

2.3. ЭНТАЛЬПИИ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Энтальпия теоретически необходимых объемов воздуха и продуктов сгорания, кДж/кг, при расчетной температуре ϑ :

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 (c\vartheta)_{\text{в}}; \quad (2.23)$$

$$H_{\text{г}}^0 = V_{\text{RO}_2}^0 (c\vartheta)_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2.24)$$

где $(c\vartheta)_{\text{в}}$, $(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$, $(c\vartheta)_{\text{N}_2}$, $(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$ — энтальпия 1 м³ влажного воздуха, диоксида углерода, азота, водяных паров при температуре ϑ , °С, кДж/м³; определяется по табл. П5 приложения.

Энтальпия продуктов сгорания при избытке воздуха $\alpha > 1$:

$$H_{\text{г}} = H_{\text{г}}^0 + (\alpha - 1) H_{\text{в}}^0 + H_{\text{зл}}. \quad (2.25)$$

Здесь $H_{\text{зл}}$ — энтальпия золы, кДж/кг:

$$H_{\text{зл}} = (c\vartheta)_{\text{зл}} \frac{A_{\text{п}}}{100} a_{\text{ун}},$$

где $a_{\text{ун}}$ — доля золы топлива, уносимая продуктами сгорания;

$(c\vartheta)_{\text{зл}}$ — энтальпия 1 кг золы при температуре ϑ , кДж/кг, определяется по табл. П5 приложения.

При приведенном значении уноса золы из топки $a_{\text{ун}} A^n < 1,4$ значением $H_{\text{зл}}$ можно пренебречь.

Энтальпия газов при наличии рециркуляции

$$H_{\text{г. рц}} = H_{\text{г}} + r H_{\text{г. отб}}, \quad (2.26)$$

где $H_{\text{г}}$ и $H_{\text{г. отб}}$ — энтальпии газов основного потока и рециркулируемых газов, определенные при температурах в рассчитываемом сечении газохода.

ПРИМЕРЫ

Пример 2.9. Определить энтальпии продуктов сгорания в точках смешения: в топке (при $\vartheta = 1700^\circ \text{C}$, $\alpha = 1,1$) и перед промежуточным перегревателем ($\vartheta'_{\text{шт}} = 850^\circ \text{C}$, $\alpha = 1,16$) при рециркуляции газов. Принять температуру в месте отбора газов на рециркуляцию $\vartheta_{\text{отб}} = 390^\circ \text{C}$; $\alpha_{\text{отб}} = 1,2$; $r_{\text{рц}} = 0,15$; топливо — мазут (приложение, табл. П1, топливо № 19).

Решение. По табл. П3 приложения находим теоретические энтальпии газов и воздуха для данного топлива при температурах газов 1700, 850 и 390°C .

По формуле (2.25) энтальпия газов при избытке воздуха $\alpha > 1$ составит:

при $\alpha = 1,1$ и $\vartheta = 1700^\circ \text{C}$

$$H_{\text{г}} = 31\,522,5 + (1,1 - 1) 26\,814 = 34\,204 \text{ кДж/кг};$$

при $\alpha = 1,16$ и $\vartheta = 850^\circ \text{C}$

$$H_{\text{г}} = 14\,595 + (1,16 - 1) 12\,609,5 = 16\,613 \text{ кДж/кг};$$

при $\alpha = 1,20$ и $\vartheta = 390^\circ \text{C}$

$$H_{\text{г}} = 6303 + (1,20 - 1) 5512,2 = 7405 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпии газов в точках смешения находим по формуле (2.26):

в топке

$$H_{\text{г. рц}} = 34\,204 + 0,15 \cdot 7405 = 35\,315 \text{ кДж/кг};$$

в газоходе перед промежуточным нагревателем

$$H_{\text{г. рц}} = 16\,613 + 0,15 \cdot 7405 = 17\,724 \text{ кДж/кг}.$$

Пример 2.10. Насколько изменится энтальпия продуктов сгорания экибастузского угля (приложение, табл. П1, топливо № 9) на 1 кг топлива и в единицу времени при температуре 1250°C , $\alpha = 1,20$, если влажность его увеличится с 6,5 до 14,0%, а зольность с 36,9 до 45,0%?

При решении принять $a_{\text{ун}}$ по табл. П7, исходный расход топлива 25 кг/с, КПД котла снизится при увеличении влажности

и зольности на 0,5% (с 92 до 91,5%), расход топлива обратно пропорционален изменению низшей теплоты сгорания.

Решение. Элементный состав экибастузского угля (приложение, табл. П1, топливо № 9) следующий: $W^p = 6,5\%$, $A^p = 36,9\%$, $S^p = 0,7\%$, $C^p = 44,8\%$, $H^p = 3,0\%$, $N^p = 0,8\%$, $O^p = 7,3\%$. Низшая теплота сгорания 17 380 кДж/кг.

Пересчет элементного состава на новую рабочую влажность $W_2^p = 14,0\%$ и новую рабочую зольность $A_2^p = 45,0\%$ производится с помощью множителя

$$K_2 = \frac{100 - 14,0 - 45,0}{100 - 6,5 - 36,9} = 0,724.$$

Новый элементный состав следующий: $S_2^p = 0,50\%$, $C_2^p = 32,45\%$, $H_2^p = 2,15\%$, $N_2^p = 0,60\%$, $O^p = 5,3\%$, $A_2^p = 45,0\%$, $W_2^p = 14,0\%$.

Новая низшая теплота сгорания

$$Q_{н}^p = (17\,380 + 25,1 \cdot 6,5) 0,724 - 25,1 \cdot 14,0 = 12\,350 \text{ кДж/кг.}$$

1. Определяем энтальпию для исходного топлива. По табл. П3 и П5 приложения находим для исходного топлива теоретическую энтальпию газов и воздуха при $\vartheta = 1250^\circ \text{C}$ и энтальпию золы. Они равны: $H_r^0 = 9888 \text{ кДж/кг}$; $H_b^0 = 8360 \text{ кДж/кг}$; $H_{зл} = 1283 \text{ кДж/кг}$.

При избытке воздуха $\alpha = 1,20$ по (2.25)

$$H_r = 9888 + (1,20 - 1) 8360 + 1283 \frac{36,9}{100} 0,95 = 12\,010 \text{ кДж/кг.}$$

2. Определяем энтальпию продуктов сгорания для экибастузского угля с $W_2^p = 14,0\%$ и $A_2^p = 45,0\%$. В соответствии с новым элементным составом определяем теоретические объемы воздуха и газов (см. § 2.1): $V^0 = 3,32 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{RO}_2} = 0,61 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,47 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_{\text{N}_2}^0 = 2,63 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Теоретические энтальпии газов и воздуха по (2.23) и (2.24) при $\vartheta = 1250^\circ \text{C}$:

$$H_b^0 = 1833,8 \cdot 3,32 = 6088,0 \text{ кДж/кг};$$

$$H_r^0 = 2846,7 \cdot 0,61 + 1774,95 \cdot 2,63 + 2238,0 \cdot 0,47 = 7456 \text{ кДж/кг.}$$

Значения $(c\vartheta)_b$, $(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$, $(c\vartheta)_{\text{N}_2}$, $(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$ приняты по табл. П5 приложения.

При избытке воздуха $\alpha = 1,20$ энтальпия газов по (2.25)

$$H_r = 7456 + (1,20 - 1) 6088,0 + 1283 \frac{45,0}{100} \cdot 0,95 = 9222 \text{ кДж/кг.}$$

3. Определяем новый расход топлива при сохранении тепловой мощности котла:

$$B_2 = B_1 \frac{Q_{н1}^p \eta_{к1}}{Q_{н2}^p \eta_{к2}} = 25 \frac{17\,380 \cdot 0,92}{12\,350 \cdot 0,915} = 35,37 \text{ кг/с.}$$

Изменение энтальпии газов на 1 кг сожженного топлива

$$H_{г,1}/H_{г,2} = 12\,010/9222 = 1,30.$$

Изменение энтальпии потока газов в единицу времени

$$\frac{B_1 H_{г,1}}{B_2 H_{г,2}} = \frac{25,0 \cdot 12\,010}{35,37 \cdot 9222} = 0,92.$$

Пример 2.11. Назаровский бурый уголь (приложение, табл. П1, топливо № 15) сжигается с твердым шлакоудалением при $\alpha_r = 1,2$, $\vartheta_r'' = 1200^\circ \text{C}$. Как изменится температура продуктов сгорания на выходе из топки, если в верхнюю часть топки введены газы рециркуляции? Коэффициент рециркуляции $r = 0,15$, температура газов рециркуляции $\vartheta_{г.рц} = 390^\circ \text{C}$; $\alpha_{отб} = 1,25$.

Решение. 1. Определяем по табл. П3 приложения энтальпии газов и воздуха при температурах 1200 и 390°C :

при $\vartheta_r = 1200^\circ \text{C}$

$$H_r^0 = 8546 \text{ кДж/кг}; \quad H_b^0 = 6351 \text{ кДж/кг};$$

при $\vartheta_r = 390^\circ \text{C}$

$$H_r^0 = 2506 \text{ кДж/кг}; \quad H_b^0 = 1910 \text{ кДж/кг}.$$

2. Определяем энтальпию газов при $\vartheta = 1200^\circ \text{C}$ и 390°C по (2.25):

при $\vartheta = 1200^\circ \text{C}$ и $\alpha = 1,2$

$$H_r = 9816 \text{ кДж/кг};$$

при $\vartheta = 390^\circ \text{C}$ и $\alpha = 1,25$

$$H_r = 2983 \text{ кДж/кг}.$$

3. Определяем энтальпию газов в точке смешения по (2.26):

$$H_{г.рц} = 9816 + 0,15 \cdot 2983 = 10\,263 \text{ кДж/кг}.$$

Избыток воздуха в газовом потоке после смешения

$$\alpha_{см} = \alpha_r + (\alpha_{рц} - \alpha_r) r = 1,2 + (1,25 - 1,2) 0,15 = 1,207.$$

4. Определяем температуру газов после ввода рециркуляции газов. Для этого находим энтальпию смеси при $\alpha_{см} = 1,207$ в интервале температур $1200 - 1000^\circ \text{C}$ по формуле

$$H_{г.см} = [H_r^0 + (\alpha_{см} - 1) H_b^0] (1 + r).$$

При 1200°C

$$H_{г.см} = [8546 + (1,207 - 1) 6351] (1 + 0,15) = 11\,343 \text{ кДж/кг};$$

при 1000°C

$$H_{г.см} = [6970 + (1,207 - 1) 5206] (1 + 0,15) = 9258 \text{ кДж/кг}.$$

Интерполируя, получаем температуру газов на выходе из топки после рециркуляции газов

$$\vartheta''_T = 1200 - \frac{1200 - 1000}{11343 - 9258} (11343 - 10263) = 1096,4^\circ \text{ C}.$$

Таким образом, температура газов за топкой снизилась на

$$\Delta \vartheta''_T = 1200 - 1096,4 = 103,6^\circ \text{ C}.$$

Пример 2.12. Насколько изменится энтальпия уходящих газов при сжигании природного газа (приложение, табл. П2, топливо № 5), если избыток воздуха за топочной камерой снизить с 1,10 до 1,05? Принять присосы воздуха в газовом тракте (от выхода из топки до выхода из воздухоподогревателя) $\Delta \alpha_{\text{прс}} = 0,15$, температуру уходящих газов 120° C .

Решение. В соответствии с заданием, избыток воздуха в уходящих газах снизится с $\alpha'_{yx} = \alpha_T + \Delta \alpha_{\text{прс}} = 1,10 + 0,15 = 1,25$ до $\alpha_{yx} = 1,20$.

По табл. П4 при $\vartheta = 200^\circ \text{ C}$ энтальпия теоретического расхода воздуха и продуктов сгорания равна для данного топлива $H_{\text{в}200}^0 = 2566 \text{ кДж/м}^3$, $H_{\text{г}200}^0 = 3010 \text{ кДж/м}^3$.

1. Определим энтальпию газов при $\alpha_{yx} = 1,25$ и температуре 200° C :

$$\begin{aligned} H_{\text{г}200} &= H_{\text{г}200}^0 + (\alpha - 1) H_{\text{в}200}^0 = 3010 + (1,25 - 1) 2566 = \\ &= 3651,5 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

При температуре уходящих газов 120° C

$$H_{\text{г}120} = H_{\text{г}200} \frac{120}{200} = 3651,5 \frac{120}{200} = 2190,9 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Энтальпия газов при $\alpha_{yx} = 1,20$ и температуре 200° C

$$H_{\text{г}200} = 3010 + (1,20 - 1) 2566 = 3523,2 \text{ кДж/м}^3.$$

При температуре уходящих газов 120° C

$$H_{\text{г}120} = 3523,2 \frac{120}{200} = 2113,9 \text{ кДж/м}^3.$$

Таким образом, понижение избытка воздуха за топкой на $\Delta \alpha = 0,05$ уменьшает энтальпию уходящих газов на 77 кДж/м^3 (примерно на 3,5%).

ЗАДАЧИ

Задача 2.12. Определить энтальпию теоретически необходимого объема воздуха при сжигании 1 кг АШ (приложение, табл. П1, топливо № 5) и 1 кг назаровского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо № 15) при температуре 350° C и сопоставить их одновременно с соотношением теплот сгорания этих топлив.

Задача 2.13. Как изменится энтальпия продуктов сгорания уходящих газов при сжигании ангреного угля (приложение, табл. П1, топливо № 13), если его влажность увеличить с 34,5 до 45%? Температуру уходящих газов принять 160°C , $\alpha_{yx} = 1,4$.

Задача 2.14. Как изменится энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки при сжигании назаровского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо № 15), если замкнутую схему сушки заменить на разомкнутую с влажностью $W^{пл} = 13\%$? Принять $\vartheta_1'' = 1100^{\circ}\text{C}$, $\alpha_1 = 1,20$.

Задача 2.15. Насколько изменит удельную энтальпию и температуру газов в поворотной камере котла присос холодного воздуха в количестве $\Delta\alpha_{прс} = 0,1$ при $t_{х.в} = 20^{\circ}\text{C}$? Принять избыток воздуха в газовом потоке до поворотной камеры $\alpha'_{п.к} = 1,13$, температуру газов 850°C , топливо — экибастузский уголь (приложение, табл. П1, топливо № 9).