# 2. Материальный баланс процессов горения

## 2.1 Расчёт объёма воздуха, необходимого для горения веществ

При решении многих практических вопросов необходимо знать количество воздуха, расходуемого на горение единицы массы или объёма горючего вещества, количество образовавшихся продуктов горения и их процентный состав. Рассмотрим расчётные методы определения отдельных составляющих материального баланса процессов горения. Методика расчёта объёма воздуха для горения зависит от состава горючего вещества, его агрегатного состояния и условий горения. По своей природе горючие вещества могут быть индивидуальными химическими соединениями и смесями сложных химических соединений. К индивидуальным химическим соединениям относятся такие вещества, которые имеют постоянное химическое строение и постоянную химическую формулу, например бензол (*С6Н6*), пропанол (*С3Н7ОН*), уксусная кислота (*СН3СООН*) и др. Смеси сложных химических соединений – вещества, не имеющие определённого химического строения, и их состав одной химической формулой выразить нельзя. К этой группе веществ относятся уголь, нефть, древесина, жиры и др. Состав этих веществ выражается в процентном содержании отдельных элементов или газов (*C, S, H*, и др. или *СО,* *СН4, Н2S* и др.).

Различают объём воздуха теоретически необходимый для сжигания вещества  и действительно израсходованный объём воздуха . При этом

.

Множитель *α* называется коэффициентом избытка воздуха. Он показывает во сколько раз объём израсходованного воздуха больше теоретического объёма воздуха, необходимого для полного сгорания единицы количества вещества в стехиометрической смеси.

Разность между действительно необходимым и теоретическим объёмом воздуха называется избытком воздуха.

.

Из уравнений (1.1) и (1.2) следует, что

.

Для удобства расчётов все горючие вещества разделены на четыре группы в зависимости от состава и агрегатного состояния. В табл. 2-1 приведены формулы для расчёта теоретически необходимого объёма воздуха для сгорания всех групп веществ.

Табл. 2‑ Расчётные формулы, для определения теоретического количества воздуха, необходимого для сгорания различных типов горючих веществ.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Группа горючих веществ | Формула | Размерность |
| Индивидуальное горючее вещество в газообразном состоянии |  | м3/м3, кмоль/кмоль |
| Индивидуальное горючее вещество в конденсированном состоянии |  | м3/кг |
| Смесь газов |  | м3/м3, кмоль/кмоль |
| Вещество сложного состава в конденсированном состоянии |  | м3/кг |

*Мг* – молярная масса горючего, *Vt* – молярный объём газа при заданных условиях (м3/кмоль), - процентное (по объёму) содержание *i*-того горючего газа и кислорода соответственно в горючей смеси. *C,H,S,O*- массовые проценты соответствующих элементов в составе горючего

Для вычисления *Vt* воспользуемся объединённым газовым законом

,

где *P0* – нормальное давление (101,3 кПа или 760 мм. рт. ст.), *P, T*-заданные давление и температура (в К). Молярный объём газа при нормальных условиях (P0=101,3 кПа или760 мм. рт. ст. *T0* – 273К) равен 22,413 м3/кмоль.

**Пример 1:** *Определить теоретические объём и массу воздуха, необходимые для сгорания 1 м3 метана (CH4) при нормальных условиях.*

Горючее – индивидуальное химическое соединение. Для расчёта следует воспользоваться формулой . Составим уравнение реакции

*CH4 + 2(O2 + 3,76N2) = CO2 +2H2O + 2·3,76N2*.

Из уравнения находим *β* = 2. По формуле находим  м3/м3. по формуле с учетом находим массу воздуха.  кг/м3.

**Пример 2:** *Определить теоретически необходимый объём воздуха для сжигания 1 кг бензола (С6H6) при нормальных условиях.*

Горючее вещество – индивидуальное химическое соединение в конденсированном состоянии. Воспользуемся для расчётов формулой . Составим уравнение реакции

*C6H6 + 7,5(O2 + 3,76N2) = 6CO2 + 3H2O + 7,5·3,76N2*.

По уравнению найдём *β*=7,5. Найдём молярную массу бензола, зная, что молярные массы углерода 12 и водорода – 1 кг/кмоль соответственно.  кг/кмоль. Найдём теоретический объём воздуха  м3/кг.

**Пример 3:** *Определить объём и массу воздуха необходимого для сжигания 1 кг горючего вещества следующего состава: C – 60%, H – 5%. O – 25%, N – 5%, W – 5%. Коэффициент избытка воздуха α=2,5, температура – 305 К, давление -99500 Па.*

Горючее сложного состава, поэтому теоретическое количество воздуха определим по формуле  м3/кг. Действительный объём воздуха при нормальных условиях найдём по формуле  м3/кг. Находим объём воздуха, израсходованного на горение вещества при заданных условиях по формуле  м3/кг. Массу воздуха найдём по формуле с учётом  кг/кг.

**Пример 4:** *Определить объём воздуха, пошедшего на сжигание 5 м3 газовой смеси состава CH4 – 20%, C2H2 – 40%, CO – 10%, N2 – 5%, O2 – 25%.. Коэффициент избытка воздуха – 1,8.*

Горючее – смесь газов. Составим для всех горючих компонентов смеси уравнения реакций

*CH4 + 2(O2 + 3,76N2) = CO2 + 2H2O + 2·3,76N2*

*C2H2 + 2,5(O2 + 3,76N2) = 2CO2 + H2O + 2,5·3,76N2*

*CO + 0,5(O2 + 3,76N2) = CO2 + 0,5·3,76N2.*

Определив коэффициент при воздухе для каждой реакции, и воспользуемся формулой .  м3/м3. Для горения 5 м3 понадобится 5·5,7 = 28,5 м3 воздуха. Действительный объём воздуха найдём по формуле  м3.

**Пример 5:** *Определить массу2,4- динитротолуола, сгорающего в замкнутом объёме 100 м3 если остаточное содержание кислорода в продуктах горения составило 12 %.*

В продуктах горения находится кислород, значит горение протекало в избытке воздуха. коэффициент избытка воздуха определим по формуле . Составим уравнение реакции

*C7H6(NO2)2 + 6,5(O2 + 3,76N2) = 7CO2 + 3H2O +N2 + 6,5·3,76N2*

Молекулярная масса горючего – 182 кг/кмоль. Теоретически необходимый объём воздуха по формуле м3/кг. Отсюда коэффициент избытка воздуха . Действительный объём воздуха составит  м3/кг. Массу сгоревшего горючего найдём из отношения объёма воздуха во всём помещении к объёму воздуха, необходимого для сгорания одного килограмма.  кг.

## 2.2 Расчёт объёма и состава продуктов горения

При расчёте объёма продуктов горения пользуются формулами, приведёнными в табл. 2-2.

Табл. 2‑2 Расчётные формулы для определения объёмов продуктов горения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Группа горючих веществ | Формула | Размерность |
| Индивидуальное горючее вещество в газообразном состоянии |  | м3/м3, кмоль/кмоль |
| Индивидуальное горючее вещество в конденсированном состоянии |  | м3/кг |
| Смесь газов |  | м3/м3, кмоль/кмоль |
| Вещество сложного состава в конденсированном состоянии |  | м3/кг |

Здесь *A* – содержание негорючих компонентов (золы) в горючем, *W* – влажность горючего *ni* – коэффициенты при продуктах горения в уравнении реакции, *φi* – объёмная доля газообразного горючего в смеси. В формуле первое слагаемое даёт объём *CO2*, второе – *H2O*, третье - *SO2*, четвёртое – *N2*.

Действительный объём продуктов горения будет складываться из объёма продуктов сгорания и избыточного воздуха.



Процентный состав продуктов горения рассчитывается исходя из количества молей продуктов горения с учётом избыточного числа молей кислорода и азота. Процентное содержание продукта горения *X* составит

,

где



и



количества кислорода и азота, перешедшие из избыточного воздуха в продукты горения.

Если горючее имеет сложный состав и составить уравнение реакции невозможно, то состав продуктов горения может быть найден по формуле

,

где *Vi* – объём i-того продукта горения, Объёмы кислорода и азота воздуха в составе продуктов реакции составят



и



соответственно**.**

Если известно содержание кислорода в продуктах горения, то коэффициент избытка воздуха определяется по формуле

.

Если содержание кислорода в окислительной среде отличается от его содержания в воздухе, то формула принимает следующий вид

,

где  - содержание кислорода в окислительной среде, а  - теоретически необходимый объём окислительной среды.

Перейти от объёма воздуха к его массе можно зная плотность воздуха

.

Считая воздух идеальным газом, и применяя уравнение Менделеева-Клапейрона для плотности воздуха, получим выражение

,

где *M,* *φ* – молярная масса и объёмная доля соответствующего вещества, *P0* = 101,3 кПа, *T0* – 273,15 К – нормальные давление и температура, *V0* =22,413 м3/кмоль – молярный объём газа при нормальных условиях. В составе воздуха по-прежнему учитываем только два компонента – кислород и азот. Подставляя числовые значения, получаем зависимость плотности воздуха от температуры и давления

.

Для приведения объёма воздуха или продуктов горения к заданным условиям используется объединённый газовый закон

,

где *P,T,V –* заданные давление, температура и искомый объём, *P0* – 101325 Па*, T0* = 273,15 К - нормальные давление и температура. *V0* – объём газа при нормальных условиях.

**Пример 6:** *Определить объем продуктов горения при сгорании 1 кг фенола, если температура горения 1200 К, давление 95 000 Па, коэффициент избытка воздуха 1,5.*

Горючее – индивидуальное химическое соединение в конденсированном состоянии. Воспользуемся формулой . Запишем уравнение реакции горения.

*C6H5OH + 7(O2 + 3,76N2) = 6CO2 +3H2O + 7·3,76N2*

Молярная масса горючего 98 кг/кмоль. Теоретический объём продуктов горения при нормальных условиях составит  м3/кг. Действительный объём продуктов горения найдём по формуле с учётом формулы для расчёта теоретически необходимого объёма воздуха. м3/кг. Объём продуктов горения при заданных условиях найдём, используя объединённый газовый закон .

 м3/кг**.**

**Пример 7:** *Определить объем продуктов горения при сгорании 1 кг органической массы состава: С – 55 %, O – 13 %, Н – 5 %, S – 7%, N – 3 %, W – 17 %, если температура горения 1170 К, коэффициент избытка воздуха – 1,3.*

Горючее – вещество сложного состава. Для расчёта объёма продуктов горения воспользуемся формулой

м3/кг. Действительный объём продуктов горения найдём по формулам и .  м3/кг. Пересчитаем объём продуктов горения для заданной температуры горения, используя  м3/кг.

**Пример 8:** *Рассчитать объем продуктов горения при сгорании 1 м3 газовой смеси, состоящей из С3Н6 – 70 %, С3Н8 – 10 %, СО2 – 5 %, O2 – 15 %, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха 2,8. Температура окружающей среды 298 К.*

Горючее – смесь газов. Для расчёта объёма продуктов горения запишем уравнения реакций горения и воспользуемся формулой

*C3H6 + 4,5(O2 + 3,76N2) = 3CO2 +3H2O + 4,5·3,76N2*

*C3H8 + 5(O2 + 3,76N2) = 3CO2 + 4H2O + 5·3,76N2*.

Рассчитаем теоретический объём продуктов горения м3/м3. Рассчитаем действительный объём продуктов горения с учётом избытка воздуха (по формулам и )  м3/м3. Для пересчёта этого объёма продуктов горения на заданные условия воспользуемся объединенным газовым законом  м3/м3.

**Пример 9:** *Определить состав продуктов горения метилэтилкетона CH3COC2H5.*

Состав горючего выражается химической формулой. В данной задаче удобно воспользоваться формулами . Уравнение реакции имеет вид

*CH3COC2H5 + 5,5(O2 + 3,76N2) = 4CO2 + 4H2O + 5,5·3.76N2*.

По умолчанию коэффициент избытка воздуха равен 1 (т.е. расчёт ведётся для стехиометрической смеси). Так как коэффициенты при углекислом газе и воде равны, то процентное содержание обоих продуктов будет одинаково , .

**Пример 10.** *Определить объем и состав (% об.) продуктов горения 1 кг минерального масла состава: С 85 %, H 15 %, если температура горения 1450 К, коэффициент избытка воздуха 1,9.*

Горючее – вещество сложного состава в конденсированном состоянии. Состав продукта горения удобно определять по объёму продуктов реакции (формула ). Воспользуемся формулой для вычисления объёмов отдельных продуктов горения. общий объём продуктов горения найдём с учётом избытка воздуха по формуле .  м3/кг,  м3/кг,  м3/кг. Суммарный объём продуктов реакции – 1,6 + 1,7 + 9,1 = 12,4 м3/кг. Действительный объём продуктов горения будет  м3/кг.  м3/кг. Состав продуктов горения не зависит от температуры, поэтому вычислять объём продуктов горения при температуре горения нет нужды. состав продуктов горения по формулам - , , %, %.

## 2.3 Задачи для самостоятельного решения

**1.** Определить объём воздуха, необходимого для сгорания 50 м3 ацетилена (*C2H2*) приα=1,7

**2.** Определить объёмы воздуха, продуктов горения и процент содержания продуктов горения 2 м3 этана (*C2H6*). Температуру продуктов горения принять 1200 К, давление 101,3 кПа, избыток воздуха α=1,2.

**3.** Определить объём воздуха, необходимого для сгорания 15 м3 бутана (*C4H10*) при температуре 100С и давлении 750 мм рт. ст., если горение протекает с коэффициентом избытка воздуха, равным 1,4 (α=1,4).

**4.** Рассчитать объём и состав (в %) продуктов горения при сгорании сероводорода (*H2S*) объёмом 12 м3 при температуре 300С и давлении 106 кПа. Коэффициент избытка воздуха составил 1,1.

**5.** Рассчитать объём воздуха, объём продуктов горения и процентное содержание в них диоксида углерода при полном сгорании 5 м3 этилена (*C2H4*), если горение протекает с избытком воздуха (коэффициент избытка воздуха 1,7).

**6.** Рассчитать количество амилбензола (*C6H5C5H11*), которое может сгореть в закрытом помещении объёмом 200 м3, если горение прекратилось при остаточном содержании кислорода 12 %. Начальная температура в помещении 240С, давление 98 кПа.

**7.** Определить, какое количество бутилацетата (*CH3CO2C4H9*) может сгореть в помещении объёмом 200 м3, если его горение прекращается при содержании кислорода воздуха, равном 13,8% (условия нормальные).

**8.** Определить объёмы продуктов горения и воздуха при сжигании 7 кг гексана (*C6H14*). Процесс горения протекал при температуре 33°С и давлении 730 мм. рт. ст. Температура продуктов горения принять равной 1300 К.

**9.** Определить объёмы продуктов горения и воздуха при сжигании 11 кг ацетона (*C3H6O*). Процесс горения протекал при температуре 300С и давлении 720 мм рт. ст. Температуру продуктов горения принять равной 1300 К.

**10.** Определить объём продуктов горения и воздуха при сжигании 17 кг толуола (*C7H8*). Процесс горения протекал при температуре 300С и давлении 745 мм рт. ст. Температуру продуктов горения принять равной 1100 К.

**11.** Рассчитать объём воздуха и объём продуктов горения при полном сгорании 6 кг целлюлозы, состоящей из 80 % углерода, 13 % водорода и 7 % кислорода, если горение протекает при температуре 250С и давлении 95 кПа. Коэффициент избытка воздуха равен 1,4.

**12.** Определить объём воздуха, необходимого для сгорания 6 кг диэтилового эфира (*C4H10O*) при температуре 150С и давлении 750 мм рт. ст. Коэффициент избытка воздуха составил 1,3.

**13.** Определить, какое количество бензола (*C6H6*) сгорело в закрытом помещении объёмом 180 м3, если известно, что горение его прекратилось при содержании кислорода в воздухе, равном 14,6%. Температура до пожара была 190С и давление 100 кПа.

**14.** Рассчитать количество сгоревшего аллилового (*C3H6O*) спирта и процентное содержание водяного пара в продуктах горения, если на его сгорание при температуре 230С и давлении 99 кПа израсходовано 110 м3 воздуха.

**15.** Определить коэффициент избытка воздуха, если для сгорания 8 кг этилацетата (*CH3CO2C2H5*) израсходовано 212 м3 воздуха при температуре 250С и давлении 760 мм рт. ст.

**16.** Рассчитать коэффициент избытка воздуха и процентное содержание в продуктах горения диоксида углерода, если на полное сгорание 4 кг этилпропилового эфира (C5H12O) при температуре 220С и давлении 92 кПа израсходовано 70 м3 воздуха.

**17.** Сгорает 3 кг акролеина (*C3H4O*) при температуре 210С и давлении 98 кПа. Рассчитать объём воздуха, перешедшего в продукты горения, и процентное содержание в них водяного пара, если горение протекает с избытком воздуха (коэффициент избытка воздуха равен 1,2).

**18.** Рассчитать объём воздуха и продуктов горения, образующихся при сгорании 10 кг глицерина (*C3H6O3*), если горение протекало при 250С и давлении 102 кПа. Коэффициент избытка воздуха составил 1,3.

**19.** Рассчитать объём и состав (в %) продуктов горения, образующихся при сгорании 8 кг пропилацетата (*CH3CO2C3H7*), если горение протекало при 200С и давлении 103 кПа. Коэффициент избытка воздуха составил 1,4.

**20.** Рассчитать объём газовой смеси, состоящей из 45 % бутана, 30 % метана, 20% ацетилена и 5 % кислорода, если на её сгорание при нормальных условиях израсходовано 80 м3 воздуха. Коэффициент избытка воздуха равен 1,6.

**21.** Рассчитать количество угля, состоящего из 70 % углерода, 20 % водорода и 10 % серы и объём образовавшихся при этом продуктов горения, если на сгорание угля при нормальных условиях израсходовано 100 м3 воздуха.

**22.** Рассчитать объём воздуха и объём продуктов горения при полном сгорании 7 м3 газовой смеси, состоящей из 57 % водорода, 18 % окиси углерода и 25 % метана, если горение протекает с избытком воздуха (коэффициент избытка воздуха равен 1,3).

**23.** Рассчитать объём воздуха и объём продуктов горения при полном сгорании 6 кг церезина, состоящего из 80 % углерода, 15 % водорода и 5 % кислорода, если горение протекает при температуре 250С и давлении 95 кПа. Коэффициент избытка воздуха равен 1,5.

**24.** Рассчитать концентрацию пропанола (*C3H8O*), сгоревшего в закрытом помещении объёмом 150 м3, если горение прекратилось при остаточном содержании кислорода 9%. Начальная температура в помещении 213 С, давление 99 кПа.

**25.** Определить объём и состав продуктов горения (в об. %) смеси газов, если горение происходит при коэффициенте избытка воздуха α (см. табл. 2-3).

**26.** Рассчитать объём воздуха и продуктов горения при сгорании горючего вещества заданной массы при заданных условиях (см. табл. 2-4).

**Табл. 2-3**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Состав смеси (об %)** | **№ задания** | | | | | | | | | |
| **25.1** | **25.2** | **25.3** | **25.4** | **25.5** | **25.6** | **25.7** | **25.8** | **25.** | **25.10** |
| ***CO* оксид углерода** |  | 10 |  |  |  | 43 |  | 10 |  | 5 |
| ***H2* водород** | 50 |  |  |  |  |  |  |  | 25 | 5 |
| ***CH4* метан** |  |  | 20 |  |  | 36 |  | 20 |  | 60 |
| ***C2H6* этан** |  |  |  | 45 | 45 |  | 24 |  | 5 |  |
| ***C3H8* пропан** |  |  |  |  |  |  |  | 14 |  |  |
| ***C4H10* бутан** | 8 |  |  |  | 20 |  |  |  |  |  |
| ***C2H4* этилен** | 20 | 22 | 28 |  |  |  | 16 | 2 |  |  |
| ***C3H6* пропилен** |  |  |  | 20 |  | 21 |  |  |  |  |
| ***C2H2* ацетилен** |  | 8 |  |  |  |  | 10 |  | 20 |  |
| ***CO2* углекислый газ** | 20 | 10 | 18 | 20 | 20 |  | 10 | 26 |  | 25 |
| ***N2* азот** |  | 50 | 24 |  | 15 |  | 15 | 25 | 30 |  |
| ***O2* кислород** | 2 |  | 10 | 15 |  |  | 25 | 3 | 20 | 5 |
| α | 1,2 | 2 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,1 | 1,3 |

**Табл. 2-4**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **задания** | **Вещество** | **Элементный состав вещества** | | | | | | **t0 C** | **Масса вещества, кг** |
| **C** | **H** | **O** | **S** | **W(влажность)** | **A(зола)** |
| **25.1** | **Церезин** | 85 | 14 | 1 | 0 | 0 | 0 | 12 | 3 |
| **25.2** | **Уголь** | 70 | 4 | 4 | 3 | 19 | 0 | 14 | 4 |
| **25.3** | **Древесина** | 46 | 6 | 37 | 1 | 10 | 0 | 16 | 5 |
| **25.4** | **Бензин** | 85 | 14 | 0 | 1 | 0 | 0 | 17 | 6 |
| **25.5** | **Нефть** | 82 | 8 | 0 | 10 | 0 | 0 | 18 | 7 |
| **25.6** | **Мазут** | 83 | 11 | 1 | 4 | 1 | 0 | 20 | 8 |
| **25.7** | **Керосин** | 80 | 14 | 3 | 1 | 2 | 0 | 22 | 9 |
| **25.8** | **Сланец** | 35 | 5 | 10 | 4 | 16 | 30 | 24 | 10 |
| **25.9** | **Каменный уголь** | 75 | 4 | 2 | 2 | 4 | 13 | 26 | 12 |
| **25.10** | **Антрацит** | 70 | 3 | 4 | 0.2 | 5,8 | 17 | 28 | 14 |