

## 2. Расчет горения твердых, жидких и газообразных топлив.

### Составы продуктов полного и неполного сгорания топлива

Расчет горения топлива является важнейшим теплотехническим расчетом. Целью расчета являются:

- Определение расхода окислителя, необходимого для горения данного вида топлива;
- Определение выхода и состава продуктов горения.

В основе расчетов процесса горения лежат химические реакции окисления горючих компонентов топлива.

#### 2.1. Теоретически необходимый расход воздуха для сжигания топлива.

##### Коэффициент избытка воздуха

В основе процесса горения топлива лежат химические реакции окисления горючих компонентов топлива: углерода, водорода и серы - для твердых и жидких топлив и углеводородов  $C_mH_n$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$  - для горючих газов.

В качестве окислителя в процессах горения топлива в котельных агрегатах используется атмосферный воздух, содержащий 21% об. кислорода и 79% об. азота.

Горение углерода при полном его окислении происходит по реакции:



$$12\text{кг} + 32\text{кг} = 44\text{кг}$$

Для сжигания 1 кг С необходимо 2,667 кг  $O_2$  / кг С, или 1,866 м<sup>3</sup> / кг С.

Горение водорода происходит по реакции:



$$2\text{кг} + 16\text{кг} = 18\text{кг}.$$

Для сжигания 1 кг водорода необходимо 8 кг  $O_2$  / кг  $H_2$ , или 5,56 м<sup>3</sup>  $O_2$  / кг  $H_2$ .

Горение серы происходит по реакции:



$$32\text{кг} + 32\text{кг} = 64\text{кг}.$$

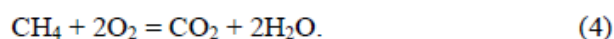
Для сжигания 1 кг серы необходимо 1 кг  $O_2$  / кг  $H_2$ , или 0,7 м<sup>3</sup>  $O_2$  / кг S.

Теоретический расход кислорода, м<sup>3</sup>/кг, необходимый для полного сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива конкретного состава с учетом кислорода, содержащегося в рабочей массе топлива:

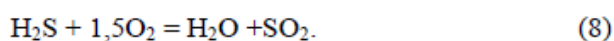
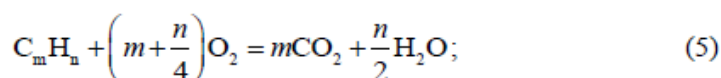
$$V_{O_2}^0 = 1,866 \frac{C^P}{100} + 5,56 \frac{H^P}{100} + 0,7 \frac{S_{\text{орг+к}}^P}{100} - \frac{O^P}{100 \cdot \rho_{O_2}},$$

где  $\rho_{O_2}$  – плотность кислорода при нормальных условиях ( $\rho_{O_2} = 1,428 \text{ кг/м}^3$ ).

При сжигании газообразного топлива происходят следующие реакции:



Или в общем виде для любого углеводорода:



Теоретический расход кислорода,  $\text{м}^3 \text{O}_2/\text{м}^3$ , необходимый для полного сжигания топлива известного состава с учетом имеющегося в этом топливе кислорода:

$$V_{\text{O}_2}^0 = 0,01 \left[ 0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right].$$

В качестве окислителя при сжигании топлива в котельных агрегатах используется атмосферный воздух, который представляет собой сложную смесь различных газообразных веществ. В состав воздуха входят: кислород - 21%; азот - 78%; углекислый газ, инертные газы и др. - 1%. Для технических расчетов обычно принимают условный состав воздуха, который включает только два компонента: кислород - 21% и азот - 79%.

Если в качестве окислителя используется не чистый кислород, а воздух, его теоретический расход, необходимый для полного сгорания топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , составляет:

$$V_{\text{a}}^0 = V_{\text{O}_2}^0 \frac{100}{21} = 4,76V_{\text{O}_2}^0.$$

На практике, при сжигании топлива, воздуха подают несколько больше, чем это требуется по теории.

Отношение действительного расхода воздуха  $V_{\text{в}}^{\text{д}}$ , подаваемого на сжигание топлива, к его теоретическому значению  $V_{\text{в}}^0$  называется коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_{\text{в}}^{\text{д}}}{V_{\text{в}}^0}.$$

Значение коэффициента избытка воздуха зависит от вида сжигаемого топлива, конструкции горелочного и топочного устройства и обычно находится в пределах 1,05...1,5. Для эффективного сжигания топлива необходимо правильно выбирать значение коэффициента избытка воздуха, которое во многом определяет экономичность процесса горения.

## 2.2. Выход и состав продуктов полного сгорания топлива

В общем случае, для всех видов топлива, теоретический суммарный выход продуктов полного сгорания,  $\text{м}^3/\text{кг}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , можно представить в виде:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0,$$

где  $V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$  - объем сухих трехатомных газов.

При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1$  и полном сгорании топлива газообразные продукты не содержат кислорода и состоят из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Для твердых и жидких топлив выход трехатомных сухих продуктов сгорания определяется из ранее приведенных выражений для горения отдельных горючих элементов топлива (формулы (1) - (3)):

$$V_{\text{RO}_2} = 1,866 \frac{\text{C}^{\text{P}}}{100} + 0,7 \frac{\text{S}_{\text{орг+к}}^{\text{P}}}{100}.$$

Теоретический объем азота,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , переходящего в продукты сгорания из воздуха и топлива, определяется по формуле:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V_{\text{в}}^0 + 0,008N^{\text{P}}.$$

Теоретический объем водяного пара,  $\text{м}^3/\text{кг}$ :

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,112H^{\text{P}} + 0,0124W^{\text{P}} + 0,00124d_{\text{в}}V_{\text{в}}^0 + 1,24G_{\text{ф}}$$

где первое слагаемое — водяной пар, образующийся при сгорании водорода; второе слагаемое - влага, внесенная топливом; третье слагаемое - влага, внесенная с воздухом и четвертое - форсуночный или дутьевой пар.

В этой формуле  $d_v$  — влагосодержание воздуха,  $г/м^3$ ;  $G_f$  — расход пара на распыл мазута:  $G_f = 0,3 \dots 0,4$  кг пара/кг топлива.

Для газообразного топлива объем сухих трехатомных продуктов сгорания,  $м^3/м^3$ :

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n).$$

Теоретический объем азота,  $м^3/м^3$ :

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_B^0 + 0,01N_2$$

Теоретический объем водяных паров,  $м^3/м^3$ :

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left( H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d_r + 0,124d_v \cdot V_B^0 \right),$$

где  $d_2$  — влагосодержание газообразного топлива,  $г/м^3$ .

При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha > 1$  продукты сгорания содержат дополнительное количество воздуха и влагу, внесенную этим воздухом, что увеличивает объем сухих продуктов сгорания и объем водяных паров. В связи с этим при  $\alpha > 1$  для твердого, жидкого и газообразного топлива имеем,  $м^3/кг$  или  $м^3/м^3$ :

$$\begin{aligned} V_{cr} &= V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + (\alpha - 1)V_B^0 \\ V_{H_2O} &= V_{H_2O}^0 + 0,00124d_v(\alpha - 1)V_B^0 \\ V_r &= V_{cr} + V_{H_2O} \end{aligned}$$

Состав дымовых газов по их парциальным давлениям:

$$P_{RO_2} = P \frac{V_{RO_2}}{V_{III}}; P_{H_2O} = P \frac{V_{H_2O}}{V_{III}}; P_{N_2} = P \frac{V_{N_2}}{V_{III}}.$$

Давление в топке близко к атмосферному давлению и составляет  $P = 0,1$  МПа

Концентрация отдельных компонентов продуктов горения:

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{III}} \cdot 100\%; \quad H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{III}} \cdot 100\%; \quad N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{III}} \cdot 100\%; \quad O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{III}}$$

### 2.3. Условия полного сгорания топлива. Продукты полного и неполного сгорания топлива

Условия, необходимые для полного сгорания топлива:

- непрерывный подвод топлива в зону горения;
- непрерывный подвод окислителя (воздуха) в достаточном количестве;
- хорошее перемешивание топлива с окислителем;
- достаточная температура в топке;
- достаточное время пребывания топливо-воздушной смеси в топке;

Если хотя бы одно из перечисленных выше условий не выполняется, то появятся продукты неполного сгорания топлива.

При полном сгорании любого топлива с теоретически необходимым количеством воздуха состав продуктов сгорания, выраженный в объемных процентах:

$$CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 = 100\%.$$

При полном сгорании топлива и избытке окислителя (т.е. при  $\alpha > 1$ ) в продуктах сгорания будет присутствовать также избыточный кислород:

$$CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 + O_2 = 100\%.$$

При недостатке окислителя или плохом перемешивании сгорание топлива будет неполным, и в продуктах горения появятся горючие газы – вначале оксид углерода CO, затем водород H<sub>2</sub> и метан CH<sub>4</sub>.



Для примерной оценки значения  $\alpha$ , при отсутствии в дымовых газах горючих компонентов пользуются «углекислотной» формулой:

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2},$$

где  $RO_2^{\max}$  — максимально возможное содержание трехатомных газов в сухих продуктах сгорания, % об.

$$RO_2^{\max} = \frac{RO_2}{100 - 4,76O_2} \cdot 100.$$

Примерное значение коэффициента избытка воздуха можно определить по «кислородной» формуле. В случае полного сгорания топлива:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}.$$