

2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСХОД ВОЗДУХА

Для твердых и жидких топлив:
объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$,

$$V^0 = 0,0889(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P; \quad (2.1a)$$

массовый расход воздуха, $\text{кг}/\text{кг}$,

$$L^0 = 0,115(C^P + 0,375S^P) + 0,342H^P - 0,0431O^P. \quad (2.1б)$$

При сжигании природного газа объемный расход, $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$V^0 = 0,0476 \left[\sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S - O_2 \right]. \quad (2.2)$$

Значения объема воздуха, м^3 , рассчитываются при нормальных условиях, т. е. при 0°C и 760 мм рт. ст.

Для смеси двух однородных топлив (твердых, жидких или газообразных) объемы воздуха определяются по формуле

$$V^0 = g'V^{0'} + (1 - g')V^{0''}, \quad (2.3a)$$

где g' — массовая доля первого топлива в смеси.

Для смеси твердого или жидкого топлива с газообразным

$$V^0 = V^{0'} + xV^{0''}, \quad (2.3б)$$

где x — количество газа на 1 кг твердого или жидкого топлива.

ПРИМЕРЫ

Пример 2.1. Определить объемный и массовый расход воздуха для топлива, приведенного в примере 1.1.

Решение. Определяем теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для полного сжигания топлива ($\alpha=1,0$). По (2.1а) и (2.1б) находим

$$V^0 = 0,0889(64,34 + 0,375 \cdot 0,38) + 0,265 \cdot 3,45 - 0,0333 \cdot 6,9 = \\ = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$L^0 = 0,115(64,34 + 0,375 \cdot 0,38) + 0,342 \cdot 3,45 - 0,0431 \cdot 6,9 = \\ = 8,30 \text{ кг/кг}.$$

Пример 2.2. Определить объемный расход воздуха для сжигания природного газа Бухарского месторождения (приложение, табл. П2, топливо № 7).

Решение. На основании элементного состава топлива (табл. П2) по (2.2)

$$V^0 = 0,0476 \left[\left(1 + \frac{4}{4}\right)94,9 + \left(2 + \frac{6}{4}\right)3,2 + \left(3 + \frac{8}{4}\right)0,4 + \left(4 + \frac{10}{4}\right)0,1 + \right. \\ \left. + \left(5 + \frac{12}{4}\right)0,1 \right] = 9,73 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Пример 2.3. Определить теоретически необходимое количество воздуха при сжигании смеси твердого и газообразного топлива (кузнецкого угля марки СС и бухарского природного газа), элементный состав которых приведен в примерах 2.1 и 2.2. Доля природного газа в общем тепловыделении $q''=0,4$, их низшие теплоты сгорания соответственно равны $Q_{\text{н}}^{p'}=27420$ кДж/кг и $Q_{\text{н}}^{p''}=36720$ кДж/м³.

Решение. Для смеси твердого (или жидкого) и газообразного топлива теоретически необходимое для горения объемное количество воздуха определяется соотношением (2.3б), а количество газа, приходящееся на 1 кг твердого топлива, находится по (1.18). Доля твердого топлива в тепловыделении смеси топлив

$$q' = 1 - q'' = 1 - 0,4 = 0,6;$$

$$x = \frac{1 - 0,6}{0,6} \frac{27420}{36720} = 0,498;$$

$$V^0 = 6,417 + 0,498 \cdot 9,73 = 11,26 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

ЗАДАЧИ

Задача 2.1. Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха при переходе на сжигание сушонки ($W^{\text{нл}}=10\%$). Исходное топливо — назаровский бурый уголь (приложение, табл. П1, топливо № 15).

Задача 2.2. Определить, насколько изменится теоретически необходимый объем воздуха, если зольность угля марки АШ (приложение, табл. П1, топливо № 5) увеличится до 35,0%.

Задача 2.3. Определить, как изменится теоретически необходимый объем воздуха, если для условий примера 2.3 доля природного газа в общем тепловыделении увеличится до $q'' = 0,6$.

2.2. СОСТАВ И ОБЪЕМ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

При сжигании твердого и жидкого топлива образуются следующие объемы продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866(C^p + 0,375S^p); \quad (2.4)$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p; \quad (2.5)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0 + 1,24G_\phi, \quad (2.6)$$

где G_ϕ — расход пара на распыл 1 кг мазута, $\text{кг}/\text{кг}$;

$$V_r^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0. \quad (2.7)$$

При сжигании сланцев объем трехатомных газов за счет карбонатной углекислоты составит

$$V_{\text{RO}_2}^k = V_{\text{RO}_2} + 0,509 \frac{(\text{CO}_2)_k^p}{100}, \quad (2.8)$$

где V_{RO_2} — расчетный объем трехатомных газов в продуктах сгорания по (2.4).

Тогда полный объем газов при $\alpha = 1$

$$V_r^{\alpha k} = V_r^0 + 0,509 \frac{(\text{CO}_2)_k^p}{100}, \quad (2.9)$$

где V_r^0 определяется по (2.7).

При сжигании природного газа объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2; \quad (2.10)$$

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 \left(\sum m C_m H_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} \right); \quad (2.11)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + 0,124d_r + 0,0161V^0 \right), \quad (2.12)$$

где d_r — влагосодержание газообразного топлива, которое в зависимости от температуры газа принимают:

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	0	10	20
$d_r, \text{ г}/\text{м}^3$	5,0	10,1	19,4

Действительные объемы воздуха и продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$, при коэффициенте избытка воздуха α :

$$V_{\text{в}} = \alpha V^0; \quad (2.13)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0; \quad (2.14)$$

$$V_r = V_r^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0. \quad (2.15)$$

Масса продуктов сгорания, кг/кг, при сжигании твердого и жидкого топлива

$$G_r = 1 - \frac{A^p}{100} + 1,306 \alpha V^0. \quad (2.16)$$

Плотность и масса продуктов сгорания при сжигании газообразного топлива, кг/м³:

$$\rho_{r.г.л}^c = 0,01 [1,96 \text{CO}_2 + 1,52 \text{H}_2\text{S} + 1,25 \text{N}_2 + 1,43 \text{O}_2 + 1,25 \text{CO} + 0,0899 \text{H}_2 + \sum (0,536m + 0,045n) \text{C}_m \text{H}_n]; \quad (2.17)$$

$$G_r = \rho_{r.г.л}^c + d_r \cdot 10^{-3} + 1,306 \alpha V^0. \quad (2.18)$$

Объемные доли трехатомных газов и безразмерная концентрация золы в продуктах сгорания:

$$r_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2} / V_r; \quad (2.19)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} / V_r; \quad (2.20)$$

$$\mu_{\text{зл}} = A^p a_{\text{зл}} / (G_r \cdot 100), \quad (2.21)$$

где $a_{\text{зл}}$ — доля золы, уносимой продуктами сгорания, определяется по табл. П7.

Объем продуктов сгорания при рециркуляции газов, м³/кг,

$$V_{r.р.ц} = V_r + r V_{r.отб}, \quad (2.22)$$

где $V_{r.отб}$ — объем продуктов сгорания в сечении за местом отбора; r — доля отбираемых газов на рециркуляцию.

Избытки воздуха в газовом тракте при известном значении избытка на выходе из топки α_r составляют: в объеме топки в зоне горелок $\alpha_{\text{гор}} = \alpha_r - \Delta\alpha_r$; в газоходе за топкой $\alpha_i = \alpha_r + \sum \Delta\alpha_i$, где $\Delta\alpha_r$, $\Delta\alpha_i$ — присосы воздуха в топке и в поверхностях за топкой.

Относительный избыток горячего воздуха в горелке при сжигании твердого топлива составляет

$$\beta_{\text{гор}} = \alpha_{\text{гор}} - \Delta\alpha_{\text{пл}},$$

где $\Delta\alpha_{\text{пл}}$ — присосы воздуха в пылеприготовительной установке.

ПРИМЕРЫ

Пример 2.4. Определить объемы продуктов сгорания для кузнецкого угля марки СС, приведенного в примере 1.1.

Решение. Определяем составляющие продуктов сгорания по (2.4) — (2.6):

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866 (64,34 + 0,375 \cdot 0,38) = 1,20 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot 3,45 + 0,0124 \cdot 12,0 + 0,0161 \cdot 6,417 = 0,64 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot 6,417 + 0,008 \cdot 1,53 = 5,08 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем; продуктов сгорания по (2.7)

$$V_r^0 = 1,20 + 0,64 + 5,08 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример 2.5. Как изменится объем и объемные доли трехатомных продуктов сгорания и водяных паров при сжигании подмосковного бурого угля (приложение, табл. П1, топливо № 10) при избытке воздуха $\alpha = 1,20$, если его влажность увеличилась до 40,0%?

Решение. Элементный состав подмосковного бурого угля следующий: $W^p = 32,0\%$; $A^p = 28,6\%$; $S^p = 2,7\%$; $C^p = 26,0\%$; $H^p = 2,1\%$; $N^p = 0,4\%$; $O^p = 8,2\%$.

Коэффициент пересчета на новую рабочую влажность

$$K = \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} = \frac{100 - 40,0}{100 - 32,0} = 0,882.$$

В соответствии с этим $A_2^p = 28,6 \cdot 0,882 = 25,24\%$; $S_2^p = 2,7 \cdot 0,882 = 2,38\%$; $C_2^p = 26,0 \cdot 0,882 = 22,94\%$; $H_2^p = 2,1 \cdot 0,882 = 1,85\%$; $N_2^p = 0,4 \cdot 0,882 = 0,35\%$; $O_2^p = 8,2 \cdot 0,882 = 7,24\%$.

Проверка полученного элементного состава:
 $25,24 + 2,38 + 22,94 + 1,85 + 0,35 + 7,24 + 40,0 = 100,0\%$.

Объемы воздуха и продуктов сгорания для исходного топлива:

$$V^0 = 2,68 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad V_{\text{RO}_2}^0 = 0,50 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad V_{\text{N}_2}^0 = 2,12 \text{ м}^3/\text{кг}; \\ V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,69 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad V_r^0 = 3,31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При избытке воздуха $\alpha = 1,2$ объем газов в соответствии с (2.15)

$$V_r = 3,31 + 1,0161 (1,20 - 1,0) 2,68 = 3,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяных паров по (2.14)

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,69 + 0,0161 (1,20 - 1,0) 2,68 = 0,70 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Доли трехатомных газов в соответствии с (2.19) и (2.20):

$$r_{\text{RO}_2} = 0,50/3,85 = 0,130; \quad r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,70/3,85 = 0,182.$$

Определяем объемы воздуха и продуктов сгорания для угля с влажностью $W_2^p = 40,0\%$.

Теоретическое количество сухого воздуха находим по (2.1):

$$V_b^0 = 0,0889 (22,94 + 0,375 \cdot 2,38) + 0,265 \cdot 1,85 - \\ - 0,0333 \cdot 7,24 = 2,37 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретические объемы продуктов сгорания для нового состава топлива по (2.4)—(2.7):

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866 (22,94 + 0,375 \cdot 2,38) = 0,44 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot 1,85 + 0,0124 \cdot 40,0 + 0,0161 \cdot 2,37 = 0,74 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot 2,37 + 0,008 \cdot 0,35 = 1,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_r^0 = 0,44 + 0,74 + 1,88 = 3,06 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При избытке воздуха $\alpha = 1,2$ находим объемы газов по (2.15):

$$V_r = 3,06 + 1,0161 (1,2 - 1,0) 2,37 = 3,54 \text{ м}^3/\text{кг}$$

и водяных паров по (2.14):

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,74 + 0,0161 (1,2 - 1,0) 2,37 = 0,75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определяем доли трехатомных газов и водяных паров:

$$r_{\text{RO}_2} = 0,44/3,54 = 0,124; \quad r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,75/3,54 = 0,212.$$

Таким образом, за счет снижения теплоты сгорания полный объем газов при возрастании влажности топлива несколько снизился, объем и доля трехатомных газов сократились, а водяных паров увеличились.

Пример 2.6. Определить коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания при сжигании экибастузского угля (приложение, табл. П1, топливо № 9), если известно, что содержание кислорода в газоходе равно 3,5%; содержание трехатомных газов 14,17%.

Решение. Избыток воздуха в газоходе при известной концентрации кислорода определяется по формуле

$$\alpha = 21/(21 - \text{O}_2),$$

где O_2 — содержание кислорода в продуктах сгорания, %.

При известном содержании RO_2 в газовом потоке значение α находят по формуле

$$\alpha \approx \text{RO}_2^{\text{макс}} / \text{RO}_2,$$

где $\text{RO}_2^{\text{макс}}$ — максимальное содержание трехатомных газов в продуктах сгорания топлива при $\alpha = 1,0$.

1. Определяем избыток воздуха по кислороду:

$$\alpha = 21/(21 - 3,5) = 1,20.$$

2. Определяем избыток воздуха по RO_2 . В соответствии с табл. П3 приложения для экибастузского угля (№ 9) максимальное содержание $V_{\text{RO}_2} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$, теоретический объем газов $V_r^0 = 4,94 \text{ м}^3/\text{кг}$. В процентном отношении $\text{RO}_2^{\text{макс}} = (V_{\text{RO}_2}/V_r^0) \times 100 = (0,84/4,94) \cdot 100 = 17,00\%$, тогда $\alpha = 17,0/14,17 = 1,20$.

Пример 2.7. Для кузнецкого угля марки СС (пример 2.4) определить плотность продуктов сгорания при температуре $\vartheta_r = 850^\circ \text{C}$ и избытке воздуха $\alpha = 1,2$, а также концентрацию золовых частиц $\mu_{\text{зл}}$ при доле уноса $a_{\text{ун}} = 0,95$.

Решение. Суммарный объем продуктов сгорания при нормальных условиях $V_r^0 = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Для избытка воздуха $\alpha = 1,2$

$$V_r = 6,92 + 1,0161 (1,2 - 1,0) \cdot 6,42 = 8,2 \text{ м}^3/\text{кг},$$

где $V^0 = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг}$ (см. пример 2.1).

Масса продуктов сгорания на 1 кг топлива по (2.16)

$$G_r = 1 - \frac{11,4}{100} + 1,306 \cdot 1,2 \cdot 6,42 = 10,94 \text{ кг/кг.}$$

Плотность газов при нормальных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.) составляет

$$\rho_r^0 = G_r / V_r = 10,94 / 8,2 = 1,33 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность газов в реальных условиях

$$\rho_r = \rho_r^0 \frac{273}{\vartheta_r + 273} = 1,33 \frac{273}{850 + 273} = 0,324 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетная концентрация золовых частиц в потоке газов составляет по (2.21)

$$\mu_{\text{зл}} = \frac{11,4 \cdot 0,95}{100 \cdot 10,94} = 9,89 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг.}$$

Пример 2.8. Определить размеры коробов уходящих газов после парового котла, сжигающего сернистый мазут (приложение, табл. П1, топливо № 19). Расход мазута $B_m = 8,3$ кг/с; температура уходящих газов $\vartheta_{\text{yx}} = 150^\circ \text{C}$ при избытке воздуха $\alpha_{\text{yx}} = 1,18$. Принять скорость уходящих газов $w_r = 10$ м/с, соотношение сторон газохода 1:4, количество коробов 2.

Решение. 1. Определяем в соответствии с (2.15) объем продуктов сгорания на 1 кг топлива:

$$V_r = 11,27 + 1,0161 (1,18 - 1) 10,45 = 13,18 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

2. Секундный расход уходящих газов:

$$V_c = V_r B_m \frac{\vartheta_{\text{yx}} + 273}{273} = 13,18 \cdot 8,3 \frac{150 + 273}{273} = 169,5 \text{ м}^3/\text{с.}$$

3. Необходимое сечение одного газохода

$$F_r = \frac{V_c}{2w_r} = \frac{169,5}{2 \cdot 10} = 8,475 \text{ м}^2.$$

4. Линейные размеры газохода в соответствии с соотношением сторон 1:4. Принимаем ширину газохода $b = 4h$. Тогда сечение газохода $F_r = hb = 4h^2$. При этом $h = \sqrt{F_r/4} = \sqrt{8,475/4} = 1,45$ м; $b = 4 \cdot 1,45 = 5,80$ м.

ЗАДАЧИ

Задача 2.4. Определить, насколько объем газов за пароперегревателем превосходит объем воздуха, поступающего через горелки в паровом котле с избытком воздуха за топочной камерой 1.20, присосами воздуха в ней 0,05, в пылесистеме 0,04 и присосами воздуха в пароперегревателе 0,03. Топливо — промпродукт каменных углей марки Г (приложение, табл. П1, топливо № 7).

Задача 2.5. Определить состав продуктов сгорания в уходящих газах (V_{RO_2} , $V_{\text{N}_2}^0$, $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$, V_{T}^0 , V_{r}) при сжигании донецкого угля марки Д (приложение, табл. П1, топливо № 1) при $\alpha = 1$ и избытке воздуха в уходящих газах $\alpha_{\text{yx}} = 1,35$.

Задача 2.6. Как изменится состав продуктов сгорания в уходящих газах (данные — см. задачу 2.5) при изменении W^p с 13 до 18 и 23%?

Задача 2.7. Как изменится соотношение объемов воздуха через горелку и продуктов сгорания за пароперегревателем для условий задачи 2.4 при работе котла под наддувом?

Задача 2.8. Определить теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания при разомкнутой схеме сушки назаровского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо № 15). Принять влажность пыли 15,0%.

Задача 2.9. Определить необходимое сечение канала горячего воздуха при температуре 300° С, избыточном давлении в газоходе 3000 Па для котла, сжигающего нерюнгринский уголь (приложение, табл. П1, топливо № 16) в количестве 23,8 кг/с. При решении задачи принять скорость воздуха 15 м/с, количество газоходов 2, форма — круглая (1-й вариант) и прямоугольная с соотношением сторон 2:1 (2-й вариант); принять отношение объема воздуха к теоретически необходимому $\beta = 1,16$ и барометрическое давление 750 мм рт. ст. (99 990 Па).

Задача 2.10. Определить объем воздуха для горения и объем продуктов сгорания в топке при сжигании эстонских сланцев (приложение, табл. П1, топливо № 17). Избыток воздуха в топке принять $\alpha = 1,3$; сжигание — камерное.

Задача 2.11. Как изменится объем и объемные доли трехатомных газов и водяных паров, если при сжигании челябинского бурого угля (приложение, табл. П1, топливо № 12) избыток воздуха увеличить с 1,2 до 1,3?