



Стерлитамакский филиал БашГУ

Лекция

Тема №2. Расчет процесса горения: состав горючей системы и расчет количества воздуха, необходимого для горения.

Преподаватель: Шафиков Рустам Минехаевич



Список источников

1. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ
2. С.А. Карауш. Учебник «Теория горения и взрыва». – М; Издательский центр «Академия», 2013.
3. Девисилов В. А., Дроздова Т. И. Теория горения и взрыва: практикум: учеб. пособие для вузов. – М.: Форум, 2012.
4. Кукин, П.П., Юшин В. В. – Теория горения и взрыва: учеб. пособие для бакалавров. – М.: Юрайт, 2013.
5. БиблиоТех»: <https://sspaedu.bibliotech.ru>
6. Университетская библиотека online»: www.biblioclub.ru
7. Студенческая электронная онлайн библиотека: <http://yourlib.net/>



Расчет процесса горения

Воздух – это смесь газов, основными компонентами которой является азот (78% по объему), кислород (21%) и аргон (0,9%). Азот и аргон в процессе горения в химическом взаимодействии участия практически не принимают, так как являются инертными газами. Однако они влияют на этот процесс, снижая скорость реакции за счет расхода тепла на их нагрев. Для многих расчетов (определение необходимого объема воздуха, объема продуктов сгорания, температуры горения и т. п.) необходимо составлять уравнение реакций горения веществ в воздухе. В этих уравнениях необходимо учитывать долю азота и аргона в воздухе.



Расчет процесса горения

В процессе горения любых топлив участвует большое количество воздуха. Так, для полного сгорания 1 кг дров требуется $(4 \div 5) \text{ м}^3$ воздуха, 1 кг каменного угля – $(8 \div 9) \text{ м}^3$, 1 кг нефти – $(10 \div 12) \text{ м}^3$. При пожарах, где горение протекает с большим избытком воздуха, эти цифры увеличиваются в полтора-два раза.

В табл. 4.3 приведены значения теоретического (минимально необходимого) количества воздуха, для полного сжигания некоторых горючих веществ. Приведенные в табл. 4.3 значения, являются осредненными, так как химический состав древесины, торфа, нефти и угля может существенно различаться.



Расчет процесса горения

Таблица 4.3

Количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг горючего

Горючее	Масса воздуха, кг	Объем воздуха, м ³
Сухое дерево	5.9	4.6
Торф	7.5	5.8
Антрацит	11.6	9.0
Нефть	14.0	10.8
Метан	12.3	9.5
Ацетилен	15.4	11.9

Для расчета горения конкретного топлива проводят расчет материального баланса процесса горения. Порядок расчета зависит от вида топлива. Рассмотрим основные методы расчета.



Расчет процесса горения

Горючее вещество – определенное химическое соединение

Если горючее вещество представляет собой определенный химический элемент или соединение, то для него можно записать уравнение химической реакции горения. В этом случае, независимо от агрегатного состояния вещества (твердое, жидкое или газообразное), необходимое для полного сгорания количество воздуха определяется непосредственно по уравнению реакции горения.

Для проведения расчетов необходимо знать относительные молекулярные массы основных веществ, участвующих в горении. В табл. 4.4 приведены значения M для основных компонентов органических и углеводородных топлив. Отметим, что азот воздуха не участвует в горении и является инертным веществом, так же как и входящие в состав воздуха инертные газы.

Таблица 4.4

Относительные молекулярные массы веществ

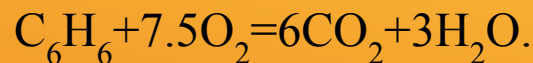
Веществ о	O ₂	C	H ₂	S	Воздух	Fe	Al	N	Mg
M	32	12	2	32	29	56	27	14	24



Расчет процесса горения

Рассмотрим порядок расчета на примере горения бензола C_6H_6 .

- Запишем уравнение реакции горения:



- В это уравнение подставим значения относительных молекулярных масс входящих в него элементов:

$$6 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 7.5(2 \cdot 16) = 6(1 \cdot 12 + 2 \cdot 16) + 3(1 \cdot 2 + 1 \cdot 16).$$

Поскольку молярная масса M (кг/кмоль) вещества численно совпадает с его относительной молекулярной массой, последнее соотношение можно записать в виде:

$$\underbrace{78 \text{ кг}}_{C_6H_6} + \underbrace{240 \text{ кг}}_{O_2} = \underbrace{264 \text{ кг}}_{CO_2} + \underbrace{54 \text{ кг}}_{H_2O}$$

Таким образом, для сжигания 78 кг бензола C_6H_6 необходимо 240 кг кислорода.

- Определим массу кислорода m_k , необходимую для сжигания 1 кг бензола:





Расчет процесса горения

- По известной плотности кислорода при нормальных физических условиях ($\rho_n=1.429 \text{ кг/м}^3$), взятой из табл. 4.1, определим объем кислорода V_k , необходимый для полного сгорания 1 кг бензола:

$$V_k = \frac{m_k}{\rho} = \frac{3.08}{1.429} = 2.155 \text{ м}^3$$

- Поскольку горение происходит в среде воздуха, расчет объема воздуха проведем с учетом объемного содержания кислорода в воздухе (21 %):

$$V_e = 2.155 \cdot 4.762 = 10.262 \text{ м}^3.$$

Таким образом, для полного сгорания 1 кг бензола при нормальных физических условиях необходимо 10.262 м^3 воздуха.

- Проведем расчет объема воздуха при заданных условиях (например, при $T=+20^\circ\text{C}$ (293 К), $p=750 \text{ мм Нг}$) с помощью формулы 4.6:

$$V_e = \frac{10.262 \cdot 760}{273} \cdot \frac{293}{750} = 11.16 \text{ м}^3.$$



Расчет процесса горения

Таким образом, для полного сгорания 1 кг бензола при заданных условиях необходимый объем воздуха составляет $V_в=11.16 \text{ м}^3$.

Горючее вещество – смесь газов

К этой группе веществ относятся технические горючие газы – природный, светильный, водяной, генераторный, колошниковый и другие. Все они могут содержать окись углерода CO, метан CH₄, водород H₂, сероводород H₂S и другие компоненты. Кроме того, они могут содержать азот N₂ и кислород O₂. Азот, как было отмечено ранее, является инертным веществом и не участвует в реакции горения. Содержащийся в газах кислород является окислителем, и при составлении уравнений баланса массы вычитается.

Исходными данными для расчета являются процентный состав газа (объем. %), температура T и давление p воздуха.

Порядок расчета необходимого количества воздуха рассмотрим на примере горения колошникового газа при $T=+15^\circ\text{C}$, $p=760 \text{ мм Hg}$. Состав газа и плотности входящих в него компонентов при нормальных физических условиях приведены в табл. 4.5.



Расчет процесса горения

Таблица 4.5

Состав колошникового газа

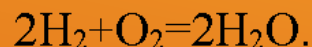
Газ	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	O ₂
Содержание, объем. %	12	25	1	2	60	1
ρ, кг/м ³	1.977	1.250	0.717	0.090	1.251	1.429

- Запишем уравнения реакций горения входящих в смесь газов.

Горение метана:



Горение водорода:



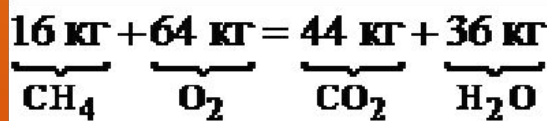
Горение угарного газа:



Азот N₂ является инертным веществом, а углекислый газ CO₂ – продуктом полного горения, поэтому для них уравнения химических реакций не записываются.

- Подставим в эти уравнения молекулярные массы входящих в них элементов.

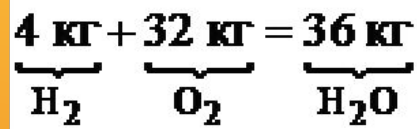
Для горения метана:



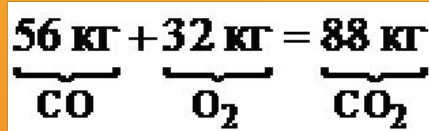


Расчет процесса горения

Для горения водорода:



Для горения угарного газа:



- Определим массу кислорода, необходимую для полного сгорания 1 кг каждого из компонентов смеси.

Для горения метана:

$$m_{\text{к}} = \frac{64}{16} = 4 \text{ кг}$$

Для горения водорода:

$$m_{\text{к}} = \frac{32}{4} = 8 \text{ кг}$$

Для горения угарного газа:

$$m_{\text{к}} = \frac{32}{56} = 0.57 \text{ кг}$$



Расчет процесса горения

- Определим объем кислорода, необходимый для полного сгорания 1 м³ каждого из компонентов смеси по формуле

$$V_{\text{к}} = m_{\text{к}} \frac{\rho_i}{\rho_{\text{к}}},$$

где $\rho_{\text{к}}$, ρ_i – плотность кислорода и i -го компонента газовой смеси.

Для горения метана:

$$V_{\text{CH}_4} = 4 \cdot \frac{0.717}{1.429} = 2.0 \text{ м}^3$$

Для горения водорода:

$$V_{\text{H}_2} = 8 \cdot \frac{0.090}{1.429} = 0.50 \text{ м}^3$$

Для горения угарного газа:

$$V_{\text{CO}} = 0.57 \cdot \frac{1.250}{1.429} = 0.50 \text{ м}^3$$

- Определим общий объем кислорода, необходимый для полного сгорания 1 м³ колошникового газа по формуле:

$$V_{\text{к}} = \frac{1}{100} [1 \cdot V_{\text{CH}_4} + 2 \cdot V_{\text{H}_2} + 25 \cdot V_{\text{CO}} - 1 \cdot V_{\text{O}_2}]$$

(4.7) 2



Расчет процесса горения

Кислород, содержащийся в составе смеси (1 объем.%), частично замещает кислород воздуха при горении, поэтому в уравнении берется со знаком «минус».

Подставляя в (4.7) значения V_{CH_4} , V_{H_2} , V_{CO} , V_{O_2} , получим:

$$V_x = \frac{1}{100} [1 \cdot 2 + 2 \cdot 0.5 + 25 \cdot 0.5 - 1 \cdot 1] = 0.145 \text{ м}^3$$

- Определим требуемое количество воздуха при нормальных физических условиях (с учетом того, что на 1 м³ кислорода приходится 4.762 м³ воздуха):

$$V_a = 0.145 \cdot 4.762 = 0.69 \text{ м}^3$$

- Проведем расчет объема воздуха при заданных условиях ($T=+15^\circ\text{C}$, $p=760$ мм Нг):

$$V_a = \frac{0.69 \cdot (273 + 15)}{273} = 0.728 \text{ м}^3$$



Расчет процесса горения

Таким образом, для полного сгорания 1 м^3 колошникового газа в рассматриваемых условиях необходимо 0.728 м^3 воздуха. Определяемое таким образом количество воздуха называется теоретически необходимым. Практически при горении на пожарах и в горелочных устройствах различного типа, реальный расход воздуха значительно больше. Отношение реального расхода воздуха к теоретически необходимому называется коэффициентом избытка воздуха. В печах, камерах сгорания и других технических устройствах коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.1 \div 1.5$, при пожарах эта величина может быть существенно больше и достигать значений $\alpha > 2$.



Расчет процесса горения

Горючее вещество – смесь сложных химических соединений

Многие горючие вещества являются сложными химическими соединениями или смесями, которые трудно или невозможно описать определенной химической формулой (например, черный порох, твердые ракетные топлива, древесина, торф, уголь, нефтепродукты и т.д.). Это, как правило, твердые или жидкие топлива. Элементарный состав таких топлив записывается в виде эквивалентной формулы или суммы содержания в них элементарных веществ (масс. %) –углерода, водорода, кислорода, серы, азота.

Определение элементарного состава вещества производится лабораторным анализом. Если в состав топлива входит влага W (вода) и зола A (негорючие вещества), то элементарный состав записывается с учетом этих компонентов.

В качестве примера рассмотрим торф, содержание отдельных элементов в котором приведено в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Элементарный состав торфа

Вещество	C	H	O	S	N	A
Содержание, масс.%	56.4	5.56	24.0	0.06	3.06	10.92



Расчет процесса горения

Эквивалентная формула данного вещества записывается в следующем виде:

$$[56.4]_{\text{C}} + [5.56]_{\text{H}} + [24.0]_{\text{O}} + [0.06]_{\text{S}} + [3.06]_{\text{N}} + [10.92]_{\text{A}} = 100\%$$

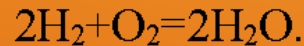
Рассмотрим порядок расчета необходимого количества воздуха на примере сгорания 5 кг торфа (табл. 4.6) при давлении $p=740$ мм Hg и температуре $T=20^{\circ}\text{C}$.

- Запишем уравнения реакций горения для горючих компонентов, входящих в состав торфа (углерод, водород, сера).

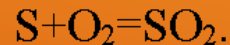
Горение углерода:



Горение водорода:



Горение серы:



- Подставим в эти уравнения молекулярные массы входящих в них элементов.

Для горения углерода:

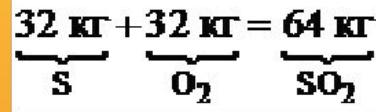
$$\underbrace{12 \text{ кг}}_{\text{C}} + \underbrace{32 \text{ кг}}_{\text{O}_2} = \underbrace{44 \text{ кг}}_{\text{CO}_2}$$

Для горения водорода:

$$\underbrace{4 \text{ кг}}_{\text{H}_2} + \underbrace{32 \text{ кг}}_{\text{O}_2} = \underbrace{36 \text{ кг}}_{\text{H}_2\text{O}}$$



Расчет процесса горения



Для горения серы:

- Определим массу кислорода, необходимую для полного сгорания 1 кг каждого из элементов.

$$m_K = \frac{32}{12} = 2.67 \text{ кг}$$

Для горения углерода:

$$m_K = \frac{32}{4} = 8 \text{ кг}$$

Для горения водорода:

$$m_K = \frac{32}{32} = 1 \text{ кг}$$

Для горения серы:

- Определим массу кислорода, необходимую для полного сгорания 1 кг торфа:

$$m_K = \frac{1}{100} \{ 2.67 \cdot [56.4]_C + 8 \cdot [5.56]_H + 1 \cdot [0.06]_S - 1 \cdot [24.0]_O \} = 1.71 \text{ кг}$$

Кислород, содержащийся в торфе (24 масс.%), частично замещает кислород воздуха при горении, поэтому в уравнении берется со знаком «минус».

- Определим требуемую массу воздуха (с учетом того, что на 1 кг кислорода приходится 4.348 кг воздуха):

$$m_G = 1.71 \cdot 4.348 = 7.435 \text{ кг}$$



Расчет процесса горения

Определим требуемый объем воздуха при горении при нормальных физических условиях:

$$V_{\text{e}} = \frac{7.435}{1.293} = 5.75 \text{ м}^3$$

- Проведем расчет объема воздуха при горении 1 кг торфа при заданных условиях ($T=+20^{\circ}\text{C}$, $p=760$ мм Hg):

$$V_{\text{e}} = 5.75 \cdot \frac{760 \cdot (273 + 20)}{740 \cdot 273} = 6.34 \text{ м}^3$$

- Найдем объем воздуха, необходимый для полного сгорания 5 кг торфа при заданных условиях:

$$V_{\text{e}} = 6.34 \cdot 5 = 31.7 \text{ м}^3$$

Таким образом, для полного сгорания 5 кг торфа при заданных условиях необходимо 31.7 м^3 воздуха.