quad \frac{кДж}{кмоль}$$

$$T_3 = f(\beta_r, \mu_r \cdot h_3) \quad T_3 = 225 \quad °С$$

- количество теплоты, передаваемое в экономайзере высокого давления:

$$Q_{эк_вд} = G_{к-т}(h_2 - h_3)\phi \quad Q_{эк_вд} = 91,1(295,5 - 237) \cdot 0,996 \quad Q_{эк_вд} = 5280 \quad кВт$$

2.2. Контур низкого давления.

2.2.1. Пароперегреватель низкого давления.

- уравнение теплового баланса: G_{к-т}(h₃ - h₄)ϕ = D_{пе_нд}(h_{пе_нд} - h_{вд})

- параметры перегретого пара низкого давления: T_{пе_нд} = 213 °С

$$P_{пе_нд} = 0,63 \cdot P_{б_нд} \quad P_{пе_нд} = 0,63 \cdot 0,64 \quad P_{пе_нд} = 0,40 \quad МПа$$

$$h_{пе_нд} = wprHPT(P_{пе_нд} \cdot 10^6, T_{пе_нд} + 273,15) \cdot 10^{-3} \quad h_{пе_нд} = 2878 \quad \frac{кДж}{кг}$$

- давление пара в барабане низкого давления: P_{б_нд} = 0,64 МПа

- по давлению пара в барабане низкого давления находим: h_{вд} = wprHSST(T_{н_нд} + 273,15) · 10⁻³ h_{вд} = 2759 $\frac{кДж}{кг}$

- температура газов за испарителем низкого давления.

Принимаю значение недогрева: θ₂ = 9 °С

T₅ = T_{н_нд} + θ₂ T₅ = 162 + 9 T₅ = 171 °С

- при температуре T₅ = 171 °С определяем энтальпию газов:

$$\beta_r = 1,16 \quad \mu_r = 28,42 \quad \frac{г}{моль} \quad \mu_{h_5} = f(\beta_r, T_5)$$

$$\mu_{h_5} = 5088 \quad \frac{кДж}{кмоль} \quad h_5 = \frac{\mu_{h_5}}{\mu_r} \quad h_5 = \frac{5088}{28,42} \quad h_5 = 179 \quad \frac{кДж}{кг}$$

2.2.2. Испаритель низкого давления.

- уравнение теплового баланса: G_{к-т}(h₄ - h₅)ϕ = (D_{пе_нд} + D_{дезар})(h_{нд} - h_{гпкннд})

- давление воды за циркуляционным электронасосом низкого давления:

$$P_{гпкннд} = 1,15 \cdot P_{б_нд} \quad P_{гпкннд} = 1,15 \cdot 0,64 \quad P_{гпкннд} = 0,74 \quad МПа$$

- параметры воды в барабане низкого давления: T_{н_нд} = 162 °С h_{нд} = 682 $\frac{кДж}{кг}$

- энтальпия воды за циркуляционным электронасосом низкого давления (т.к. повышение давления в питательном насосе низкого давления не велико, то и нагрев в воде нем можно не учитывать):

$$h_{гпкннд} = h_{нд} \quad h_{гпкннд} = 682 \quad \frac{кДж}{кг}$$

Деаэратор питательной воды встроен в барабан низкого давления

- уравнение теплового баланса:

$$(D_0_вд + D_0_нд) \cdot h_{гпкн_ввк} + D_{дезар} \cdot h'_{нд} = (D_{пе_вд} + D_{пе_нд} + D_{дезар}) \cdot h_{нд}$$

- уравнение материального баланса: D_{0_вд} + D_{0_нд} + D_{дезар} = D_{пе_вд} + D_{пе_нд} + D_{дезар}

Принимаю температуру воды за ГПК котла-утилизатора: T_{гпк_ввк} = T_{н_нд} - 11 T_{гпк_ввк} = 161,5 - 11 T_{гпк_ввк} = 150,5 °С

Давление воды за ГПК: P_{гпк_ввк} = 1,1 МПа

- энтальпия воды за ГПК: h_{гпк_ввк} = wprHPT(P_{гпк_ввк} · 10⁶, T_{гпк_ввк} + 273,15) · 10⁻³ h_{гпк_ввк} = 635 $\frac{кДж}{кг}$

Принимаю, что потери рабочего тела на участке котёл-утилизатор - паровая турбина отсутствуют. Тогда:

- расход пара высокого давления в голову турбины: D_{0_вд} = D_{пе_вд} D_{0_вд} = 10,92 $\frac{кг}{с}$

- расход пара низкого давления на турбину: D_{0_нд} = D_{пе_нд}

Составим систему уравнений

Первое приближение: D_{пе_нд} = 2 $\frac{кг}{с}$ D_{дезар} = 0,2 $\frac{кг}{с}$ D_{0_нд} = D_{пе_нд} h₄ = 250 $\frac{кДж}{кг}$
Given

$$G_{к-т}(h_3 - h_4)\phi = D_{пе_нд}(h_{пе_нд} - h_{нд})$$

$$G_{к-т}(h_4 - h_5)\phi = (D_{пе_вд} + D_{дезар}) \cdot (h_{нд} - h_{гпкннд})$$

$$(D_0_вд + D_0_нд) \cdot h_{гпкн_ввк} + D_{дезар} \cdot h'_{нд} = (D_{пе_вд} + D_{пе_нд} + D_{дезар}) \cdot h_{нд}$$

$$D_0_вд + D_0_нд + D_{дезар} = D_{пе_вд} + D_{пе_нд} + D_{дезар}$$

Ответ = Find(h₄, D_{пе_нд}, D_{0_нд}, D_{дезар}) Ответ = $\begin{pmatrix} 234,488 \\ 2,125 \\ 2,125 \\ 0,297 \end{pmatrix}$

Значит

- расход перегретого пара контура низкого давления: D_{пе_нд} = Ответ₁ D_{пе_нд} = 2,12 $\frac{кг}{с}$

- расход пара контура низкого давления на турбину: D_{0_нд} = D_{пе_нд} D_{0_нд} = 2,12 $\frac{кг}{с}$

- расход пара на деаэрацию: D_{дезар} = Ответ₃ D_{дезар} = 0,297 $\frac{кг}{$

"Q-t" диаграмма котла-утилизатора

