

МЧС РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МЧС РОССИИ



## **ХИМИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ  
И  
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

по специальности 280705.65 – "Пожарная безопасность"

Санкт-Петербург  
2013

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

---

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ**

---

**Кафедра физико-химических основ процессов горения и  
тушения**

## **ХИМИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ  
И  
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

по специальности 280705.65 – "Пожарная безопасность"

Санкт-Петербург  
2013

Химия процессов горения: Методические рекомендации по выполнению контрольной работы и контрольные задания по специальности 280705.65 – "Пожарная безопасность". СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2013. – 19 с.

Составитель: Е.Г. Коробейникова, кандидат химических наук,  
доцент

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Приступая к изучению курса "Химия процессов горения", необходимо ознакомиться с программой, настоящими методическими указаниями и списком рекомендуемой литературы.

Усвоив основные теоретические положения отдельных тем курса, слушатель может переходить к решению задач по этой дисциплине.

Задание на контрольную работу состоит из 100 вариантов. Вариант контрольной работы определяется по таблице 1 по двум последним цифрам номера зачетной книжки. Номер расчетного задания соответствует номеру вещества из таблицы 2.

Работа должна быть выполнена разборчивым почерком, грамотно и аккуратно оформлена.

**Задания для выполнения контрольной работы      Таблица 1**

<i>Две последние цифры номера зачетной книжки</i>	<i>Номер расчетного задания</i>	<i>Две последние цифры номера зачетной книжки</i>	<i>Номер расчетного задания</i>
00	1	34	34
01	2	35	1
03	3	36	2
04	4	37	3
05	5	38	4
06	6	39	5
07	7	40	6
08	8	41	7
09	9	42	8
10	10	43	9
11	11	44	10
12	12	45	11
13	13	46	12
14	14	47	13
15	15	48	14
16	16	49	15
17	17	50	16
18	18	51	17
19	19	52	18
20	20	53	19
21	21	54	20
22	22	55	21
23	23	56	22
24	24	57	23
25	25	58	24
26	26	59	25
27	27	60	26
28	28	61	27
29	29	62	28
30	30	63	29
31	31	64	30
32	32	65	31

<i>Две последние цифры номера зачетной книжки</i>	<i>Номер расчетного задания</i>	<i>Две последние цифры номера зачетной книжки</i>	<i>Номер расчетного задания</i>
33	33	66	32
67	33	84	16
68	34	85	17
69	1	86	18
70	2	87	19
71	3	88	20
72	4	89	21
73	5	90	22
74	6	91	23
75	7	92	24
76	8	93	25
77	9	94	26
78	10	95	27
79	11	96	28
80	12	97	29
81	13	98	30
82	14	99	31
83	15		

## Расчетная часть задания

### 1. Общие сведения

Название вещества.

### 2. Физико-химические свойства

Агрегатное состояние; внешний вид, цвет, запах; плотность; температура плавления; температура кипения; растворимость в воде; коэффициент молекулярной диффузии пара; удельное электрическое сопротивление; диэлектрическая проницаемость; предельно допустимая концентрация ПДК (справочные данные).

**2.1. Расчет** относительной плотности паров по воздуху ( $D_{\text{возд}}$ );

**2.2. Расчет** плотности паров при нормальных условиях ( $\rho_{\text{пар}} = M/V_{\text{м}}, \text{кг/м}^3$ );

**2.3. Расчет** процентного элементного состава вещества.

**2.4. Расчет** коэффициента горючести.

### 3. Расчет характеристик горения

**3.1. Определение характера свечения пламени.**

**3.2. Низшая теплота сгорания**

По формуле Д.И. Менделеева в кДж/кг.

**3.3. Уравнение реакции горения.**

**3.4. Объем воздуха на горение (теоретический)**

По уравнению реакции горения (для 1 кг горючего вещества при нормальных условиях).

### **3.5. Объем и состав продуктов горения (теоретический)**

По уравнению реакции горения (для 1 кг горючего вещества при нормальных условиях).

### **3.6. Стехиометрическая концентрация в паровоздушной смеси**

3.6.1. Объемная концентрация (%).

3.6.2. Массовая концентрация ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$ ).

### **3.7. Концентрационные пределы распространения пламени**

**3.8. Расчет давления насыщенного пара по уравнению Антуана (для температуры  $25^{\circ}\text{C}$ ).**

## Физико-химические константы некоторых веществ

Таблица 2.

№ Зада ния	Вещество	Константы уравнения		Диэлектр. прониц.	$t_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{образ. кДж/моль}}$	$\Delta H_{\text{исп. кДж/моль}}$
		Антуана					
1.	Амиловый спирт $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	$\lg p = 6,3073 - 1287,625/(161,330 + t)$		14,4	138	- 36,39	46,05
2.	Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	$\lg p = 6,37551 - 1281,721/(237,088 + t)$		20,7	56,5	- 248,28	32,29
3.	Ацетальдегид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	$\lg p = 6,31653 - 1093,537/(233,413 + t)$		21,1	20,2	- 166,36	27,00
4.	Бензол $\text{C}_6\text{H}_6$	$\lg p = 5,61391 - 902,275/(178,099 + t)$		2,02	80,1	+ 82,9	48,14
5.	Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$	$\lg p = 5,99517 - 1166,274/(223,661 + t)$		1,890	68,74	- 167,2	28,88
6.	Гептан $\text{C}_7\text{H}_{16}$	$\lg p = 6,07647 - 1295,405/(219,819 + t)$		1,974	98,43	- 187,7	
7.	Диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	$\lg p = 6,9979 - 1098,945/(232,372 + t)$		4,22	34,5	- 252,2	26,71
8.	м-Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$	$\lg p = 6,58807 - 1906,796/(234,917 + t)$		2,374	139	- 28,4	36,84
9.	п-Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$	$\lg p = 6,25485 - 1537,082/(223,608 + t)$		2,270	138,3	- 24,4	36,56
10.	о-Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$	$\lg p = 6,28893 - 1575,114/(223,579 + t)$		2,568	144,4	- 24,4	36,71
11.	Метанол $\text{CH}_3\text{OH}$	$\lg p = 7,3527 - 1660,454/(245,818 + t)$		32,63	64,9	- 203,1	35,28
12.	Этилбензол $\text{C}_8\text{H}_{10}$	$\lg p = 6,35879 - 1590,660/(229,581 + t)$		2,4	136,2	+ 29,9	36,31
13.	Этиленгликоль $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\lg p = 8,13754 - 2753,183/(252,099 + t)$		37,7	197	- 453,8	56,93
14.	Бутанол $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	$\lg p = 8,72232 - 2664,684/(279,638 + t)$		17,7	117	- 274,6	43,83
15.	Октан $\text{C}_8\text{H}_{18}$	$\lg p = 6,09396 - 1379,556/(211,896 + t)$		1,948	125,66	- 208	34,62
16.	Пентан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	$\lg p = 5,97208 - 1062,555/(231,805 + t)$		1,844	36	- 146,4	52,12
17.	Пропанол $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	$\lg p = 7,44201 - 1751,981/(225,125 + t)$		19,7	97,8	- 257,7	46,15
18.	Пропанол-2 $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	$\lg p = 7,51055 - 1733,00/(232,380 + t)$		18,3	83,2	- 272,4	40,19
19.	Пропилбензол $\text{C}_9\text{H}_{12}$	$\lg p = 6,29713 - 1627,827/(220,499 + t)$		2,284	159	+ 7,9	38,47
20.	Толуол $\text{C}_7\text{H}_8$	$\lg p = 6,0507 - 1328,171/(217,713 + t)$		2,379	110,6	+ 50,17	33,53
21.	Уксусная кислота $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\lg p = 7,10337 - 1906,53/(255,973 + t)$		6,15	118,1	- 437,3	27,2
22.	Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$\lg p = 7,81158 - 1918,508/(252,125 + t)$		25,2	78,5	- 234,9	38,59
23.	Этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	$\lg p = 6,22672 - 1244,951/(217,881 + t)$		6,02	77	- 442,9	
24.	2,2-Диметилбутан $\text{C}_6\text{H}_{14}$	$\lg p = 5,87976 - 1081,176/(229,343 + t)$		2,02	49,7	- 185,6	
25.	Диметиловый эфир $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	$\lg p = 6,34963 - 1004,099/(254,831 + t)$		3,50	- 24,8	- 184	
26.	Дипропиловый эфир $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	$\lg p = 6,2408 - 1397,34/(240,177 + t)$		3,88	89,5	- 293,4	
27.	2-Метилбутан $\text{C}_5\text{H}_{12}$	$\lg p = 5,91799 - 1022,511/(233,493 + t)$		1,9	27,9	- 154,5	
28.	Муравьиная кислота $\text{CH}_2\text{O}_2$	$\lg p = 4,99272 - 765,889/(154,546 + t)$		57,9	100,8	- 378,6	46,3
29.	Циклогексан $\text{C}_6\text{H}_{12}$	$\lg p = 5,96991 - 1203,526/(222,863 + t)$		2,02	80,7	- 123,13	30,73
30.	Циклогексанон $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	$\lg p = 6,33089 - 1670,009/(230,312 + t)$		18,3	155,6	- 226	
31.	Циклогексен $\text{C}_6\text{H}_{10}$	$\lg p = 6,0111 - 1229,973/(224,104 + t)$		2,220	82,9	- 5,36	
32.	Циклопентан $\text{C}_5\text{H}_{10}$	$\lg p = 6,00291 - 1119,208/(230,738 + t)$		1,965	49,3	-77,2	
33.	2-Метилгексан $\text{C}_7\text{H}_{16}$	$\lg p = 5,99812 - 1236,026/(219,545 + t)$		1,9	90	- 194,9	
34.	Пентанон-2 $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$	$\lg p = 6,98913 - 1870,4/(273,2 + t)$		14,0	103,3	- 258,6	

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

### Примеры решения задач

Все расчеты выполняются для вещества, указанного в Вашем задании.

#### 1. Физико-химические свойства

**1.1. Расчет  
относительной  
плотности  
газа (пара) по другому  
газу**

**Пример.** Вычислить относительную плотность аммиака по воздуху.

Решение:

Относительная плотность одного газа по другому  $D$  показывает, во сколько один газ тяжелее другого газа. Величина  $D$  является безразмерной.

Относительная плотность газа (пара) по воздуху:

$$D_{\text{возд}} = M_{\text{газа (пара)}} / M_{\text{возд}} = M_{\text{газа (пара)}} / 29.$$

Молекулярная масса аммиака  $NH_3$  равна 17.

$$D_{\text{возд}} = 17 / 29 = 0,59.$$

**1.2. Расчет плотности  
газа (пара) при  
нормальных условиях**

**Пример.** Вычислить плотность метана при нормальных условиях (температуре  $0^{\circ}C$ , давлении 760 мм рт.ст.)

Решение:

Плотность (или массовая концентрация)  $\rho$  имеет размерность г/л или кг/м<sup>3</sup>.

Для газообразных веществ плотность может быть вычислена по формуле

$$\rho = M / V_M, \text{ где}$$

$\rho$  – плотность газа или пара, г/л или кг/м<sup>3</sup>;

$M$  – молярная масса газа (пара), г/моль или кг/кмоль;

$V_M$  – молярный объем газа или пара при заданных условиях (при нормальных условиях  $V_M = 22,4$  л/моль или м<sup>3</sup>/кмоль)

Молярная масса метана  $CH_4$  составляет 16 г/моль или кг/кмоль.



Тогда плотность газа при этих условиях равна  
 $\rho = 16 / 22,4 = 0,71$  г/л или кг/м<sup>3</sup>.

**1.3. Расчет  
 процентного  
 элементного состава  
 вещества**

**Пример.** Вычислить процентный элементный состав сульфадимезина  $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ .

Решение:

Молярная масса сульфадимезина  $C_{12}H_{14}O_2N_4S$  составляет 278 г/моль.

$$[C] = 144/278 = 0,518 \cdot 100 = 51,8 \%$$

$$[H] = 14/278 = 0,05 \cdot 100 = 5,0 \%$$

$$[O] = 32/278 = 0,115 \cdot 100 = 11,5 \%$$

$$[N] = 56/278 = 0,202 \cdot 100 = 20,2 \%$$

$$[S] = 100 - (51,8 + 5,0 + 11,5 + 20,2) = 11,5 \%$$

**1.4. Расчет  
 коэффициента  
 горючести веществ**

**Пример.** Рассчитать коэффициент горючести анилина  $C_6H_5NH_2$  и хлорной кислоты  $HCIO_4$ .

Коэффициент горючести  $K$  является безразмерным коэффициентом и служит для определения горючести вещества. Рассчитанный коэффициент горючести может быть использован для приближенного вычисления температуры вспышки вещества, а также величины нижнего концентрационного коэффициента распространения пламени.

Коэффициент горючести рассчитывается по следующей формуле:

$$K = 4 n(C) + 4 n(S) + n(H) + n(N) - 2 n(O) - 2 n(Cl) - 3 n(F) - 5 n(Br), \text{ где}$$

$n(C)$ ,  $n(S)$ ,  $n(H)$ ,  $n(N)$ ,  $n(O)$ ,  $2 n(Cl)$ ,  $n(F)$ ,  $n(Br)$  – число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле вещества.

Если коэффициент горючести  $K$  больше единицы ( $K \geq 1$ ), то вещество является горючим; при значении  $K$  меньше единицы ( $K < 1$ ) – вещество негорючее.

Решение:

1. В молекуле анилина

$$n(C) = 6; \quad n(H) = 7; \quad n(N) = 1;$$

$K = 4 \cdot 6 + 7 + 1 = 32$        $K > 1$ , следовательно, анилин – горючее вещество.

2. В молекуле хлорной кислоты  
 $n(H) = 1$ ;  $n(Cl) = 1$ ;  $n(O) = 4$ ;

$K = 1 - 2 \cdot 4 - 2 \cdot 1 = -9$        $K < 1$ , хлорная кислота – негорючее вещество.

## 2. Расчет характеристик горения

### 2.1. Определение характера свечения пламени

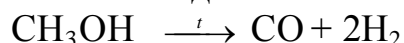
*Пример.* Определить характер свечения пламени метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ , фенола  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$  и пентанола  $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$ .

Характер свечения пламени при горении веществ зависит от процентного содержания элементов в веществе, главным образом, углерода, водорода, кислорода и азота.

Свечение пламени связано с наличием несгоревших раскаленных твердых частиц углерода  $\text{C}$ , а также трехатомных молекул.

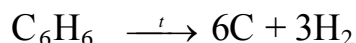
Если в горючем веществе при термическом разложении углерод не образуется, то вещество горит бесцветным пламенем как, например, в случае горения водорода  $\text{H}_2$ .

При термическом разложении веществ с массовой долей углерода менее 50 % и содержащих в своем составе кислород (более 30 %) несгоревших частиц углерода образуется очень мало, и в момент образования они успевают окислиться до  $\text{CO}$ .



Такие вещества имеют голубоватые пламена (пламя угарного газа  $\text{CO}$ , метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  и этанола  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ).

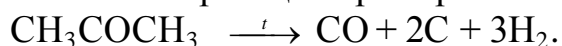
При горении веществ, содержащих более 75 % углерода (ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , бензол  $\text{C}_6\text{H}_6$ ), в зоне горения образуется настолько много частиц  $\text{C}$ , что поступающего путем диффузии воздуха не хватает для полного окисления всего углерода.



Не окислившись в пламени углерод выделяется в виде копоти, и пламя при горении таких веществ будет ярким и коптящим.

Если кислород в веществе отсутствует или его содержание не превышает 30 %, но, в свою очередь, и массовая доля углерода не очень велика (менее 75 %), то при термическом разложении будет выделяться значительное количество частиц углерода, но при нормальном доступе воздуха в зону горения они успевают окислиться до  $\text{CO}_2$ .

Возможная реакция при термическом разложении ацетона :



В подобных случаях пламя будет яркое, но не коптящее.

Сопоставляя значения процентного содержания углерода и кислорода в горючих веществах, можно приблизительно судить о характере свечения пламени (таблица 3.).

Таблица 3.

### Характер свечения пламени в зависимости от $\omega$ (С) и $\omega$ (Н)

<i>Содержание углерода в горючем веществе, <math>\omega</math> (С) %</i>	<i>Содержание кислорода в горючем веществе, <math>\omega</math> (О) %</i>	<i>Характер свечения пламени</i>
< 50	> 30	пламя бесцветное или голубоватое
< 75	отсутствует или < 30	пламя яркое, не коптящее
> 75	отсутствует или < 25	пламя яркое, коптящее

#### Решение:

1. Массовые доли углерода и кислорода в молекуле метанола составляют:

$$M_r(\text{НСОН}) = 30$$

$$\omega(\text{С}) = \frac{12 \cdot 100}{30} = \underline{40\%}; \quad \omega(\text{О}) = \frac{16 \cdot 100}{30} = \underline{53\%}$$

Массовая доля углерода < 50 %, а массовая доля кислорода > 30 %, следовательно, при горении метанола наблюдается голубоватое пламя.

2. Массовые доли углерода и кислорода в молекуле фенола составляют:

$$M_r(\text{С}_6\text{Н}_5\text{ОН}) = 94$$

$$\omega(\text{С}) = \frac{6 \cdot 12 \cdot 100}{94} = \underline{77\%}; \quad \omega(\text{О}) = \frac{16 \cdot 100}{94} = \underline{17\%}$$

Массовая доля углерода > 50 %, а массовая доля кислорода < 25 %, следовательно, пламя при горении фенола яркое и коптящее.

3. Массовые доли углерода и кислорода в молекуле пентанола составляют:

$$M_r(\text{С}_5\text{Н}_{11}\text{ОН}) = 88$$

$$\omega(\text{С}) = \frac{5 \cdot 12 \cdot 100}{88} = \underline{68\%}; \quad \omega(\text{О}) = \frac{16 \cdot 100}{88} = \underline{18\%}$$

Массовая доля углерода < 75 %, а массовая доля кислорода < 30 %, следовательно, пламя при горении пентанола будет ярким, но не коптящим.

### 2.2. Расчет низшей теплоты сгорания

**Пример.** Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина  $C_{12}H_{14}O_2N_4S$  по формуле Д.И. Менделеева.

Значения низшей теплоты сгорания веществ и материалов приведены в справочниках, а также могут быть рассчитаны по формуле Д.И. Менделеева.

$$Q_H = 339,4 [C] + 1257 [H] - 108,9 \{ ([O] + [N]) - [S] \} - 25,1 (9 [H] + [W]), \quad \text{кДж/кг,}$$

где

$[C]$ ,  $[H]$ ,  $[O]$ ,  $[N]$ ,  $[S]$ ,  $[W]$  - содержание (в процентах) углерода, водорода, кислорода, азота, серы и влаги в горючем веществе.

Данная формула может быть использована для расчетов  $Q_H$  веществ сложного элементного состава, а также для любых индивидуальных веществ.

#### Решение:

1. Для того, чтобы воспользоваться данной формулой, необходим расчет процентного состава каждого элемента в веществе.

Молярная масса сульфадимезина  $C_{12}H_{14}O_2N_4S$  составляет 278 г/моль.

$$[C] = 144/278 = 0,518 \cdot 100 = 51,8 \%$$

$$[H] = 14/278 = 0,05 \cdot 100 = 5,0 \%$$

$$[O] = 32/278 = 0,115 \cdot 100 = 11,5 \%$$

$$[N] = 56/278 = 0,202 \cdot 100 = 20,2 \%$$

$$[S] = 100 - (51,8 + 5,0 + 11,5 + 20,2) = 11,5 \%$$

2. Подставляем найденные значения в формулу Д.И. Менделеева.

$$Q_H = 339,4 \cdot 51,8 + 1257 \cdot 5,0 - 108,9 \cdot (11,5 + 20,2 - 11,5) - 25,1 \cdot 9 \cdot 5,0 = 22741 \text{ кДж/кг} = 22,7 \text{ МДж/кг.}$$

### 2.3. Составление уравнений реакций горения в кислороде и в воздухе

**Пример.** Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана  $C_3H_8$  и глицерина  $C_3H_8O_3$ ; уравнение реакции горения водорода  $H_2$  и пропанола  $C_3H_7OH$  в воздухе.

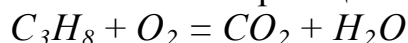
Составляя уравнение реакции горения, следует помнить, что в пожарно-технических расчетах принято все величины относить к 1 молью горючего вещества. Это, в частности, означает, что в уравнении реакции горения перед горючим веществом коэффициент всегда равен 1.

Состав продуктов горения зависит от состава исходного вещества.

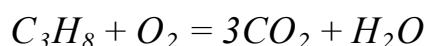
Элементы, входящие в состав горючего вещества	Продукты горения
Углерод $C$	Углекислый газ $CO_2$
Водород $H$	Вода $H_2O$
Сера $S$	Оксид серы (IV) $SO_2$
Азот $N$	Молекулярный азот $N_2$
Фосфор $P$	Оксид фосфора (V) $P_2O_5$
Галогены $F, Cl, Br, I$	Галогеноводороды $HCl, HF, HBr, HI$

### Горение пропана в кислороде

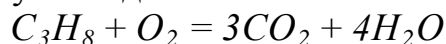
1. Записываем реакцию горения:



2. В молекуле пропана 3 атома углерода, из них образуется 3 молекулы углекислого газа.



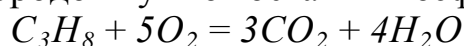
3. Атомов водорода в молекуле пропана 8, из них образуется 4 молекулы воды:



4. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения  $2 \cdot 3 + 4 = 10$

5. В левой части уравнения так же должно быть 10 атомов кислорода.

Молекула кислорода состоит из двух атомов, следовательно, перед кислородом нужно поставить коэффициент 5.



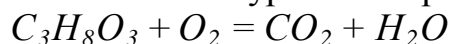
Коэффициенты, стоящие в уравнении реакции, называются **стехиометрическими коэффициентами** и показывают, сколько молей (киломолей) веществ участвовало в реакции или образовалось в результате реакции.

Стехиометрический коэффициент, показывающий число молей кислорода, необходимое для полного сгорания вещества, обозначается буквой  $\beta$ .

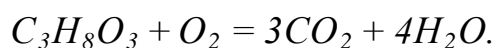
В первой реакции  $\beta = 5$ .

### Горение глицерина в кислороде

1. Записываем уравнение реакции горения.



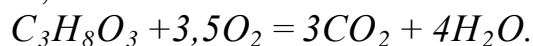
2. Уравниваем углерод и водород:



3. В правой части уравнения 10 атомов кислорода.

В составе горючего вещества есть 3 атома кислорода, следовательно, из кислорода в продукты горения перешли  $10 - 3 = 7$  атомов кислорода.

Таким образом, перед кислородом необходимо поставить коэффициент  $7 : 2 = 3,5$



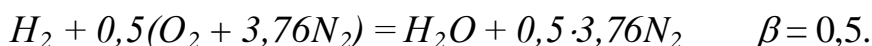
В этой реакции  $\beta = 3,5$ .

Чаще всего в условиях пожара горение протекает не в среде чистого кислорода, а в воздухе. Воздух состоит из азота (78 %), кислорода (21 %), окислов азота, углекислого газа, инертных и других газов (1 %). Для проведения расчетов принимают, что в воздухе содержится 79 % азота и 21 % кислорода. Таким образом, на один объем кислорода приходится 3,76 объемов азота ( $79:21 = 3,76$ ).

В соответствии с законом Авогадро и соотношение молей этих газов будет  $1 : 3,76$ . Таким образом, можно записать, что **молекулярный состав воздуха ( $O_2 + 3,76N_2$ )**.

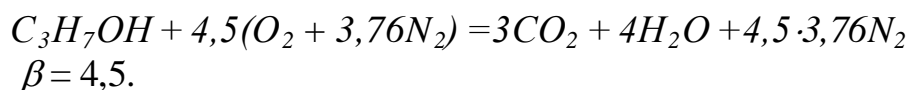
Составление реакций горения веществ в воздухе аналогично составлению реакций горения в кислороде. Особенность состоит только в том, что азот воздуха при температуре горения ниже  $2000^{\circ}C$  в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

*Горение водорода в воздухе*



Обратите внимание, что стехиометрический коэффициент перед кислородом 0,5 необходимо поставить и в правой части уравнения перед азотом.

*Горение пропанола в воздухе*



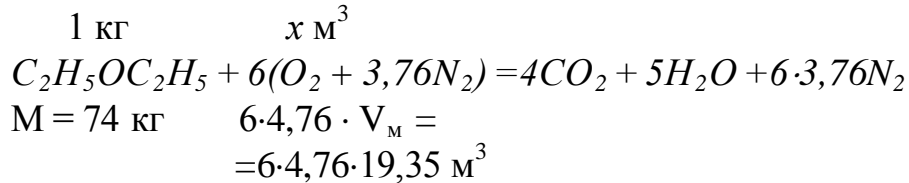
В составе горючего есть кислород, поэтому расчет коэффициента  $\beta$  проводят следующим образом:  $10 - 1 = 9$ ;  $9 : 2 = 4,5$ .

**2.4. Расчет  
теоретического  
объема воздуха,  
необходимого для  
горения  
индивидуального  
вещества**

**Пример.** Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира  $C_2H_5OC_2H_5$ ? Температура  $10^{\circ}C$ , давление 1,2 ат.

Теоретический объем воздуха, необходимый для горения рассчитывается по уравнению реакции горения.

1. Записываем уравнение реакции горения



2. Записываем в уравнении известные и неизвестные величины с указанием размерности.

3. Молярная масса диэтилового эфира 74 кг/кмоль. Записываем эту величину под формулой эфира.

4. При нормальных условиях молярный объем ( $V_M$ ) любого газообразного вещества составляет 22,4 л/моль или 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль.

Если условия отличаются от нормальных, то необходимо определить, какой объем будет занимать 1 кмоль любого газообразного вещества при данных условиях. Расчет  $V_M$  ведут по формуле объединенного газового закона:

$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P}, \text{ где}$$

$P$  и  $T$  – данные в задаче температура и давление.

Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль воздуха (как и любого другого газообразного вещества) при данных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{1 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{283}{1,2} = 19,35 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

Записываем данную величину под формулой воздуха, умножив ее на стехиометрический коэффициент (6·4,76).

5. По уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания эфира:

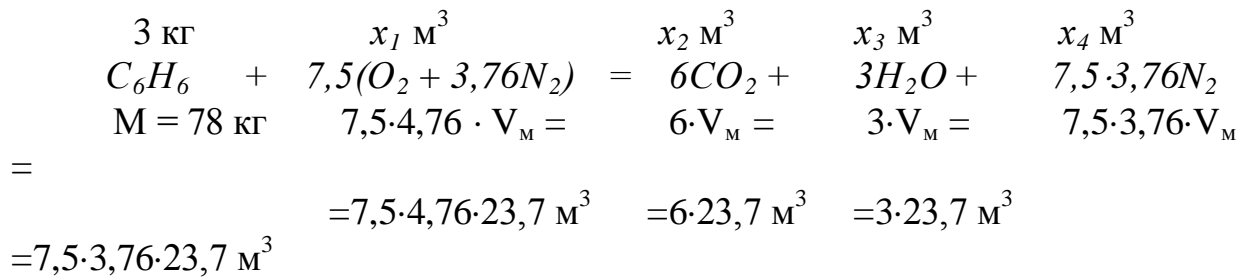
$$V_B^{\text{теор}} = x = \frac{1 \cdot 6 \cdot 4,76 \cdot 19,35}{74} = \underline{7,5 \text{ м}^3}$$

**2.5. Расчет объема и процентного состава продуктов горения индивидуального вещества**

**Пример.** Определить объем и состав в объемных % продуктов горения, образовавшихся при сгорании 3 кг бензола  $C_6H_6$ . Температура 20<sup>0</sup>С, давление 770 мм рт.ст.

В случае индивидуального химического соединения объем и состав продуктов горения рассчитывается по уравнению реакции горения.

1. Записываем уравнение реакции горения



2. Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль газообразных веществ при заданных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{760 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{293}{770} = 23,7 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

**При нормальных условиях  $V_M = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ .**

3. Теоретический объем продуктов горения ( $V_{\text{пр}}$ ) определяем по уравнению реакции.

$$V_{\text{пр}} = \frac{3 \cdot (6 + 3 + 7,5 \cdot 3,76) \cdot 23,7}{78} = 33,9 \text{ м}^3$$

4. Иногда возникает необходимость рассчитать объем отдельных компонентов продуктов горения и их процентный состав.

В этом случае по уравнению реакции определяем объем  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ .

$$V(CO_2) = x_2 = \frac{3 \cdot 6 \cdot 23,7}{78} = 5,47 \text{ м}^3$$

$$V(H_2O) = x_3 = \frac{3 \cdot 3 \cdot 23,7}{78} = 2,73 \text{ м}^3$$

$$V(N_2) = x_4 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 3,76 \cdot 23,7}{78} = 25,71 \text{ м}^3$$

Объемная концентрация каждого компонента смеси рассчитывается следующим образом:

$$\varphi^{об}(CO_2) = \frac{V(CO_2) \cdot 100}{V_{\text{пр}}^*} = \frac{5,47 \cdot 100}{33,9} = \underline{16,1 \%}$$

$$\varphi^{об}(H_2O) = \frac{V(H_2O) \cdot 100}{V_{\text{пр}}^*} = \frac{2,73 \cdot 100}{33,9} = \underline{8,1 \%}$$

$$\varphi^{об}(N_2) = \frac{V(N_2) \cdot 100}{V_{\text{пр}}^*} = \frac{25,71 \cdot 100}{33,9} = \underline{75,8 \%}$$



Обратите внимание, что более половины объема всех продуктов горения – это азот воздуха, израсходованного на горение. Если же горение протекает с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha > 1$ , то избыточный воздух также составляет значительную часть продуктов горения.

**2.6. Расчет  
стехиометрической  
концентрации**

**Пример.** Рассчитать стехиометрическую концентрацию пропана  $C_3H_8$  в % и  $г/м^3$  при температуре  $25^{\circ}C$  и давлении 95 кПа.

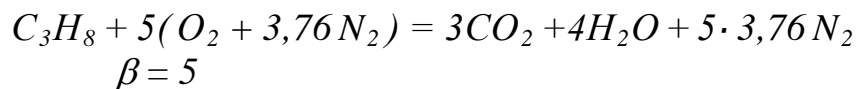
Стехиометрической концентрацией называется такая концентрация, когда реагирующие вещества взяты в эквивалентных отношениях, при этом коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1$ .

Расчет стехиометрической концентрации производится по уравнению реакции горения индивидуального вещества. Общие формулы для вычисления объемной и массовой стехиометрической концентрации следующие:

$$\varphi_{стех}^{объем} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta}, \%$$

$$\varphi_{стех}^{масс} = \frac{1000 \cdot M}{(1 + 4,76 \cdot \beta) \cdot V_M}, \text{ г/м}^3.$$

1. Уравнение реакции горения пропана.



$$\varphi_{стех}^{объем} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot 5} = \underline{4,03 \%}$$

2. Молярная масса  $M(C_3H_8) = 46$  г/моль (кг/кмоль);

$$V_M = \frac{22,4 \cdot 101,3}{273} \cdot \frac{298}{95} = 26,1 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

$$\varphi_{стех}^{масс} = \frac{1000 \cdot 46}{(1 + 4,76 \cdot 5) \cdot 26,1} = \underline{71,0 \text{ г/м}^3}.$$

**2.7. Расчет  
концентрационных  
пределов  
распространения  
пламени**

**Пример.** Рассчитать КПР газа пропана  $C_3H_8$ .

Концентрационные пределы распространения пламени (область воспламенения) для газо- и паровоздушных смесей могут быть рассчитаны по следующей формуле

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \%,$$

где

$\varphi_{H(B)}$  - нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени ( НКПР и ВКПР ), %;

$\beta$  - число молекул кислорода ( коэффициент перед кислородом в уравнении реакции горения вещества );

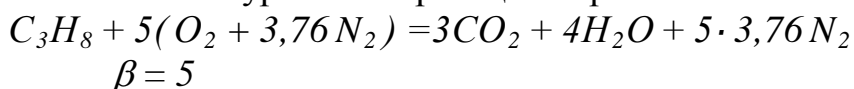
$a$  и  $b$  - константы, имеющие значения, приведенные в таблице 4.

Таблица 4.

**Значения коэффициентов “ $a$ ” и “ $b$ ” для расчета концентрационных пределов распространения пламени**

<i>КПР</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
<b>НКПР</b>	8,684	4,679
<b>ВКПР</b>		
$\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
$\beta > 7,5$	0,768	6,554

1. Составляем уравнение реакции горения этанола.



$$\beta = 5$$

$$2. \varphi_H = \text{НКПР} = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,679} = \underline{2,07 \%}$$

$$\varphi_B = \text{ВКПР} = \frac{100}{1,55 \cdot 5 + 0,56} = \underline{12,03\%}$$

**2.8. Расчет давления насыщенного пара по уравнению Антуана**

**Пример.** Давление насыщенного пара толуола по уравнению Антуана при температуре 30<sup>0</sup>С.

В пожарных расчетах наиболее распространенным способом определения давления насыщенного пара при заданной температуре является расчет по уравнению Антуана:

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t_p} ; \quad P = 10^{\left(A - \frac{B}{C + t_p}\right)},$$

где

$P$  - давление насыщенного пара, кПа;

$t_p$  - рабочая (заданная) температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$A, B, C$  - константы уравнения Антуана (приводятся в справочной литературе).

Решение:

1. Уравнение Антуана для толуола

$$\lg p = 6,0507 - 1328,171 / (217,713 + t)$$

Таким образом, константы уравнения Антуана:

$$A = 6,0507; \quad B = 1328,171; \quad C = 217,713;$$

$$t = 30^{\circ}\text{C}.$$

$$P = 10^{\left(6,0507 - \frac{1328,171}{217,713 + 30}\right)} = 10^{0,689} = 4,89 \text{ кПа}.$$