

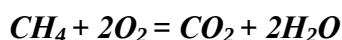
Harjutus 6. Статика горения твёрдого и жидкого топлива.

В данной теме рассмотрена статика горения твердого и жидкого топлива, приведены методы расчёта количества воздуха на горение, определение коэффициента избытка воздуха по результатам измерений и метод расчёта времени выгорания частицы твёрдого топлива.

В процессе горения топлива происходит окисление органической массы топлива кислородом воздуха и образование продуктов сгорания. Для статических расчетов достаточно иметь данные по составу топлива и окислителя (воздуха). Тогда, считая, что процесс окисления идет до образования конечных продуктов реакции, можно записать уравнения химических реакций и составить материальный баланс процесса горения. Последний дает возможность определить количество воздуха, необходимое для полного сжигания единицы топлива, а также найти состав продуктов сгорания.

6.1 Количество воздуха на горение

Расчёт количество воздуха на горение рассмотрим на примере полного сгорания метана CH_4 по реакции



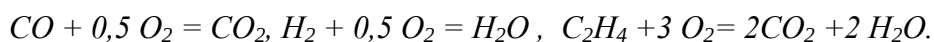
Для этого случая найдём количество воздуха в объёмных единицах.

Согласно реакции для горения 1 моля CH_4 требуется 2 моля O_2 . Поскольку 1 моль любого газа занимает одинаковый объём - $22,4 \text{ м}^3$, то для горения $22,4 \text{ м}^3 CH_4$ требуется $44,8 \text{ м}^3 O_2$, то есть для горения $1 \text{ м}^3 CH_4$ требуется $2 \text{ м}^3 O_2$.

В сухом воздухе кислород по объёму занимает 21% , азот 79%. Количество азота в воздухе в (79/21) в 3,762 раза больше количества кислорода. Поэтому соответствующее количество воздуха для горения 1 м^3 метана составит:

$$2 + 2 \cdot 3,762 = 9,524 \text{ м}^3.$$

Аналогичные расчёты можно сделать для реакций горения CO , H_2 , и C_2H_4 :



Количество воздуха, необходимое для горения , определяется по стехиометрическим уравнениям реакций. Наименьшее количество воздуха , необходимое для полного окисления

(сжигания) единицы объёма горючего вещества называется *теоретическим расходом воздуха*.

Отношение действительного расхода воздуха ($V_{\text{действ}}$) к теоретическому расходу ($V_{\text{теорет}}$) называется *коэффициентом избытка воздуха*:

$$\alpha = \frac{V_{\text{действ}}}{V_{\text{теоретич}}}$$

В процессе горения по мере расходования топлива и кислорода и уменьшения их действующих концентраций выгорание замедляется. Условия реагирования ухудшаются также в связи со сложностью перемешивания больших количеств топлива и окислителя. Таким образом, в связи с несовершенством аэродинамики топочных устройств и невозможностью идеального (т.е. на молекулярном уровне) смешения топлива и окислителя в реальных условиях для полного сгорания топлива необходимо несколько

большее количество воздуха, чем теоретический объём воздуха, полученный из стехиометрических уравнений горения.

При сжигании органических топлив в топках энергетических котлов коэффициент избытка воздуха всегда больше 1 ($\alpha > 1$).

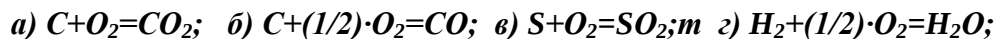
6.2. Расчет горения газообразного и твердого топлива

Для расчета процессов горения твердого и жидкого топлива составляют материальный баланс процесса горения.

Материальный баланс процесса горения выражает количественные соотношения между исходными веществами и конечными продуктами, а тепловой баланс — равенство между приходом и расходом теплоты.

Для твердого топлива материальный и тепловой балансы составляют на 1 кг топлива. Объемы воздуха и газообразных продуктов также выражают в метрах кубических, приведенных к нормальным условиям.

При сжигании твердого топлива горючие вещества могут окисляться с образованием оксидов различной степени окисления. Стехиометрические уравнения реакций горения углерода, водорода и серы можно записать так:



При расчете объемов воздуха и продуктов сгорания условно принимают, что все горючие вещества окисляются полностью с образованием только оксидов с наивысшей степенью окисления.

Из уравнения следует, что для полного окисления 1 кмоль углерода (12 кг) расходуется 1 кмоль, то есть 22,4 м³, кислорода и образуется 1 кмоль (22,4 м³) оксида углерода. Соответственно для 1 кг углерода потребуется 22,4/12 = 1,866 м³ кислорода и образуется 1,866 м³ CO₂. В 1 кг топлива содержится C^P/100 кг углерода. Для его горения необходимо 1,866·C^P/100 м³ кислорода и при сгорании образуется 1,866 C^P/100 м³ CO₂.

Аналогично из уравнений (в) и (г) на окисление горючей серы (μ_s = 32), содержащейся в 1 кг топлива, потребуется (22,4/32) S^P_л/100 м³ кислорода и образуется такой же объем SO₂. На окисление водорода μ_{H₂} = 2.02, содержащегося в 1 кг топлива, потребуется 0,5·(22,4/2,02) H^P/100 м³ кислорода и образуется (22,4/2,02) H^P/100 м³ водяного пара.

Суммируя полученные выражения и учитывая кислород, находящийся в топливе (μ_{O₂} = 32), после несложных преобразований получим формулу для определения количества кислорода, теоретически необходимого для полного сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива, м³/кг:

$$V_{O_2}^0 = 1.866 \cdot \frac{C^P}{100} + 0.75 \cdot \frac{S_{л}^P}{100} + 5,55 \frac{H^P}{100} - 0,7 \cdot \frac{O^P}{100}$$

В воздухе содержится кислорода примерно 21 % по объему, поэтому количество воздуха, теоретически необходимое для полного сжигания 1 кг топлива V⁰, м³/кг, составляет:

$$V^0 = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2}^0 = 0,0889 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_{л}^P) + 0,265 \cdot H^P - 0,033 \cdot O^P$$

В процессе полного горения с теоретически необходимым количеством воздуха образуются газообразные продукты, которые состоят из CO₂, SO₂, N₂ и H₂O - оксиды углерода и серы являются сухими трехатомными газами. Их принято объединять и обозначать через RO₂ = CO₂ + SO₂.

При горении твердых топлив теоретические объемы продуктов сгорания, м³/кг, вычисляют по уравнениям с учетом содержания соответствующих компонентов в топливе и воздухе.

Для каждого вида топлива оптимальное значение коэффициента избытка воздуха в топке зависит от технических его характеристик, способа сжигания, конструкции топки, способа образования горючей смеси и др.

Действительный объем продуктов сгорания будет больше теоретического за счет азота, кислорода и водяного пара, который содержится в избыточном воздухе. Так как воздух не содержит трехатомных газов, то их объем не зависит от коэффициента избытка воздуха и остается постоянным.

Объем двухатомных газов и водяного пара (м³/кг или м³/м³), определяют по формулам:

$$V_R = V_N^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0$$

Суммарный объем продуктов сгорания при $\alpha > 1$ ($\text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{м}^3/\text{м}^3$) будет:

$$V_\Gamma = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{R}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

При сжигании твердых топлив концентрация золы в дымовых газах ($\text{г}/\text{м}^3$) определяется по формуле

$$\mu = 10 \cdot A^p \frac{a_{\text{ун}}}{V_\Gamma}$$

где $a_{\text{ун}}$ — доля золы топлива, уносимая газами (ее значение зависит от вида твердого топлива и способа его сжигания и принимается из технических характеристик топок).

Все формулы для подсчета объемов применимы тогда, когда происходит полное сгорание топлива. Эти же формулы с достаточной для расчета точностью применимы и для неполного сгорания топлива, если не превышаются нормативные значения, приведенные в технических характеристиках топок.

Таблица 6.1.

Физические свойства отдельных компонентов газовой смеси.

Формула	Газ	Молярная масса, $\text{кг}/\text{моль}$	Плотность, ρ_0 , $\text{кг}/\text{м}^3$	Вязкость	
				Динамическая, $\mu \cdot 10^6$, $\text{Па} \cdot \text{с}$	Кинематическая, $\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$
1	2	3	4	5	6
H_2	Водород	2	0.089	8.35	93.8
CO	Оксид углерода	28	1.250	16.95	13.55
CH_4	Метан	16	0.717	10.55	14.71
C_2H_6	Этан	30.1	1.355	8.77	6.45
C_3H_8	Пропан	44.1	2.011	7.65	3.82
C_4H_{10}	Бутан	58.1	2.708	6.97	2.55
C_2H_4	Этилен	28	1.261	7.25	3.5
C_3H_6	Пропилен	42	1.913	7.82	4.11
C_4H_8	Бутилен	56	2.597	7.78	3.12
CO_2	Диоксид углерода	44	1.977	14.09	7.1
O_2	Кислород	16	1.429	16.93	13.55
H_2S	Сероводород	34	1.536	18.82	7.68
H_2O	Влага (вода)	18	0.833	8.7	14.8

6.3.. Определение коэффициента избытка воздуха по составу продуктов сгорания

Коэффициент избытка воздуха является одной из важнейших эксплуатационных характеристик устройств, в которых реализуется процесс сжигания топлива (паровые котлы, промышленные печи и т.д.). При увеличении объема уходящих продуктов сгорания увеличивается и доля теплоты от сгорания топлива, которая теряется с этими газами.

Используя полученные выше уравнения материального баланса процесса горения, можно определить коэффициент избытка воздуха по содержанию (концентрации) в продуктах сгорания CO_2 , O_2 или N_2 .

Общий принцип определения коэффициента избытка воздуха состоит в том, что при полном сгорании топлива изменяется концентрация в сухих газах CO_2 , O_2 или N_2 при изменении α . В газоанализаторах исследуется предварительно осушенные продукты сгорания. Это вносит некоторые искажения в объемные доли продуктов сгорания, что особенно заметно для топлив, богатых водородными соединениями (природные газы, жидкое топливо).

Рассмотрим определение коэффициента избытка воздуха по концентрации CO_2 в продуктах сгорания. Если пренебречь содержанием серы и азота в топливе (что справедливо для большинства твердых топлив), то теоретический объем сухих газов V_{sg} (при стехиометрическом горении) можно представить в виде

$$V_{sg}^O = 1,868 \cdot C^P + 0,79 \cdot V^O$$

а максимальная концентрация CO_2 в сухом газе составит

$$\text{CO}_2^{\max} = \frac{1,868 \cdot C^P}{1,868 \cdot C^P + 0,79 \cdot V^O}$$

Если в воздухе сгорает чистый углерод, то по стехиометрии реакции получается, что на образование одного моля CO_2 расходуется один моль кислорода. Учитывая объемное

содержание кислорода в воздухе (0,21), получаем, что в случае сгорания чистого углерода $CO_2^{\max} = 0,21$.

Природное топливо кроме углерода содержит еще и водород, на окисление которого также расходуется кислород. Поэтому для такого топлива при стехиометрическом горении концентрация CO_2 в продуктах сгорания оказывается меньше, чем для чистого углерода.

Тогда, введя некоторый коэффициент (топливный коэффициент Бунте), учитывающий расход кислорода на горение водорода и зависящий от состава топлива, получим

$$CO_2^{\max} = \frac{0,21}{1 + \beta}$$

Очевидно, что на горение одного моля водорода требуется в 3 раза большее количество кислорода, чем для сгорания углерода. Тогда топливный коэффициент Бунте можно определить, как отношение кислорода на горение водорода и на горение углерода, то есть

$$CO_2^{\max} = \frac{2,37 \left(H^p - \frac{O^p}{8} \right)}{C^p}$$

Если же известен состав топлива, то максимальную концентрацию CO_2 в продуктах сгорания можно найти как

$$CO_2^{\max} = \frac{2,37 \left(H^p - \frac{O^p}{8} \right)}{C^p}$$

Если же известен состав топлива, то максимальную концентрацию CO_2 в продуктах сгорания можно найти как

$$CO_2^{\max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sg}^O}$$

При $\alpha > 1$ концентрация CO_2 в продуктах сгорания уменьшается из-за их разбавления избыточным воздухом. Приравнявая количества CO_2 при $\alpha = 1$ и при $\alpha > 1$, получаем

$$CO_2^{\max} \cdot V_{sg}^O = CO_2 \cdot V_{sg}, \text{ тогда}$$

$$V_{sg} = V_{sg}^O + (\alpha - 1) \cdot V^O \quad CO_2^{\max} \cdot V_{sg}^O = CO_2 \cdot [V_{sg}^O + (\alpha - 1) \cdot V^O]$$

и

Откуда

$$\alpha = \frac{CO_2^{\max} \cdot V_{sg}^O}{CO_2 \cdot V^O} + \left(1 - \frac{V_{sg}^O}{V^O}\right)$$

Для точного расчета коэффициента избытка воздуха следует по составу топлива рассчитать V^O и V_{sg} , а действительная концентрация CO_2 в продуктах сгорания определяется экспериментальным путем. Однако для большинства твердых топлив с достаточной для практики степенью точности можно принять, что $V_{sg}^O \approx V_{sg}$

Тогда приближенно коэффициент избытка воздуха по экспериментально определенному содержанию CO_2 в продуктах сгорания может быть найден из $\alpha \approx \frac{CO_2^{\max}}{CO_2}$

Это соотношение получило название «углекислотная формула для определения коэффициента избытка воздуха».

Коэффициент избытка воздуха можно рассчитать по формуле Юшина по результатам анализа продуктов сгорания:

$$\alpha = 1 + k[(O - 0,5CO)/(CO + CO_2)],$$

где O_2 , CO , CO_2 – содержание компонентов в продуктах сгорания; k – коэффициент, зависящий только от состава отопительного газа.

При практических расчетах принимают для коксового газа $k = 0,43$, для доменного – $k = 2,50$.

Пример.

Продукты сгорания коксового газа имеют состав, %: CO_2 -8, 5; O_2 -2, 5; CO -0, 2. Определить значение α .

Находим:

$$\alpha = 1 + k \frac{[O_2] - 0,5[C]}{[CO] + [CO_2]} = 1 + 0,42 \frac{2,5 - 0,5 \cdot 0,2}{8,5 + 0,2} = 1,12$$

Вывод: коэффициент избытка воздуха для обогрева коксовых печей коксовым газом совершенно недостаточен. Требуется установить: 1,25–1,3.

Оптимальные значения коэффициента избытка воздуха в топке α при сжигании:

мазута $1,05 \div 1,1$; природного газа $1,05 \div 1,1$; твердого топлива: камерное (факельное) сжигание $1,15 \div 1,2$; слоевое сжигание $1,3 \div 1,4$.

TalTach Virumaa

Можно отметить следующие формулы для определения коэффициента избытка воздуха по результатам газового анализа¹:

- азотная формула

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{[O_2] - 0,5[CO_2 + H_2] - 2[CH_4]}{[N_2]}}$$

- кислородная

$$\alpha = \frac{21}{21 - [O_2]}$$

- по содержанию сухих трёхатомных газов в продуктах сгорания:

$$\alpha = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}; RO_2^{\max} = \frac{21}{1 + \beta}; \beta = 2,355 \cdot \frac{[H^e] - \frac{1}{8}[O^e]}{[C^e] + 0,375 \cdot [S^e]}$$

Значения $RO_2^{\max}$

находятся в следующих пределах для различных

видов топлив, %:

твёрдое топливо..... 18÷20;

мазут..... 16÷17;

природный газ..... 11÷1

Задание. 3

Определение скорости выгорания угольной части

Частица угольной пыли размером $a \times b \times c \rightarrow 0,9 \times 0,3 \times 0,3$ мм и плотностью $\rho_v = 1000$ кг/м³ движется в вертикальной трубе высотой $L = 8$ метров с дымовыми газами, которые имеют

¹ Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения.

Ч.І. Топливо: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2011. – 84 с.: ил. 15. с.25.

скорость $w_z=20$ м/с, температуру $T_r= 1000$ К, плотность $\rho_z= 1,25$ кг/м³ и коэффициент кинематической вязкости $\nu_z= 150 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Определить время пребывания частицы в трубе.

Провести расчёт времени пребывания используя следующую схему.

1. Определение эквивалентного диаметра шара, который аэродинамически подобен частице угля в форме параллелепипеда, мм.

$$d = \sqrt[3]{\frac{6a \cdot b \cdot c}{\pi}} =$$

2. Критерий Кирпичёва - [критерий подобия тепловых](#) потоков, подводимых к твердому телу)

$$Ki = d \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot g(\rho_q - \rho_z)}{3 \cdot \nu^2 \cdot \rho_z}}$$

3. Критерий Шиллера $Re \leq 100$

$$Sch = \frac{0,04 \cdot Ki^{1,5}}{1 + 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot Ki^{1,5}}$$

4. Скорость витания

$$w_b = \frac{Sch}{\sqrt[3]{\frac{3 \cdot \rho_z}{4 \cdot g(\rho_q - \rho_z) \cdot \nu_z}}}$$

5. Проверка

$$Re = \frac{w_b \cdot d}{\nu_z}$$

6. Время пребывания

$$\tau = \frac{L}{w_z - w_g}$$

Вопросы для самопроверки

1. Что такое «теоретически необходимое» количество воздуха горения?

2. Что такое коэффициент избытка воздуха?

3. *Запишите реакции окисления горючих компонентов твердого топлива.*
4. *Определите по этим реакциям количество кислорода для окисления 1кг топлива.*
7. *Теоретический состав продуктов сгорания.*
8. *Действительный состав продуктов сгорания топлива.*