

Расчет процессов сжигания топлива

Расчет начинают с определения состава топлива, его теплоты сгорания, теоретических и действительных объемов воздуха, необходимого для горения топлива, и объемов продуктов сгорания.

Рабочий состав для заданного вида твердого и жидкого топлива определяется по таблицам. Из этих таблиц выписываются элементный состав топлива в % на рабочую массу и низшая теплота сгорания. Теоретическое количество воздуха, необходимое для горения твердого и жидкого топлива, $V^0, \text{м}^3/\text{кг}$, рассчитывается по формуле:

$$V^0 = 0,0889K^p + 0,265H^p - 0,033O^p,$$

где $K^p = C^p + 0,375 S^p_{op+k}$.

При применении газообразного топлива используется формула

$$V^0 = 0,0476(0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum (m + \frac{n}{4})C_mH_n - O_2), \text{м}^3/\text{м}^3$$

Теоретический объем азота в продуктах сгорания:

$$V^0_{N_2} = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^p}{100}, \text{м}^3/\text{кг} \text{ или } \text{м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем водяных паров в продуктах сгорания при сжигании твердого и жидкого топлива:

$$V^0_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0, \text{м}^3/\text{кг}$$

То же при сжигании газообразного топлива:

$$V^0_{H_2O} = 0,01(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_mH_n + 0,124d_r) + 0,0161V^0, \text{м}^3/\text{м}^3,$$

d_r – влагосодержание газа (принимается равным $10 \text{ г}/\text{м}^3$).

Объем трехатомных газов в продуктах сгорания при сжигании жидкого и твердого топлива:

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^p + 0,375 S^p_{op+k}}{100}, \text{м}^3/\text{кг}$$

То же при сжигании газа:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + H_2S + CO + \sum m C_mH_n), \text{м}^3/\text{м}^3.$$

При определении действительных объемов воздуха и продуктов сгорания коэффициенты избытка в топке и газоходы – по таблицам нормативного метода.

Последовательность дальнейших расчетов и рекомендуемая форма их оформления представлены в табл.1.

Таблица 1

Состав продуктов сгорания

Величина	Раз- мер- ность	Расчетная формула	Элементы котла				
			Зона горе- ния	Топка	I кот. пучок	II кот. пучок	Эко- но- май- зер
Коэффициент избытка воздуха после поверхности нагрева	-	α_i''					
Объем водяных паров	м ³ /кг	$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{cp} - 1) \cdot V^0$					
Полный объем продук- тов сгорания	м ³ /кг	$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{cp} - 1)V^0$					
Объемная доля трехатомных газов	-	$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_r}$					
Объемная доля водяных паров	-	$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r}$					
Суммарная объемная доля	-	$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$					

Пример расчета

1) Состав топлива

Тип топлива: Природный газ

Газопровод: Карадаг-Тбилиси-Ереван

$CH_4 = 91,9 \%$

$C_2H_6 = 2,1 \%$

$C_3H_8 = 1,3 \%$

$C_4H_{10} = 0,4 \%$

$C_5H_{12} = 0,1 \%$

$$N_2 = 3,0 \%$$

$$CO_2 = 1,2 \%$$

$$H_2S = 0\%$$

$$O_2 = 0\%$$

$$CO = 0\%$$

$$H_2 = 0\%$$

$$Q_H^c = 8630 \text{ ккал/м}^3 = 36159.7 \text{ кДж/м}^3$$

$$\rho_r^c = 0,786 \text{ кг/м}^3$$

2) Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания

Теоретическое количество воздуха, необходимое для горения газообразного топлива:

$$V^o = 0,0476 \cdot (0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \Sigma[(m + (n/4)) \cdot C_mH_n - O_2]), \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V^o = 0,0476 \cdot [((1 + (4/4)) \cdot 91,9) + ((2 + (6/4)) \cdot 2,1) + ((3 + (3/4)) \cdot 1,3) + ((4 + (10/4)) \cdot 0,4) + ((5 + (12/4)) \cdot 0,1)] = 9.5700 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретический объем азота в продуктах сгорания:

$$V_{N_2}^o = 0,79V^o + N^p/100 = 0,79 \cdot 9,57 + 3/100 = 7,5903 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Теоретический объем водяных паров в продуктах сгорания:

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot (H_2S + H_2 + \Sigma[(n/2) \cdot C_mH_n] + 0,124d_r) + 0,0161V^o, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot [(4/2) \cdot 91,9 + (6/2) \cdot 2,1 + (8/2) \cdot 1,3 + (10/2) \cdot 0,4 + (12/2) \cdot 0,1 + 0,124 \cdot 10] + 0,0161 \cdot 9.57 = 2,1455 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретический объем трехатомных газов в продуктах сгорания топлива:

$$V_{RO_2}^o = 0,01 \cdot (CO_2 + H_2S + CO + \Sigma(m \cdot C_mH_n)) = 0,01 \cdot (1,2 + (1 \cdot 91,9) + (2 \cdot 2,1) + (3 \cdot 1,3) + (4 \cdot 0,4) + (5 \cdot 0,1)) = 1,0128 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретический полный объем продуктов сгорания:

$$V_r^o = V_{H_2O}^o + V_{N_2}^o + V_{RO_2}^o = 2,1455 + 7,5903 + 1,0128 = 10,7486 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Коэффициенты избытка воздуха в топке, и величины присосов воздуха в топку и газоходы:

$$\alpha_r = 1,1$$

$$\Delta\alpha_r = 0,1$$

$$\Delta\alpha_I = 0,05$$

$$\Delta\alpha_{II} = 0,1$$

$$\Delta\alpha_{\text{ЭК}} = 1,1$$

$$\alpha_{\text{T}}^{\prime\prime} = \alpha_{\text{T}} + \Delta\alpha_{\text{T}} = 1,05 + 0,08 = 1,13$$

$$\alpha_{\text{I}}^{\prime\prime} = \alpha_{\text{T}}^{\prime\prime} + \Delta\alpha_{\text{I}} = 1,13 + 0,05 = 1,18$$

$$\alpha_{\text{II}}^{\prime\prime} = \alpha_{\text{I}}^{\prime\prime} + \Delta\alpha_{\text{II}} = 1,18 + 0,1 = 1,28$$

$$\alpha_{\text{ЭК}}^{\prime\prime} = \alpha_{\text{II}}^{\prime\prime} + \Delta\alpha_{\text{ЭК}} = 1,28 + 0,1 = 1,38$$

Средние коэффициенты избытка воздуха:

$$\alpha_{\text{T}}^{\text{CP}} = (\alpha_{\text{T}} + \alpha_{\text{T}}^{\prime\prime})/2 = (1,08 + 1,13)/2 = 1,109$$

$$\alpha_{\text{I}}^{\text{CP}} = (\alpha_{\text{T}}^{\prime\prime} + \alpha_{\text{I}}^{\prime\prime})/2 = (1,13 + 1,18)/2 = 1,155$$

$$\alpha_{\text{II}}^{\text{CP}} = (\alpha_{\text{I}}^{\prime\prime} + \alpha_{\text{II}}^{\prime\prime})/2 = (1,18 + 1,28)/2 = 1,23$$

$$\alpha_{\text{ЭК}}^{\text{CP}} = (\alpha_{\text{II}}^{\prime\prime} + \alpha_{\text{ЭК}}^{\prime\prime})/2 = (1,28 + 1,38)/2 = 1,33$$

Объем водяных паров:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha-1) \cdot V^0, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 + 0,0161(1,109-1) \cdot 10,7486 = 2,1594 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 + 0,0161(1,155-1) \cdot 10,7486 = 2,1694 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 + 0,0161(1,23-1) \cdot 10,7486 = 2,1809 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 + 0,0161(1,33-1) \cdot 10,7486 = 2,1963 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Полный объем продуктов сгорания:

$$V_{\text{Г}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha-1) \cdot V^0, \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{Г}} = 1,0128 + 7,5903 + 2,231 + (1,109-1) \cdot 10,7486 = 11,6238 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{Г}} = 1,0128 + 7,5903 + 2,243 + (1,155-1) \cdot 10,7486 = 12,2559 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{Г}} = 1,0128 + 7,5903 + 2,256 + (1,23-1) \cdot 10,7486 = 12,9851 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{Г}} = 1,0128 + 7,5903 + 2,270 + (1,33-1) \cdot 10,7486 = 13,9575 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Объемная доля трехатомных газов:

$$\Gamma_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2}/V_{\text{Г}}$$

$$\Gamma_{\text{RO}_2} = 1,0128 / 11,6238 = 0,0871$$

$$\Gamma_{\text{RO}_2} = 1,0128 / 12,2559 = 0,0826$$

$$\Gamma_{\text{RO}_2} = 1,0128 / 12,9851 = 0,078$$

$$\Gamma_{\text{RO}_2} = 1,0128 / 13,9575 = 0,0726$$

Объемная доля водяных паров:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{Г}}$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 / 11,6238 = 0,1858$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 / 12,2559 = 0,1770$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 / 12,9851 = 0,1679$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 2,1455 / 13,9575 = 0,1574$$

Суммарная объемная доля:

$$\Gamma_n = \Gamma_{\text{RO}_2} + \Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$r_n = 0,0871 + 0,1858 = 0,2729$$

$$r_n = 0,0826 + 0,1770 = 0,2596$$

$$r_n = 0,078 + 0,1679 = 0,2459$$

$$r_n = 0,0726 + 0,1574 = 0,2300$$

Состав продуктов сгорания

	Величина	Размерность	Расчетная формула	Элемент котла			
				топка	I кот. пучок	II кот. пучок	Экономайзер
1	Коэффициенты избытка воздуха после поверхности нагрева	-	α_i''	1,13	1,18	1,28	1,38
2	Средний коэффициент избытка воздуха	-	$\alpha_i^{\text{cp}} = (\alpha_i' + \alpha_i'')/2$	1,09	1,155	1,23	1,33
3	Объем водяных паров	м ³ /кг	$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha - 1) \cdot V^0$	2,1594	2,1694	2,1809	2,1963
4	Полный объем продуктов сгорания	м ³ /кг	$V_{\Gamma} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1) \cdot V^0$	11,6238	12,2559	12,9851	13,9575
5	Объемная доля трехатомных газов	-	$\Gamma_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2}/V_{\Gamma}$	0,0871	0,0826	0,078	0,0726
6	Объемная доля водяных паров	-	$\Gamma_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\Gamma}$	0,1858	0,1770	0,1679	0,1574
7	Суммарная объемная доля	-	$\Gamma_n = \Gamma_{\text{RO}_2} + \Gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	0,2729	0,2596	0,2459	0,2300

Энтальпия теоретически необходимого объема воздуха вычисляется по формуле

$$I_B^0 = V^0 C_B t_B, \text{ кДж/кг, кДж/м}^3,$$

C_B – теплоемкость воздуха в зависимости от температуры.

Энтальпия теоретического объема продуктов сгорания:

$$I_r^0 = (V_{RO_2} C_{RO_2} + V_{H_2O} C_{H_2O} + V_{N_2} C_{N_2}) \cdot V, \text{ кДж/кг, кДж/м}^3,$$

C_{RO_2} , C_{H_2O} , C_{N_2} – теплоемкость трехатомных газов, водяных паров и азота (принимается в зависимости от температуры).

Энтальпия действительного объема продуктов сгорания:

$$I_r = I_r^0 + (\alpha - 1) I_B^0, \text{ кДж/кг, кДж/м}^3.$$

При сжигании твердого топлива энтальпия золы в газообразных продуктах сгорания учитывается в тех случаях, когда

$$\frac{10^3 \cdot A^P \cdot a_{ун}}{Q_H^P} \geq 1,43,$$

$a_{ун}$ - доля уноса золы из топки с продуктами сгорания, принимается по нормативному методу.

При необходимости учета энтальпии золы уноса в продуктах сгорания она рассчитывается по формуле

$$I_{зл} = (C_{зл} \cdot t_{зл}) \cdot \frac{A}{100} a_{ун},$$

$(C_{зл} \cdot t_{зл})$ – удельная энтальпия золы (принимается по табл. XIII нормативного метода).

Тогда энтальпия запыленных продуктов сгорания

$$I_r = I_r^0 + (\alpha - 1) I_B^0 + I_{зл}$$

Для удобства последующих расчетов рекомендуется результаты вычислений свести в табл. 9.

Таблица 9

Энтальпия воздуха и продуктов сгорания, кДж/кг и кДж/м³

Поверхность нагрева и коэффициент избытка воздуха	Температура, °С	I_r^0	I_B^0	$(\alpha - 1) \cdot I_B^0$	I_r	$I_{зл}$
Зона горения						
Топочная камера $\alpha_r = \dots$	2000					
	1800					
	1600					
	1200					
	1100					

	900					
I котельный пучок $\alpha''_I = \alpha_T + \Delta\alpha_T$	800 700 600 500					
II котельный пучок $\alpha''_{II} = \alpha'_I + \Delta\alpha_{II}$	500 400 300 200					
Экономайзер $\alpha''_{эк} = \alpha_{ух} = \alpha''_{II} + \Delta\alpha_{эк}$	400 300 200 100					

Пример расчета

Расчет энтальпий объемов воздуха и продуктов сгорания:

Энтальпия теоретически необходимого объема воздуха:

$$I_B^{\circ} = V^{\circ} \cdot C_B \cdot t_B, \text{ кДж/ м}^3$$

$$\begin{aligned}
 I_B^{\circ} (2000^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3667 \cdot 4,19) \cdot 2000 = 29341.62 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (1800^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3625 \cdot 4,19) \cdot 1800 = 26166.29 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (1600^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3587 \cdot 4,19) \cdot 1600 = 23013.63 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (1400^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3542 \cdot 4,19) \cdot 1400 = 19882.63 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (1200^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3490 \cdot 4,19) \cdot 1200 = 16789.61 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (1100^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3483 \cdot 4,19) \cdot 1100 = 15358.89 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (900^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3403 \cdot 4,19) \cdot 900 = 13793.37 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (800^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3371 \cdot 4,19) \cdot 800 = 10817.93 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (700^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3338 \cdot 4,19) \cdot 700 = 9371.90 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (600^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3303 \cdot 4,19) \cdot 600 = 7946.93 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (500^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3268 \cdot 4,19) \cdot 500 = 6550.67 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (400^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3233 \cdot 4,19) \cdot 400 = 5186.94 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (300^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3206 \cdot 4,19) \cdot 300 = 3855.94 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (200^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3181 \cdot 4,19) \cdot 200 = 2551.36 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (130^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3168 \cdot 4,19) \cdot 130 = 1653.26 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (100^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3163 \cdot 4,19) \cdot 100 = 1268.36 \text{ кДж/ м}^3 \\
 I_B^{\circ} (30^{\circ}\text{C}) &= 10,7486 \cdot (0,3154 \cdot 4,19) \cdot 30 = 426.13 \text{ кДж/ м}^3 \quad (= I_{XB}^{\circ})
 \end{aligned}$$

Энтальпия теоретического объема продуктов сгорания:

$$I_{\Gamma}^{\circ} = (V_{\text{RO}_2} \cdot C_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^{\circ} \cdot C_{\text{N}_2}) \cdot t_{\text{в}}, \text{кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (2000^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5785 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4688 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3541 \cdot 4,19)) \cdot 2000 = 35865.59 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (1800^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5712 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4589 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3508 \cdot 4,19)) \cdot 1800 = 31872.9 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (1600^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5626 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4481 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3470 \cdot 4,19)) \cdot 1600 = 27957.34 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (1400^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5526 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4366 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3427 \cdot 4,19)) \cdot 1400 = 24035.79 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (1200^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5407 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4244 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3378 \cdot 4,19)) \cdot 1200 = 20219.97 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (1100^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5388 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4180 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3352 \cdot 4,19)) \cdot 1100 = 18347.10 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (900^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5181 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,4050 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3295 \cdot 4,19)) \cdot 900 = 14689.72 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (800^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,5090 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3984 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3265 \cdot 4,19)) \cdot 800 = 12899.74 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (700^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4988 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3920 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3233 \cdot 4,19)) \cdot 700 = 11147.16 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (600^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4875 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3857 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3201 \cdot 4,19)) \cdot 600 = 9428.24 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (500^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4760 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3797 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3171 \cdot 4,19)) \cdot 500 = 7758.24 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (400^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4609 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3739 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3144 \cdot 4,19)) \cdot 400 = 6125.66 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (300^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4449 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3684 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3121 \cdot 4,19)) \cdot 300 = 4538.59 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (200^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4269 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3636 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3104 \cdot 4,19)) \cdot 200 = 2990.89 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (130^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4123 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3607 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3098 \cdot 4,19)) \cdot 130 = 1933.22 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (100^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,4061 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3595 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3095 \cdot 4,19)) \cdot 100 = 1479.89 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma}^{\circ} (30^{\circ}\text{C}) = (1.0128 \cdot (0,3893 \cdot 4,19) + 2.1455 \cdot (0,3577 \cdot 4,19) + 7.5903 \cdot (0,3093 \cdot 4,19)) \cdot 30 = 441.13 \text{ кДж/ м}^3$$

Энтальпия действительного объема продуктов сгорания:

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^{\circ} + (\alpha - 1) \cdot I_{\text{в}}^{\circ}, \text{кДж/ м}^3$$

Топочная камера:

$$I_{\Gamma} (2000^{\circ}\text{C}) = 35865.59 + (1,1 - 1) \cdot 29341.62 = 37332.67 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma} (1800^{\circ}\text{C}) = 31872.9 + (1,1 - 1) \cdot 26166.29 = 33181.21 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma} (1600^{\circ}\text{C}) = 27957.34 + (1,1 - 1) \cdot 23013.63 = 29108.04 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_{\Gamma} (1400^{\circ}\text{C}) = 24035.79 + (1,1 - 1) \cdot 19882.63 = 25029.92 \text{ кДж/ м}^3$$

$$I_r(1200^\circ\text{C}) = 20219.97 + (1,13 - 1) \cdot 16789.61 = 23102.62 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(1100^\circ\text{C}) = 18347.10 + (1,13 - 1) \cdot 15358.89 = 20343.76 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(900^\circ\text{C}) = 14689.72 + (1,13 - 1) \cdot 13793.37 = 16286.40 \text{кДж/ м}^3$$

I котельный пучок:

$$I_r(800^\circ\text{C}) = 12899.74 + (1,18 - 1) \cdot 10817.93 = 14306.07 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(700^\circ\text{C}) = 11147.16 + (1,18 - 1) \cdot 9371.90 = 12834.10 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(600^\circ\text{C}) = 9428.24 + (1,18 - 1) \cdot 7946.93 = 10859.37 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(500^\circ\text{C}) = 7758.24 + (1,18 - 1) \cdot 6550.67 = 8937.36 \text{кДж/ м}^3$$

II котельный пучок:

$$I_r(500^\circ\text{C}) = 7758.24 + (1,28 - 1) \cdot 6550.67 = 9264.89 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(400^\circ\text{C}) = 6125.66 + (1,28 - 1) \cdot 5186.94 = 9264.89 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(300^\circ\text{C}) = 4668,16 + (1,28 - 1) \cdot 3968,69 = 5623.74 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(200^\circ\text{C}) = 2990.89 + (1,28 - 1) \cdot 2625,16 = 3705.27 \text{кДж/ м}^3$$

Экономайзер:

$$I_r(400^\circ\text{C}) = 6125.66 + (1,38 - 1) \cdot 5186.94 = 8096.70 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(300^\circ\text{C}) = 4688,16 + (1,38 - 1) \cdot 3968,69 = 6011.3 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(200^\circ\text{C}) = 2990.89 + (1,38 - 1) \cdot 2625,16 = 3960.41 \text{кДж/ м}^3$$

$$I_r(100^\circ\text{C}) = 1479.89 + (1,38 - 1) \cdot 1268.36 = 1961.80 \text{кДж/ м}^3$$

Энтальпия воздуха и продуктов сгорания, кДж/ м³

Поверхность нагрева и коэффициент избытка воздуха	Температура, °C	I_r°	I_B°	$(\alpha-1) \cdot I_B^\circ$	I_r
Топочная камера $\alpha_r = 1,1$	2000	35865.59	29341.62	1467.08	37332.67
	1800	31872.90	26166.29	1308.31	33181.21
	1600	27957.34	23013.94	1150.70	29108.04
	1400	24035.79	19882.63	994.13	25029.92
Топочная камера $\alpha_r = 1,2$	1200	20919.97	16789.61	2182.65	23102.62
	1100	18347.1	15358.89	1998.66	20343.76
	900	14689.72	12282.14	1596.68	16286.40
I котельный пучок $\alpha_r = 1,25$	800	12899.74	10817.93	1406.33	14306.07
	700	11147.16	9371.90	1947.33	12834.10
	600	9428.92	7946.93	1686.94	10859.37
	500	7758.24	6550.67	1430.45	8937.36
II котельный пучок $\alpha_{II} = 1,35$	500	7759.24	6550.67	1834.19	9264.89
	400	6125.66	5186.94	1452.34	7578.00
	300	4538.59	3875.55	1085.15	5623.74
	200	2990.89	2551.36	714.38	3705.27
Экономайзер $\alpha_{ЭК} = 1,45$	400	6125.66	5336,15	1971.04	8096.70
	300	4538.59	3875.55	1472.71	6011.3

	200	2990.89	2551.36	969.52	3960.41
	100	1479.95	1268.03	481.85	1961.80

Расчет составляющих теплового баланса

На следующем этапе расчета составляется тепловой баланс.

Расчеты рекомендуется свести в таблицу по форме табл.2.

Таблица 2

Тепловой расчет котельного агрегата

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Расчетная формула, обоснование	Результат
1	2	3	4	5
<u>Тепловой баланс котла</u>				
Располагаемое тепло	Q_p^p	кДж/кг	$Q_n^p + i_{мл}$	
Температура уходящих газов	ϑ_{yx}	°С	Принимается по рекомендациям	
Энтальпия уходящих газов	I_{yx}	кДж/кг	По I-9	
Температура холодного воздуха	$t_{x.в}$	°С	Принимается по рекомендациям	
Энтальпия теоретического холодного воздуха	$I_{x.в}^0$	кДж/кг	По I-10	
Потеря тепла с уходящими газами	q_2	%	$\frac{I_{yx} - \alpha_{yx} I_{x.в}^0}{Q_p^p} \cdot \frac{100 - q_4}{100}$	
Потеря тепла от химической неполноты горения	q_3	%	Табл. XX [нормативный метод]	

Потеря тепла от механического недожога	q_4	%	Табл. XXI [нормативный метод]	
Потери тепла от наружного охлаждения	q_5	%	График 5-1 [нормативный метод]	
Потери тепла с физическим теплом шлаков	q_6	%	Формула (5-12) [нормативный метод]	
Сумма тепловых потерь	Σq	%	$q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$	
КПД котла	η	%	$100 - \Sigma q$	
Температура питательной воды	$t_{н.в.}$	°С	Принимается по исходным данным	
Энтальпия питательной воды	$i_{н.в.}$	кДж/кг		
Полезная мощность котельного агрегата	Q_1	кВт	$D(i'' - i'_{к.в.}) +$ $+ \frac{D \cdot \Pi}{100} (i'_{к.в.} - i'_{н.в.})$	
Расход топлива	B	кг/с	$\frac{Q_1 \cdot 100}{Q_p^p \cdot \eta}$	
Расчетный расход топлива (при сжигании тв. топлива)	B_p	кг/с	$\frac{B(100 - q_4)}{100}$	
Коэффициент сохранения тепла	φ	-	$1 - \frac{q_5}{\eta + q_5}$	

Пример расчета.

Рассчитываемая величина	Обоз.	Разм.	Расчетная формула	Расчет	Резул.
Располагаемая теплота	Q_p^p	кДж/ м ³	$Q_p^p = Q_n^p$	-	37123,4
Температура уходящих газов	t_{yx}	°С	Принимается по рекомендациям	-	130
Энтальпия уходящих газов	I_{yx}	кДж/ м ³	$I_{yx} = I_{yx}^o + (\alpha - 1) \cdot I_{yxв}^o$	$I_{yx} = 1985,15 + (1,45 - 1) \cdot 1699,38$	2749,87
Температура холодного воздуха	$t_{хв}$	°С	Принимается по рекомендациям	-	30
Энтальпия теоретического холодного воздуха	$I_{хв}^o$	кДж/ м ³	$I_{хв}^o = V^o \cdot C_{хв} \cdot t_{хв}$,	$9,848 \cdot (0,3154 \cdot 4,19) \cdot 30$	390,43
Потеря тепла с уходящими газами	q_2	%	$(I_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{хв}^o) / Q_p^p$	$2749,87 - 1,45 \cdot 390,45 / 37123,4$	5,88
Потери тепла от химической неполноты горения	q_3	%	Табл. XX [нормативный метод]	-	0,5
Потери тепла от механического недожога	q_4	%	Табл. XXI [нормативный метод]	-	0
Потери тепла от наружного ограждения	q_5	%	График 5-1 [нормативный метод]	-	2,3
Потери тепла с физическим теплом шлаков	q_6	%	Формула 5.12 [нормативный метод]	-	0
Сумма тепловых потерь	Σq	%	$q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$	$5,88 + 0,5 + 2,3$	8,68
КПД котла	η	%	$100 - \Sigma q$	$100 - 8,68$	91,32
Температура питательной воды	$t_{пв}$	°С	Принимается по исходным данным	-	100
Энтальпия питательной воды	$i_{пв}$	кДж/ кг	$i_{пв} = C_{пв} \cdot t_{пв}$	$4,19 \cdot 100$	419

Полезная мощность котельного агрегата	Q_1	кВт	$D(i'' - i_{пв}) + [П/100 \cdot D(i' - i_{пв})]$	$1,8(2784,9 - 419) + [5/100 \cdot 1,8(826 - 419)] \cdot 1,1$	4669,14
Расход топлива, расчетный расход топлива	B, B_p	кг/с	$B = B_p = (Q_1 \cdot 100) / (Q_p^p \cdot \eta)$	$4669,14 \cdot 100 / (37123,4 \cdot 91,32)$	0,138
Коэффициент сохранения тепла	φ	-	$\varphi = 1 - (q_5 / \eta + q_5)$	$1 - (2,3/91,32 + 2,3)$	0,975

Невязки теплового баланса:

Абсолютная невязка теплового баланса:

$$\Delta Q = 0,138 [37123,4 \cdot 0,913 - (16717,7 + 13558,95 + 1924,53 + 2002,11)] = 42,72 \text{ кДж/кг}$$

Относительная невязка теплового баланса:

$$\frac{\Delta Q}{B_p \cdot Q_n^p \cdot \eta_{бр}} \cdot 100 = \frac{42,72}{0,138 \cdot 37123,4 \cdot 0,913} \cdot 100 = 0,09\% < 0,5\%$$

Расчет проведен верно, т.к. $0,1\% < 0,5\%$

Расчет теплообмена в топке котла

На следующем этапе рассчитывается теплообмен в топке. Расчеты рекомендуется свести в таблицу по форме табл.3.

Таблица 3

Расчет топки				
Температура продуктов сгорания на выходе из топки	g_T''	°С	Принимается предварительно с последующим уточнением	
Энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки	I_T''	кДж/кг	По $I - g$	

Полезное тепловыделение в топке	Q_T	кДж/кг	$Q_H^p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4}{100} + Q_B$	
Теоретическая температура горения	g_a	°С	По I-9	
Коэффициент загрязнения поверхностей нагрева	ξ	-	Табл. 2-14 [2]	
Коэффициент тепловой эффективности экранов	ψ_{cp}	-	$\psi_{cp} = \xi \cdot \frac{\sum X_i \cdot F_{cmi}}{F_{cm}}$	
Эффективная толщина излучающего слоя	S	м	$3,6 \cdot \frac{g_T}{F_{cm}}$	
Коэффициент ослабления - трехатомными газами	K_2	1/(м·МПа)	$\left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{3,16\sqrt{P_H S}} - 1 \right) *$ $* \left(1 - 0,37 \frac{v_T^* + 273}{1000} \right)$	
- сажистыми частицами	K_c	1/(м·МПа)	$0,3(2 - \alpha_T) \cdot \left(1,6 \frac{g_T^* + 273}{1000} - 0,5 \right) \frac{c^p}{H^p}$	
- топочной средой (для газа и мазута)	K	1/(м·МПа)	$K_2 \cdot r_{л} + K_c$	
Степень черноты светящейся части факела	$a_{св}$	-	$1 - e^{-(K_2 \cdot r_{л} + K_c) \cdot pS}$	
Степень черноты несветящейся части факела	a_r	-	$1 - e^{-\kappa_2 \cdot r_n \cdot p \cdot S}$	
Коэффициент усреднения	m	-	Рис. 2.16 [2]	
Степень черноты факела	a_ϕ	-	$ma_{св} + (1 - m)a_r$	

Относительное положение максимума температуры в топке	X_T	-	$\frac{h_r}{H_T}$	
Коэффициент	M	-	$0,54 - 0,2 X_T$	
Степень черноты топки (газообразное топливо)	a_T	-	$\frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi) \cdot \varphi_{cp}}$	
Действительная температура продуктов сгорания на выходе из топки	ϑ_T''	°C	$\frac{T_a}{M \left(\frac{5,67 \varphi_{cp} F_{cm} a_T T_a^3}{10^{11} \varphi_{Bp} V_{Ccp}} \right)^{0,6} + 1} - 273$	
Энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки	I_T''	кДж/кг	По I-9	
Тепло, переданное излучением в топке	Q_l	кДж/кг	$\varphi (Q_T - I_T'')$	
Удельная нагрузка топочного объема	q_v	кВт/м ³	$\frac{B_p \cdot Q_p^n}{V_T}$	
Удельная нагрузка лучевоспринимающей поверхности нагрева	q_l	кВт/м ²	$\frac{B \cdot Q_l}{F_l}$	

Пример расчета

Рассчитываемая величина	Обоз.	Разм.	Расчетная формула	Расчет	Результат
Температура продуктов сгорания на выходе из	ϑ_T''	°C	Принимается предварительно с последующим уточнением	-	1000

топки					
Энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки	I_T	кДж/ м ³	Таблица I-в	-	18519,73
Полезное тепловыделение в топке	$Q_T = I_T$	кДж/ м ³	$\frac{100-q_3-q_4-q_6}{100-q_4} Q_p^p + Q_6$	$\frac{100-0,5}{100} 37123,4 + 1,2 * 390,4$	37406,3
Теоретическая температура горения	v_a	°С	Таблица I-в	-	1886,52
Коэффициент загрязнения поверхностей нагрева	ξ	-	Табл. 2-14 [нормативный метод]	-	0,65
Коэффициент тепловой эффективности экранов	Ψ_{cp}	-	$\xi \frac{H_d}{F_n}$	$0,65 \frac{24,05}{49,49}$	0,316
Эффективная толщина излучающего слоя	s	м	$3,6 \frac{V_T}{F_n}$	$3,6 \frac{20,56}{49,49}$	1,50
Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами	K_T	$\frac{1}{м * Mna}$	$\left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{3,16\sqrt{P_n S}} - 1 \right) * \left(1 - 0,37 \frac{g_m + 273}{1000} \right)$	$\left(\frac{7,8 + 16 * 0,178}{3,16\sqrt{0,1 * 0,262 * 1,50}} - 1 \right) * \left(1 - 0,37 \frac{1000 + 273}{1000} \right)$	8,40
Коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами	K_c	$\frac{1}{м * Mna}$	$0,3(2 - \alpha_m) * \left(1,6 \frac{g_m + 273}{1000} - 0,5 \right) * 0,12 \left(\sum \frac{1}{n} C_n H_m \right)$	$0,3(2 - 1,2) * \left(1,6 \frac{1000 + 273}{1000} - 0,5 \right) * 0,12 \left(\sum \frac{1}{4} 93,9 + \frac{2}{6} 3,1 + \frac{4}{10} 0,3 + \frac{5}{12} * 0,1 \right)$	1,47
Коэффициент ослабления лучей топочной средой	K	$\frac{1}{м * Mna}$	$K_T \cdot r_{п} + K_c$	$8,40 \cdot 0,262 + 1,47$	3,23
Степень черноты светящейся частицы факела	$a_{св}$	-	$1 - e^{-(K_c * r_n + K_c) * p * s}$	$1 - e^{-(8,40 \cdot 0,262 + 1,47) \cdot 0,1 \cdot 1,5}$	0,388
Степень черноты несветящейся частицы факела	a_r	-	$1 - e^{-K_c * r_n * p * s}$	$1 - e^{-8,40 \cdot 0,262 \cdot 0,1 \cdot 1,5}$	0,284
Коэффициент	m	-	Рис. 2-16	-	0,15

усреднения			[нормативный метод]		
Степень черноты факела	a_ϕ	-	$ma_{св} + (1-m) \cdot a_2$	$0,15 \cdot 0,388 + (1-0,15) \cdot 0,284$	0,3
Относительное положение максимума температуры в топке	X_T	-	h_T/H_T	1·2,375	0,421
Коэффициент	M	-	$0,54 - 0,2 \cdot X_T$	$0,54 - 0,2 \cdot 0,421$	0,456
Степень черноты топки	a_T	-	$\frac{a_\phi}{a_\phi + (1-a_\phi) \cdot \psi_{ср}}$	$0,3 / (0,3 + (1-0,3) \cdot 0,316)$	0,576
Действительная температура продуктов сгорания на выходе из топки	$\nu_T^{\ddot{}}$	°C	$\frac{T_a}{M \left(\frac{5,67 \cdot \psi_{ср} \cdot F_n \cdot a_m \cdot T_a^3}{10^{11} \cdot \varphi \cdot B_p \cdot V_{ср}} \right)^{0,6} + 1} - 273$	$\frac{1886,52 + 273}{0,456 \left(\frac{5,67 \cdot 0,316 \cdot 49,49 \cdot 0,576 \cdot 2159,22^3}{10^{11} \cdot 0,975 \cdot 0,138 \cdot 20,04} \right)^{0,6} + 1} - 273$	1018,7
Проверка	-	-	$\vartheta_{mp}^{\ddot{}} - \vartheta_m^{\ddot{}} \leq \pm 50^\circ C$	1019-1000	19 < 50
Энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки	$I_T^{\ddot{}}$	кДж/м ³	Таблица I-в	-	20259,9
Тепло, переданное излучением в топке	Q_L	кДж/м ³	$\varphi(Q_m - I_m^{\ddot{}})$	$0,975(37406,3 \cdot 20259,9)$	16717,7
Удельная нагрузка топочного объема	q_v	кДж/м ³ с	$\frac{B \cdot Q_H^p}{V_m}$	$\frac{0,138 \cdot 37123,4}{20,56}$	249,17
Удельная нагрузка лучевоспринимающей поверхности нагрева	q_L	кДж/м ²	$\frac{B \cdot Q_L}{F_n}$	$\frac{0,138 \cdot 16717,7}{49,49}$	46,52
Проверка	-	ккал/м ³ ч	$q_v < 250$	-	214,8 < 250
Проверка	-	%	$q_L < 0,5$	-	0,46 < 0,5

Объем топки:

$$V_T = V' + V_{кд} = 18,17 + 2,39 = 20,56 \text{ м}^3$$

$$V' = 2,44 \cdot 3,75 \cdot 2,18 - 0,25 \cdot 1,5 \cdot 2,18 - ((3,14 \cdot 0,5^2) / 2 \cdot 2,44) = 18,17 \text{ м}^3$$

$$V_{кд} = 0,522 \cdot 2,18 \cdot 2,1 = 2,39 \text{ м}^3$$

Полная поверхность стен топки:

$$F_{\text{п}} = 2 \cdot 3,75 \cdot 2,44 + 2,18 \cdot 3,75 + 1,43 \cdot 3,75 + 2 \cdot 0,25 \cdot 2,1 + 1,43 \cdot 2,1 + 2 \cdot 0,522 \cdot 2,1 + 2,1 \cdot 1,53 + 2,44 \cdot 2,18 + (2,44 \cdot 2,18 - 2,44) = 49,49 \text{ м}^2$$

Поверхность стен топки закрытая экранами:

$$F_{\text{э}} = 2 \cdot 3,75 \cdot 2,44 + 0,25 \cdot 2,1 + 0,522 \cdot 2,1 + 1,53 \cdot 2,1 = 23,13 \text{ м}^2$$

Расчетная поверхность нагрева в топке:

$$F_{1\text{р}} = 3,14 \cdot 0,051 \cdot 20 = 3,20 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{б}} = (3,14 \cdot 0,5^2) / 2 \cdot (2,44 + 0,522) = 1,16 \text{ м}^2$$

$$H_{\text{л}} = F_{\text{э}} \cdot x_{\text{э}} + F_{1\text{р}} \cdot x_{1\text{р}} + F_{\text{б}} \cdot x_{\text{б}} = 23,13 \cdot 0,92 + 3,20 \cdot 0,83 + 1,16 \cdot 0,1 = 24,05 \text{ м}^2$$

Вывод: так, как разность между действительной температурой продуктов сгорания на выходе из топки и принятой температурой в начале расчета входит в допустимый предел ± 50 °С, то расчет топки выполнен верно.

Из нормативных данных $q_{\text{в}} < 250$ ккал/м³ч, а по расчету $q_{\text{в}} = 214,8$ ккал/м³ч.

Из нормативных данных $q_{\text{л}} < 0,5$ %, а по расчету $q_{\text{л}} = 0,46$ %.

Аэродинамика котельного агрегата

При работе теплогенерирующей установки необходимо обеспечивать непрерывную подачу в топку воздуха, необходимого для горения топлива и удаления в атмосферу продуктов сгорания (дымовых газов) после их охлаждения и очистки. Газовоздушный тракт включает воздуховоды холодного и горячего воздуха, калориферы для подогрева воздуха перед воздухоподогревателем, вентиляторы, дымососы, золоуловители, газоходы, дымовые трубы, запорные и регулирующие органы. Различают следующие схемы газовоздушных трактов теплогенерирующих установок:

- а) с естественной тягой, создаваемой дымовой трубой;
- б) с подачей воздуха и удалением продуктов сгорания дымососом и трубой;
- в) с подачей воздуха вентилятором и удалением продуктов сгорания дымососом и трубой;
- г) с подачей воздуха отдельно в пылеприготовительную установку и топку с удалением продуктов сгорания дымососом и трубой;

д) с подачей воздуха вентилятором и удалением продуктов сгорания за счет давления в газовом тракте.

Сопротивления воздушного и газового трактов складываются из сопротивления трения и местных сопротивлений. Сопротивление трению, $\Delta h_{тр}$, рассчитывается по формуле

$$\Delta h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} - p,$$

где λ — коэффициент сопротивления трения; для металлических каналов и труб может быть принят равным 0,02, а для кирпичных — 0,04; l — длина участка, м; d — диаметр канала; при прямоугольных сечениях принимается эквивалентный диаметр $d_{эк} = 4f/u$; f — площадь живого сечения, м²; u — периметр сечения, м; w — скорость движения газов, м/с; p — плотность газов при данной температуре, кг/м³.

На следующем этапе рассчитывается теплообмен в конвективных пучках, экономайзере. Расчеты рекомендуется свести в таблицу по форме табл.4.

Таблица 4

Тепловой расчет котельного агрегата

Рассчитываемая величина	Обозначение	Размерность	Расчетная формула, обоснование	Результат
1	2	3	4	5
<u>Расчет первого газохода</u>				
Температура газа за газоходом	t_1''	°С	Принимается предварительно с последующим уточнением	
Энтальпия газов за первым газоходом	I_1''	кДж/кг	По $I - t$	
Тепловосприятие первого газохода	Q_1^δ	кДж/кг	$\varphi(I_1' - I_1'' + \Delta\alpha P_{хв})$	

Средний температурный напор	Δt_l	°C	$\frac{g'_1 - g''_1}{2,31g \frac{g'_1 - t_H}{g''_1 - t_H}}$	
Средняя температура газов в газоходе	g_{cp}	°C	$\frac{g'_1 + g''_1}{2}$	
Средняя скорость продуктов сгорания в газоходе	ω	м/с	$\frac{B_p V_r (g_{cp} + 273)}{f_{жсг} \cdot 273}$	
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{кл}$	Вт/(м ² ·К)	$\alpha_H \cdot C_t \cdot C_\phi \cdot C_s$ Номограмма XII [нормативный метод]	
Толщина излучающего слоя	S	м	$0,9d \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2} - 1 \right)$	
Коэффициент ослабления излучения трехатомными газами	K_Γ	1/(м·МПа)	$\left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{3,16\sqrt{P_H S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{g''_1 + 273}{1000} \right)$	
Суммарная оптическая толщина	KpS	-	$K_{r,п}pS$	
Степень черноты газового потока	a	-	$1 - e^{-KpS}$	
Температура загрязненной стенки	t_3	°C	$t_H + 60$	
Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_{л1}$	Вт/(м ² ·К)	$\alpha_H \cdot a \cdot C_r$ Номограмма 19 [нормативный метод]	
Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке	α_l	Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{кл} + \alpha_{л1}$	

Коэффициент тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева	ψ	-	Табл. 2.18 [тепловой расчет]	
Коэффициент теплопередачи	K_1	Вт/(м ² ·К)	$\psi \cdot \alpha_1$	
Тепловосприятие первого газохода	Q_1	кДж/кг	$\frac{K_1 H_1 \Delta t_1}{B_p \cdot 10^3}$	
Отношение тепловосприятий	$\frac{Q_1}{Q^{\delta}_1}$	%	$\frac{Q_1}{Q^{\delta}_1} \cdot 100$	
<u>Расчет второго газохода</u>				
Температура газа за газоходом	g''_{11}	°С	Принимается предварительно с последующим уточнением	
Энтальпия газов за вторым газоходом	I''_{11}	кДж/кг	По I-9	
Тепловосприятие второго газохода	Q^{δ}_{11}	кДж/кг	$\varphi(I'_2 - I''_2 + \Delta \alpha P_{xe})$	
Средний температурный напор	Δt_2	°С	$\frac{g'_{11} - g''_{11}}{2,31g \frac{g'_{11} - t_n}{g''_{11} - t_n}}$	
Средняя температура газов в газоходе	g_{cp}	°С	$\frac{g'_1 + g''_{11}}{2}$	
Средняя скорость продуктов сгорания в газоходе	ω_r	м/с	$\frac{B_p V_r (g_{cp} + 273)}{f_{жс2} \cdot 273}$	
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	α_2	Вт/(м ² ·К)	$\alpha_n \cdot C_t \cdot C_{\phi} \cdot C_s$ Номограмма XII [нормативный метод]	
Коэффициент теплопередачи	K_2	Вт/(м ² ·К)	$\psi \cdot \alpha_2$	

Тепловосприятие второго газохода	Q_2	кДж/кг	$\frac{K_2 H_2 \Delta t_2}{B_p 10^3}$	
Отношение тепловосприятий	$\frac{Q_2}{Q^{\delta_2}}$	%	$\frac{Q_{II}}{Q^{\delta_{II}}} \cdot 100$	

Пример расчета

Расчет I газохода:

Рассчитываемая величина	Обоз.	Разм.	Расчетная формула	Расчет	Результат
Температура газа за газоходом	t_1''	°C	Принимается предварительно с последующим уточнением	-	340
Энтальпия газов за первым газоходом	I_1''	кДж/м ³	Таблица I-в	-	6450,95
Тепловосприятие первого газохода	Q_1^{δ}	кДж/м ³	$\phi(I_1' - I_1'' + \Delta \alpha_1 \cdot I_{xg}^o)$	0,975(20259,96-6450,95+0,25·390,43)	13558,95
Средний температурный напор	Δt_1	°C	$\frac{g_1' - g_1''}{2,31g \frac{g_1'' - t_H}{g_1' - t_H}}$	$\frac{1019 - 340}{2,31g \frac{1019 - 194}{340 - 194}}$	392,52
Средняя температура газов в газоходе	t_{cp}	°C	$\frac{g_1' + g_1''}{2}$	$\frac{1019 + 340}{2}$	679,5
Средняя скорость продуктов сгорания в газоходе	w	м/с	$\frac{B_p \cdot V_e \cdot (g_{cp} + 273)}{f_{acc}^I \cdot 273}$	$\frac{0,138 \cdot 13,305 \cdot (679,5 + 273)}{1,03 \cdot 273}$	6,22
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{кл}$	Вт/м ² К	Номограмма XII, $\alpha_H \cdot C_z \cdot C_{\phi} \cdot C_s$	43·1·1,02·1·1,16	50,75
Толщина излучающего слоя	S	м	$0,9d \left(\frac{4}{\pi} * \frac{s_1 * s_2}{d^2} - 1 \right)$	$0,9 * 0,051 \left(\frac{4}{\pi} * \frac{0,1 * 0,11}{0,051^2} - 1 \right)$	0,2
Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами	K_{Γ}	$\frac{1}{м * Мпа}$	$\left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{3,16\sqrt{P_H S}} - 1 \right) * \left(1 - 0,37 \frac{g_1'' + 273}{1000} \right)$	$\left(\frac{7,8 + 16 * 0,169}{3,16\sqrt{0,1 * 0,248 * 0,2}} - 1 \right) * \left(1 - 0,37 \frac{340 + 273}{1000} \right)$	36,40
Суммарная оптическая	K_{pS}	-	$K_{\Gamma p} \cdot p \cdot S$	36,4·0,248·0,1·0,2	0,177

толщина					
Степень черноты газового потока	A	-	$1 - e^{-K \cdot p \cdot s}$	$1 - e^{-0,177}$	0,162
Температура загрязненной стенки	t ₃	°C	t _H +60	194+60	254
Коэффициент теплоотдачи излучением	α _{лп}	Вт/м ² К	Номограмма 19, α _H · a · C _T	76 · 0,162 · 0,985 · 1,16	14,01
Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке	α _I	Вт/м ² К	ξ(α _{кл} + α _{лп})	1(50,75 + 14,01)	64,76
Коэффициент тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева	ψ	-	-	-	0,85
Коэффициент теплопередачи	K _I	Вт/м ² К	$\frac{\omega \alpha_{кл} + \alpha_{лп}}{1 + \varepsilon(\omega \alpha_{кл} + \alpha_{лп})}$	$\frac{0,9 \cdot 50,75 + 14,01}{1 + 0,005(0,9 \cdot 50,75 + 14,01)}$	45,97
Тепловосприятие первого газохода	Q _I	кДж/ м ³	$\frac{K_I \cdot H_I \cdot \Delta T_I}{B_p \cdot 1000}$	$\frac{45,97 \cdot 105,69 \cdot 392,52}{0,138 \cdot 1000}$	13819,46
Отношение тепловосприятий	$\frac{Q_I}{Q_I^0}$	%	$\frac{Q_I}{Q_I^0} \cdot 100$	$\frac{13819,46}{13558,95} \cdot 100$	101,92
Проверка	-	-	$100 - \frac{Q_I}{Q_I^0} \cdot 100 \leq \pm 2\%$	100 - 101,92 ≤ ±2%	1,92 < 2

Выход: Отношение тепловосприятий входит в допустимый предел предел ±2%.
Расчет выполнен верно.

Расчет II газохода:

Рассчитываемая величина	Обоз.	Разм.	Расчетная формула	Расчет	Результат
Температура газа за газоходом	t _{II}	°C	-	Принимается предварительно	230
Энтальпия газов за вторым газоходом	I _{II}	кДж/ м ³	Таблица I-в	-	4631,70
Тепловосприятие второго газохода	Q _{II} ^б	кДж/ м ³	$\phi(I_{II} - I_{II}^0 + \Delta \alpha_{II} \cdot I_{xв}^0)$	0,975(6450,95- 4631,70+0,35 · 390,43)	1924,53

Средний температурный напор	Δt_{II}	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\vartheta_I^{\cdot} - \vartheta_I^{\cdot\cdot}}{2,31g \frac{\vartheta_I^{\cdot} - t_H}{\vartheta_I^{\cdot} - t_H}}$	$\frac{340 - 230}{2,31g \frac{340 - 194}{230 - 194}}$	86,68
Средняя температура газов в газоходе	ν_{cp}	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\vartheta_I^{\cdot} + \vartheta_I^{\cdot\cdot}}{2}$	$\frac{340 + 230}{2}$	285
Средняя скорость продуктов сгорания в газоходе	w	м/с	$\frac{B_p * V_z * (\vartheta_{cp} + 273)}{f_{жс}^I * 273}$	$\frac{0,138 * 14,056 * (285 + 273)}{0,68 * 273}$	5,9
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	α_{II}	Вт/м ² К	Номограмма XII, $\alpha_H \cdot C_z \cdot C_{\phi} \cdot C_s$	$42 \cdot 1 \cdot 1,08 \cdot 0,975 \cdot 1,16$	50,75
Коэффициент тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева	ψ	-	-	-	0,85
Коэффициент теплопередачи	K_{II}	Вт/м ² К	$\psi \cdot \alpha_{II}$	$0,85 \cdot 50,75$	43,14
Тепловосприятие второго газохода	Q_{II}	кДж/ м ³	$\frac{K_{II} * H_{II} * \Delta t_{II}}{B_p * 1000}$	$\frac{43,14 * 70,46 * 86,68}{0,138 * 1000}$	1909,31
Отношение тепловосприятий	$\frac{Q_{II}}{Q_{II}^{\delta}}$	%	$\frac{Q_{II}}{Q_{II}^{\delta}} * 100$	$\frac{1909,31}{1924,53} * 100$	99,2
Проверка	-	-	$100 - \frac{Q_{II}}{Q_{II}^{\delta}} * 100 \leq \pm 2\%$	$100 - 99,2 \leq \pm 2\%$	0,8 < 2

Вывод: Отношение тепловосприятий входит в допустимый предел $\pm 2\%$. Расчет выполнен верно.

Выбор оборудования

Насосы исходной воды должны обеспечить максимальный расход химически очищенной воды для питания паровых котлов, подпитку тепловой сети и дополнительный максимальный расход на промывку фильтров, т.е. производительность насоса

$$G_{иг} = G_{хим} + G_{отм}$$

Необходимый напор насосов исходной воды

$$p = \sum \Delta P_i + P_\delta,$$

где $\sum \Delta P_i \approx 300$ кПа – сумма потерь напора в пароводяном подогревателе, фильтрах 1 и 2 ступени, в подогревателе химически очищенной воды и т.д.

$P_\delta \approx 180$ кПа - напор, необходимый на подъем воды и ввод ее в деаэратор.

По рассчитанной производительности и напору выбирается тип насоса (табл.12). К установке принимаются два насоса, один из которых – резервный.

Таблица 12

Насосы центробежные консольные типа К

Марка насоса	Производительность, кг/с	Создаваемое давление, кПа	Мощность эл.двиг., кВт	Габаритные размеры		
				Выс о-та	Длин а	Шир и-на
2 К-6	2,76	0,34	5	322	794	600
	5,56	0,3	4,5	322	794	600
	8,3	0,24	4,5	322	794	600
3 К-8	8,3	0,34	7	433	927	700
	12,5	0,27	7	433	927	700
	15,0	0,27	7	433	927	700
4 К-18	16,7	0,25	10	433	933	700
	22,2	0,19	10	433	933	700
	27,8	0,19	10	433	933	700
6 К-8	44,4	0,32	78	600	1400	1000
8 К-12	80	0,29	82	655	1735	1000

Бак промывочной воды

Для взрыхляющей промывки Na-катионитовых фильтров 1 и 2 ступеней устанавливается бак промывочной воды, емкость которого, м³, равна

$$V_e = 1,3G_{взр}$$

Насос промывочной воды

Напор насоса для взрыхляющей промывки фильтров

Напор насоса для взрыхляющей промывки фильтров

$$P_n = \sum \Delta P_i,$$

$\sum \Delta P_i \approx 110$ кПа – суммарная потеря давления в фильтрах, трубопроводах, водомерах и т.п.

Производительность насоса, кг/с, при времени взрыхления 15 мин определяется по формуле

$$G_n = \frac{4 \cdot G_{\text{взр}} \cdot 1000}{15 \cdot 60}.$$

К установке принимается один насос промывочной воды, который выбирается по табл.17 по P_n и G_n .

Сетевые насосы

Сетевые насосы устанавливаются для обеспечения циркуляции воды в тепловых сетях. Суммарный часовой расход воды G_c принимается из расчета тепловой схемы ТГУ. Давление сетевого насоса принимается по его паспорту.

Количество устанавливаемых сетевых насосов должно быть не менее двух, из которых один является резервным. При установке четырех рабочих сетевых насосов резервный не принимается. Суммарная производительность сетевых насосов должна быть такой, чтобы при выходе из строя любого насоса оставшиеся насосы обеспечивали максимальный расход сетевой воды.

Подпиточные насосы

Подпиточные насосы устанавливаются для восполнения утечки воды в тепловой сети и создания в ней статического давления, которое исключит возможность вскипания воды.

Производительность насоса $G_{\text{пн}}$ принимается по данным расчета тепловой схемы котельной. Давление, развиваемое подпиточным насосом, должно быть больше давления сетевых насосов.

В котельной устанавливается не менее двух подпиточных насосов, один из которых – резервный.

Питательные насосы

Для питания паровых котельных агрегатов необходимо принять к установке два насоса с электрическим приводом и питанием двигателей от двух независимых источников.

Избыточное давление, МПа, которое должны создавать питательные насосы, определяется по формуле

$$P = 1,15(P_b - P_d) + \Delta P_c + \Delta P_z,$$

P_b – избыточное давление в барабане котла, МПа;

P_d – избыточное давление в деаэраторе, МПа;

$\Delta P_c = 0,08-0,1$ МПа – суммарное сопротивление всасывающего и нагнетательного трактов питательной воды;

$\Delta P_z = 0,04-0,06$ МПа – давление, соответствующее разности уровней воды в барабане котла и в деаэраторе.

Мощность электропривода

Мощность, кВт, электродвигателя, необходимая для привода насоса, рассчитывается, исходя из его производительности и давления нагнетания по формуле

$$N = \frac{G \cdot P \cdot 10^3}{\rho \cdot \eta_n \cdot \eta_d},$$

G – производительность насоса, кг/с;

P – развиваемое давление, МПа;

$\eta_n = 0,65-0,75$ – КПД насоса при полном давлении;

$\eta_d = 0,9-0,95$ – КПД электродвигателя;

$\rho=1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды.

Сетевые питательные и подпиточные насосы выбираются в зависимости от рассчитанных значений расхода и напора по табл.13, 14.

Таблица 13

Насосы центробежные

Тип насоса	Производительность, кг/с	Создаваемое давление, МПа	Тип/мощность эл.двигателя	Габаритные размеры с эл.двигателем, мм		
				Длина	Ширина	Высота
ЦНС-150-23	41,7	2,40	160-380/150	970	2750	880
4МСГ-10×6	16,7	1,98	A2-82,2/55	600	2000	500
4МСГ-10×7	16,7	2,31	A2-82-2/75	600	2100	500
4МСГ-10×6	16,7	2,64	A2-82-2/75	600	2200	500
3МСГ-10×6	9,4	1,84	A2-71-2/30	600	1900	430
3МСГ-10×9	9,4	2,07	A2-72-2/40	500	2000	430
3МСГ-10×10	9,4	2,3	A2-72-2/40	600	2100	430

Таблица 14

Насосы вихревые

Марка насоса	Производительность, кг/с	Создаваемое давление, МПа	Мощность эл.двигателя, кВт	Габаритные размеры, мм		
				Длина	Ширина	Высота
2,5ЦВ-0,8	1,39-3,33	2,2	14	525	1150	526
2,5ЦВ-1,1	2,2-6,1	2,5	20	525	1150	526
2,5ЦВ-1,3	3,9-7,8	2,5	28	595	1255	604
2,5ЦВ-1,5	4,2-8,4	2,7	40	595	1255	604

Скорость продуктов сгорания на выходе из дымовой трубы принимается в пределах $W_{\text{вых}}=12-20 \text{ м/с}$.

Высота дымовой трубы $H_{\text{тр}}$ принимается предварительно в соответствии с нормами.

Уменьшение температуры продуктов сгорания на 1 м трубы из-за их охлаждения, К:

- для стальных нефутерованных труб

$$\Delta T = \frac{3,6}{\sqrt{D}};$$

- для кирпичных труб

$$\Delta T = \frac{0,76}{\sqrt{D}},$$

D – производительность всех котлов ТГУ, кг/с.

Температура продуктов сгорания на выходе из трубы, К:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{ух}} - \Delta TH_{\text{тр}},$$

$T_{\text{ух}}$ - температура уходящих газов, К(была задана в первой части курсового проекта).

Площадь выходного сечения трубы, м²,

$$F_m = \frac{B_p^{\text{к.у}} V_z T_{\text{вых}}}{W_{\text{вых}} \cdot 273},$$

$B_p^{\text{к.у}} = B_p^{\text{к.а}} \cdot n$ - расход топлива всеми котлами, установленными в котельной (величина $B_p^{\text{к.а}}$ была рассчитана в первой части курсового проекта, n – число установленных котлов), кг/с, м³/с;

V_z - объем дымовых газов, выделяющихся при сжигании 1 кг или 1 м³ топлива, м³/кг, м³/м³.

Диаметр устья трубы, м²,

$$D_0 = \sqrt{\frac{4F_m}{\pi}}.$$

При установке в котельной кирпичных труб по условиям их монтажа значение D_0 должно быть не менее 0,75 м.

Диаметр основания трубы, м²,

$$D_{\text{осн}} = 2H_{\text{тр}}i + D_0,$$

$i=0,02-0,03$ – конусность трубы.

Средний диаметр дымовой трубы, м²,

$$D_{\text{ср}} = 0,5(D_0 + D_{\text{осн}}).$$

Средняя температура газов в дымовой трубе, К,

$$T_{cp}^{\partial.m} = 0,5(T_{yx} + T_{вых}).$$

Площадь сечения дымовой трубы, рассчитанная по среднему диаметру, м²,

$$F_{cp}^{\partial.m} = \pi \frac{D_{cp}^2}{4}.$$

Средняя скорость газов в дымовой трубе, м/с,

$$W_{cp}^{\partial.m} = \frac{B_p^{к.у} V_z T_{cp}^{\partial.m}}{F_{cp}^{\partial.m} \cdot 273}.$$

Плотность газов, кг/м³, при заданной температуре Т рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{T}{273} \rho_0,$$

$\rho_0 = 1,34$ кг/м³ – плотность дымовых газов среднего состава при нормальных физических условиях.

Потери в дымовой трубе

$$\Delta h_{mp}^{\partial.m} = \lambda \frac{(W_{cp}^{\partial.m})^2}{2} \cdot \frac{H_{mp}}{D_{cp}},$$

λ - значение коэффициента трения ($\lambda = 0,04$ для кирпичных труб и каналов; $\lambda = 0,02$ для металлических труб и каналов).

Потери давления на выходе из дымовой трубы, Па,

$$\Delta h_{вых}^{\partial.m} = 1,1 \frac{\rho_{вых} W_{вых}^2}{2}.$$

Суммарные потери давления в дымовой трубе, Па.

$$\sum h^{\partial.m} = \Delta h_{mp}^{\partial.m} + \Delta h_{вых}^{\partial.m}.$$

Сопротивление отдельных элементов ТГУ, связанное с трением газов о стенки труб или прямых каналов, при движении по которым газы не встречают на своем пути препятствий в виде пучка труб, определяется по формуле

$$\Delta h_{mp} = \lambda \frac{L}{d} \frac{W_{cp}^2}{2} \rho_{cp}, \text{ Па}$$

L - длина наиболее протяженной ветви газохода, м;

d – диаметр круглого канала или эквивалентный диаметр канала прямоугольного сечения, м,

$$d_{\text{экв}} = \frac{4F}{U},$$

F - живое сечение газохода, м²;

U – смачиваемый периметр, м.

Сопротивления отдельных элементов ТГУ, зависящие от местных сопротивлений, подсчитывают по формуле

$$\Delta h_{\text{м}} = \varphi \frac{W^2}{2} \rho,$$

φ - значение коэффициента местного сопротивления.

Значение коэффициента φ при поворотах для наиболее часто встречающихся в котельной практике случаев: под углом 45° - 0,5; 90° - 1, 180° - 2.

Скорость газов W в месте поворота определяют по формуле

$$W = \frac{V_{\text{г}} B_p^{k-a} T_{\text{гж}}}{273 F},$$

F – живое сечение, зависящее от угла поворота, м².

Живые сечения определяются следующим образом:

– для поворота на 90°

$$F = \frac{2}{\frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}},$$

F_1 и F_2 – начальное и конечное сечение поворота, м²;

– для поворота на 180°

$$F = \frac{3}{\frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} + \frac{1}{F_3}},$$

F_1, F_2, F_3 – начальное, среднее и конечное сечения, м².

Сопротивление каждого шибера $\Delta h_{\text{шиб}}$, поставленного на пути продуктов сгорания, принимается равным 5...15 Па.

Сопротивление основного оборудования

Аэродинамическое сопротивление экономайзера складывается из потерь давления при омывании пучка труб и потерь давления при прохождении местных сопротивлений

$$\Delta h_{\text{эк}} = \Delta h_{\text{пучка}} + \Delta h_{\text{м}}.$$

Сопротивление пучка может быть определено по формуле, Па,

$$\Delta h_{\text{пучка}} = (0,5z_2 + 4) \frac{W_{\text{ср}}^2}{2} \rho_{\text{ср}}^{\text{эк}},$$

z_2 - число рядов труб в экономайзере по ходу газов;

$W_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения газов в экономайзере (была определена в первой части курсовой работы), м/с;

$\rho_{\text{ср}}^{\text{эк}}$ - средняя плотность газов в экономайзере, кг/м³.

Потери давления при прохождении местных сопротивлений рассчитываются так же, как и при расчете газового тракта.

Сопротивление циклонов золоулавливающей установки принимается в пределах 350...600 Па, оно должно удовлетворять условию:

$$\frac{\Delta h_{\text{зол}}}{\rho} = 550 - 750.$$

Расчет самотяги дымовой трубы

Необходимое разрежение, создаваемое тяговым устройством, зависит от суммы сопротивлений отдельных элементов, входящих в состав ТГУ, и должно быть на 10% больше последней, т.е.

$$h = 1,2(\Delta h_{\text{к}} + \Delta h_{\text{эк}} + \Delta h_{\text{зол}} + \Delta h_{\text{шиб}} + \Delta h_{\text{д.м}} + \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м}}).$$

Самотяга дымовой трубы обусловлена разностью плотностей горячих продуктов сгорания и атмосферного воздуха и определяется по формуле

$$h_c = \frac{H_{\text{тр}} \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_{\text{ср}}} \right) B}{2,15},$$

T_p - расчетная температура воздуха (для летнего режима), К;

$T_{\text{ср}}$ - средняя температура продуктов сгорания в дымовой трубе, К;

B - барометрическое давление, Па.

По условию работы котельного агрегата при естественной тяге должно соблюдаться соотношение $h_c > h$. В противном случае к установке должна быть принята дымовая труба большей высоты.

Проверка высоты дымовой трубы на предельно допустимые концентрации вредных выбросов

Масса оксидов серы SO_x , кг/с, при сжигании твердого или жидкого топлива (в пересчете на SO_2)

$$M_{SO_2} = 2 \frac{S^p}{100} B_p^{k,y} (1 - \eta_{SO_2}),$$

η_{SO_2} - доля оксидов серы, связанных летучей золой в котле (принимаются значения: для торфа-0,15; мазута – 0,02; углей Канско-Ачинского бассейна – 0,2; Экибастузского угля – 0,02, остальных углей – 0,1).

Масса оксидов азота, кг/с, выбрасываемых в атмосферу

$$M_{NO_2} = \frac{34 \beta_1 K B_p^{k,y} Q_n^p (1 - \frac{q_n}{100}) \beta_3}{10^7},$$

β_1 - безразмерный поправочный коэффициент, учитывающий влияние на выход оксидов азота, содержание азота в топливе и способ шлакозолоудаления (принимается по табл. 15);

β_3 - коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых горелок $\beta_3 = 1$, для прямоточных $\beta_3 = 0,85$);

K - коэффициент, характеризующий выход окислов азота на 1 т сожженного условного топлива: для паровых котлов $D \leq 19,4$ кг/с

$K = 0,18D$

Таблица 15

Значение коэффициента β_1

Топливо	Содержание азота N^p , %	β_1

Природный газ	-	0,25	
Мазут при коэффициенте избытка воздуха в топке	$\alpha_T > 1,05$	0,3-0,6	0,8
	$\alpha_T < 1,05$	0,3-0,6	0,7
Твердое		Шлакозолоудаление	
		твердое	жидкое
	1	0,55	0,8
	1-1,4	0,7	1,0
	1,4-2,0	1,0	2,4
	2,0	1,4	2,0

Масса оксида углерода, кг/с, выбрасываемая в атмосферу

$$M_{CO} = 0,001 C_n B_p^{sv} \beta \left(1 - \frac{q_n}{100}\right),$$

C_n - коэффициент, характеризующий выход СО при сжигании различных видов топлива (принимается по табл.16);

β - поправочный коэффициент, учитывающий влияние режима горения на выход СО (при нормативных значениях коэффициента избытка воздуха на выходе из топки $\beta=1$).

Таблица 16

Значение коэффициента C_n

Тип топок	Угли		Торф	Мазут	Газ
	каменные	бурые			
Слоевые механизированные	25,7	10,3	16,0	-	-
Камерные для котлоагрегатов паропроизводительностью, кг/с					
до 20,8	-	-	-	19,4	17,9
более 20,8	-	-	-	9,6	9,3

Количество золы, кг/с, выбрасываемое в атмосферу,

$$M_3 = 0,01(A^p + q_n)a_{yn}B_p^{ky}(1 - \eta),$$

a_{yn} - доля твердых частиц, уносимых из топки с продуктами сгорания (определена расчетом в первой части курсового проекта);

η - степень улавливания твердых частиц в золоуловителях.

Минимальное расчетное значение высоты дымовой трубы определяется по формуле:

$$H_{mp}^{\min} = \sqrt{\frac{AFmn(M_{SO_2} + \frac{ПДК_{SO_2}}{ПДК_{NO_2}}M_{NO_2} + \frac{ПДК_{SO_2}}{ПДК_{CO}}M_{CO} + \frac{ПДК_{SO_2}}{ПДК_3}M_3)}{10^{-2}ПДК_{SO_2}}} \sqrt[3]{\frac{Z}{V\Delta T}},$$

$ПДК$ – предельно допустимая концентрация вредного вещества, $м^3/м^3$;

A – коэффициент, определяющий условия рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе ($A=240$ для Средней Азии; $A=200$ для Кавказа, Нижнего Поволжья, Дальнего Востока, Сибири; $A=160$ для районов Севера и Северо-Запада Европейской части России, Среднего Поволжья, Урала; $A=120$ для центральной Европейской части России);

m, n – коэффициенты, учитывающие условия выхода продуктов сгорания из дымовой трубы;

V – объем удаляемых продуктов сгорания, $м^3/с$;

ΔT – разность между температурой выбрасываемых газов и температурой атмосферного воздуха, $К$;

F – коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе (для газообразных веществ и мелкодисперсных аэрозолей $F=1$; для пыли при степени улавливания более 90% - $F=2$; при степени улавливания 75÷90% - $F=2,5$);

Z – число дымовых труб.

Таблица 17

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосфере

Загрязняющее вещество	ПДК, $мг/м^3$	
	максимально-разовые	среднесуточные

Пыль токсичная	0,5	0,15
Ангидрид сернистый SO ₂	0,5	0,05
Окись углерода CO	3,0	1,0
Двуокись азота NO ₂	0,085	0,085
Сажа	0,15	0,05

Коэффициент m рассчитывается по формуле

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}},$$

f - коэффициент, зависящий от скорости выхода продуктов сгорания и геометрических размеров трубы,

$$f = \frac{1000W_{\text{вых}}D_0}{H_{\text{мп}}^2 \Delta T}.$$

Коэффициент n определяется в зависимости от параметра

$$V_M = 0,65\sqrt[3]{V\Delta T / H_{\text{мп}}}, \text{ где}$$

$$V = 1,3 \frac{W_{\text{вых}} \cdot D_0}{H_{\text{мп}}}$$

При $V_M \leq 0,3$ - $n=3$;

При $0,3 < V_M \leq 2$ - $n=3 - \sqrt{(V_M - 0,3)(4,36 - V_M)}$;

При $V_M > 2$ - $n=1$.

дымовая труба должна иметь $H_{\text{мп}} \geq H_{\text{мп}}^{\text{min}}$.

Выбор дымососа

Дымососы выбираются с учетом их производительности и создаваемого ими давления. К каждому котельному агрегату устанавливается индивидуальный дымосос.

Производительность дымососа, м³/с, определяется по формуле

$$V_d = \frac{1,1V_z B_p^{ka} T_d}{273},$$

$T_d = T_{\text{ух}}$ - температура продуктов сгорания перед дымососом, К.

Расчетное давление дымососа, Па,

$$H_p = 1,2\left(h - \frac{h_c}{n}\right),$$

n - число котлов, устанавливаемых в котельной.

При выборе дымососа по каталогу расчетное давление должно быть приведено к тем условиям, которые в них указаны, Па.

$$H_{\delta} = H_p \frac{T_{\delta}}{273}.$$

Выбор типоразмера дымососа производится по приложениям нормативного метода "Аэродинамический расчет котельных агрегатов" или каталогам производителя.

Электрическая мощность, потребляемая дымососом, Вт,

$$N_{\delta} = \frac{1,1V_{\delta}H_{\delta}}{\eta_{\delta}},$$

η_{δ} - КПД дымососа.

Выбор дутьевого вентилятора

Для каждого котельного агрегата устанавливается индивидуальный дутьевой вентилятор. При подборе вентилятора полное давление рекомендуется увеличивать на 10%.

Полное давление, создаваемое дутьевым вентилятором, Па

$$H_e = \Delta h_{cl} + \Delta h_{\delta 3},$$

Δh_{cl} - сопротивление колосниковой решетки и слоя топлива (для слоевой топки) при сжигании газа и мазута – сопротивление горелочного устройства; величина Δh_{cl} ориентировочно принимается равной 500 Па – для слоевой топки, 800 Па – при сжигании газа с помощью горелок низкого давления, 2000-3000 Па – при сжигании мазута с помощью пневматического распыливания;

$\Delta h_{\delta 3}$ - сопротивление воздуховодов (при скорости 5-8 м/с, $\Delta h_{\delta 3} = 200$ Па).

Количество воздуха, м³/с, на которое рассчитывается вентилятор, определяется по формуле

$$V_e = 1,1\alpha_m B_p^{k.a} V_0 \frac{273 + t_e}{273} \frac{B}{B - H_e},$$

α_m - значение коэффициента избытка воздуха в топке;

V_0 – количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг (м³) топлива;

t_g - расчетная температура воздуха, °С;

B – барометрическое давление, Па.

Выбор типоразмера дутьевого вентилятора производится по приложениям нормативного метода "Аэродинамический расчет котельных агрегатов".

Электрическая мощность, потребляемая вентилятором,

$$N_g = \frac{1,1V_g H_g}{\eta_g},$$

η_g - КПД вентилятора при полном давлении.

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В АТМОСФЕРУ

Для определения влияния выбросов теплогенерирующих установок на окружающую среду основным исходным показателем является количество вредных веществ M , г/с, выбрасываемых в атмосферу с продуктами сгорания, величину которых рассчитывают на основании имеющихся рекомендаций следующим образом.

1. Количество выбросов твердых частиц летучей золы и недогоревшего топлива $M_{эл}$, г/с, при сжигании твердого и жидкого топлива вычисляют по формуле

$$M_{эл} = 10B(A^r + q_4)a_{yh}(1 - \eta),$$

где B — расход натурального топлива, кг/с; A^r — зольность топлива, %; q_4 — потери теплоты от механического недожога, %; a_{yh} — доля твердых частиц, уносимых из топки; η — степень улавливания твердых частиц в золоуловителе.

При отсутствии эксплуатационных данных о содержании горючего в уносе количество выбрасываемых твердых частиц определяется по формуле

$$M_{эл} = 10B(A^r + q_4^{yh} \frac{Q_i^r}{32,7})a_{yh}(1 - \eta),$$

где q_4^{yh} — потеря теплоты с уносом от механической неполноты сгорания топлива, %.

Для мазутных котлов q_4^{yh} может быть принято равным 0,02%. В случае отсутствия

эксплуатационных данных о q_4^{yn} при сжигании твердого топлива для приближенного расчета в формулу подставляют нормативное значение q_4^{yn} ; Q_i^r — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; 32,7 МДж/кг — средняя теплота сгорания горючих в уносе.

2. Расчет выбросов оксидов серы в пересчете на SO_2 , г/с, производится по формуле

$$M_{SO_2} = 20BS^r(1 - \eta'_{SO_2})(1 - \eta''_{SO_2})$$

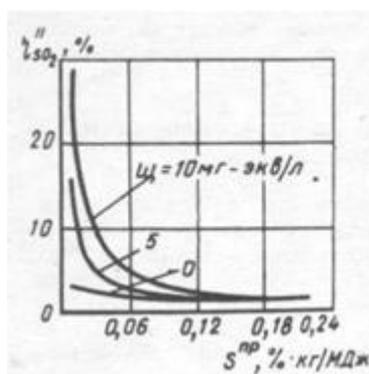


Рис. 9.5. Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях при различной щелочности орошаемой воды Щ

где B — расход твердого, жидкого (кг/с) и газообразного (m^3/c) топлива; S^r — содержание серы в топливе, %; η'_{SO_2} — доля оксидов серы, связанных летучей золой в котле; η''_{SO_2} — доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителях попутно с твердыми частицами.

Доля оксидов серы, связанных летучей золой в котле, зависит от зольности топлива и содержания свободной щелочности в летучей золе. Ориентировочные значения η'_{SO_2} при сжигании различных видов топлива можно принимать исходя из следующих данных: сланцы эстонские и ленинградские — 0,8, остальные — 0,5, угли Канско-Ачинского бассейна — 0,2 торф — 0,15, экибастузский каменный уголь — 0,02, прочие угли — 0,1, мазут — 0,02, газ — 0,0. Доля оксидов серы η''_{SO_2} , улавливаемых в сухих золоуловителях, практически равна нулю. В мокрых золоуловителях типов МВ и МС она зависит в основном от расхода и общей щелочности орошаемой воды и приведенной сернистости топлива при принятых удельных расходах воды на орошение золоуловителей 0,1—0,15 л/м³ (рис. 9.5).

При наличии в топливе сероводорода расчета выбросов дополнительного количества оксидов серы в пересчете на SO_2 ведется по формуле

$$M_{SO_2} = 18,8[H_2S]B,$$

где $[H_2S]$ — содержание сероводорода в топливе, %.

3. Расчет выбросов оксида углерода в единицу времени, г/с, выполняется по формуле

$$M_{CO} = C_{CO}B\left(1 - \frac{q_4}{100}\right),$$

где B — расход топлива, кг/с, m^3/c ; C_{CO} — выход окиси углерода при сжигании твердого, жидкого или газообразного топлива (г/кг, г/ m^3 топлива); определяется из соотношения

$$C_{CO} = q_3 R Q_i^r;$$

q_3, q_4 — потери теплоты от химической и механической неполноты сгорания топлива, %; R — коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленной содержанием окиси углерода в продуктах сгорания. Для твердого топлива $R = 1$, для газа — 0,5, для мазута — 0,65; Q_i^r — низшая теплота сгорания топлива МДж/кг, МДж/ m^3 .

4. Выброс оксидов азота в пересчете на NO_2 в единицу времени, г/с, рассчитывается по формуле

$$M_{NO_2} = B Q_i^r \beta_1 K_{NO_2} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) (1 - \varepsilon_1 r) \times \\ \times \beta_2 \beta_3 \varepsilon_2,$$

где B — расход топлива, кг/с, m^3/c ; Q_i^r — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг, МДж/ m^3 ; β_1 — коэффициент, учитывающий влияние содержания азота в топливе на выход оксидов азота; K_{NO_2} — коэффициент, характеризующий выход оксидов азота на 1 ГДж теплоты сожженного условного топлива, кг/ГДж; β_2 — коэффициент, учитывающий конструкцию горелок (для вихревых горелок $\beta_2 = 1$, для прямоточных $\beta_2 = 0,85$); β_3 — коэффициент, учитывающий вид шлакоудаления. При жидком шлакоудалении $\beta_3 = 1,4$, во всех остальных случаях $\beta_3 = 1$; ε_1 — коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркуляционных газов в зависимости

от условий их подачи в топку; ε_2 — коэффициент, характеризующий снижение выбросов окислов азота при подаче части воздуха помимо основных горелок (при двухступенчатом сжигании); определяется по рис. 9.6 при условии сохранения общего избытка воздуха за котлом; ε — степень рециркуляции дымовых газов, %.

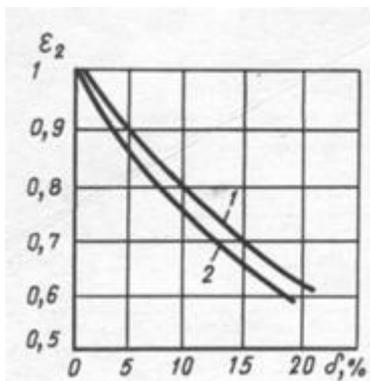


Рис. 9.6. График для определения коэффициента ε

Значения β_1 для котлов, в которых сжигается твердое топливо, определяется по формуле

$$\beta_1 = 0,178 + 0,47N^r = 0,178 + 0,47N^r \times \frac{100}{100 - (w^r + A^r)},$$

где N^r — содержание азота в топливе, %.

При сжигании жидкого и газообразного топлива с различными коэффициентами избытка воздуха в топочной камере α_T коэффициенты β_1 принимаются равными:

α_T	>1,05	1,05-1,03	<1,03
β_1 (газ)	0,9	0,8	0,7
β_2 (мазут)	1,0	0,9	0,75

Значения коэффициента ε_1 при номинальной нагрузке и $r < 30\%$ принимаются равными: при сжигании газа и мазута и вводе газа рециркуляции:

- в под топку (при расположении горелок на вертикальных экранах).....0,002
- через шлицы под горелками.....0,015
- по наружному каналу горелок..... 0,02
- в воздушное дутье.....0,025

в рассечку двух воздушных потоков..... 0,03

при высокотемпературном сжигании твердого топлива и вводе газов рециркуляции:

в первичную аэросмесь.....0,01

во вторичный воздух0,005

При нагрузках, меньших номинальной, коэффициент ε_1 умножается на коэффициент f , определяемый по графику (рис, 9.7).

Значение K_{NO_2} определяется по графикам (рис. 9.8) для различных видов топлива в зависимости от номинальной нагрузки котлоагрегатов. При нагрузке котла, отличающейся от номинальной, K_{NO_2} следует умножить на $\left(\frac{Q_\phi}{Q_n}\right)^{0,25}$

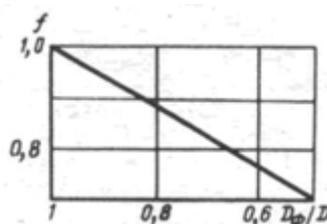


Рис. 9.7. Зависимость безразмерного коэффициента f от паропроизводительности котла

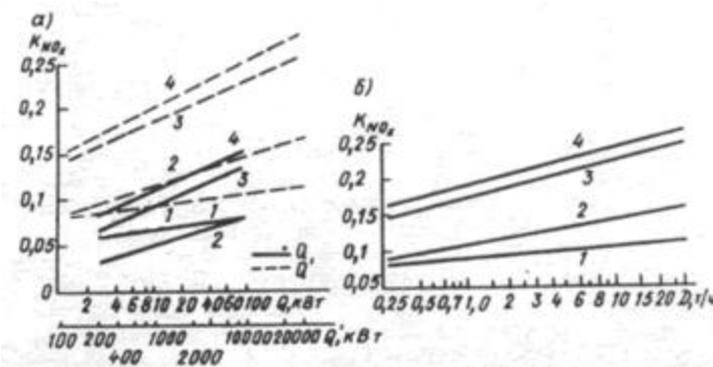


Рис. 9.8. Зависимость K_{NO_x} от тепловой мощности (а) и паропроизводительности (б) котлоагрегата
1 — природный газ, мазут; 2 — антрацит; 3 и 4 — бурый и каменный уголь

или $\left(\frac{D_\phi}{D_n}\right)^{0,25}$, где D_n, D_ϕ — номинальная и фактическая паропроизводительности, т/ч; Q_n и Q_ϕ — номинальная и фактическая мощности, кВт.

5. Количество выбросов окиси ванадия в пересчете на пентоксид ванадия, $M_{V_2O_5}$, г/с, определяется по формуле

$$M_{V_2O_5} = 10^{-3} G_{V_2O_5} B(1 - \eta_{oc})(1 - \eta_y),$$

где — $G_{V_2O_5}$ содержание окиси ванадия в жидком топливе в пересчете на V_2O_5 , г/т; η_{oc} — коэффициент оседания окиси ванадия на поверхностях нагрева котлов. Для котлов с промежуточными пароперегревателями $\eta_{oc} = 0,07$; для котлов без промежуточных пароперегревателей $\eta_{oc} = 0,05$ (в этих случаях очистка поверхностей нагрева производится в остановленном состоянии); для всех остальных случаев $\eta_{oc} = 0$; η_y - доля твердых частиц продуктов сгорания жидкого топлива улавливаемых в устройствах для очистки газов мазутных котлов; значение η_y оценивается для средних условий работы улавливающих устройств за год.

При отсутствии результатов анализа топлива содержание окиси ванадия $G_{V_2O_5}$ в мазуте с $S^r > 0,4\%$ определяется ориентировочно по формуле

$$G_{V_2O_5} = 95,4S^r - 31,6,$$

где S^r — содержание серы в мазуте, %.