

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Составитель

Н. П. Лесникова

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА
(3 семестр)

Практикум

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления
20.03.01 (280700.62) «Техносферная безопасность» в качестве
электронного издания для использования в учебном процессе

Кемерово 2015

Рецензенты

Сивакова Л. Г. – доцент кафедры углехимии, переработки пластмасс инженерной защиты окружающей среды

Шевченко Л. А. – председатель учебно-методической комиссии направления 20.03.01 (280700.62) «Техносферная безопасность»

Лесникова Наталья Петровна. Теория горения и взрыва: практикум (3 семестр) [Электронный ресурс] для студентов направления 20.03.01 (280700.62) «Техносферная безопасность» очной формы обучения / сост. Н. П. Лесникова. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows XP ; мышь. – Загл. с экрана.

Практикум состоит из двух частей. В первой части представлены практические работы по расчету материального и теплового баланса, температурных параметров и критических условий при горении горючих веществ, а также расчеты основных параметров взрыва. Вторая часть практикума состоит из лабораторных работ, охватывающих все разделы курса «Теория горения и взрыва». Отличительной особенностью представленных работ является их исследовательская направленность и комплексный теоретический и экспериментальный метод определения исследуемых параметров. Материал практикума дополнен справочными данными.

Практикум составлен по материалам: Андросов А. С., Салеев Е. П. «Примеры и задачи по курсу «Теория горение и взрыва». М., 2006 и Андросов А. С., Бегишев И. Р. «Лабораторный практикум по курсу «Теория горения и взрыва». М., 2006.

© КузГТУ, 2015

© Лесникова Н. П.,
составление, 2015

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА*Практикум*

Введение.	5
<i>1. Материальные балансы процессов горения</i>	6
1.1. Расчёт количества воздуха, необходимого для горения веществ	6
1.2. Расчёт объёма и состава продуктов горения	14
<i>2. Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения)</i>	21
2.1. Расчёт концентрационных пределов распространения пламени (воспламенения)	21
<i>3. Температурные показатели пожарной опасности</i>	28
3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенении)	28
3.2. Расчет температуры вспышки и воспламенения	29
3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения	34
<i>4. Параметры взрыва парогазовоздушных систем</i>	38
4.1. Расчет температуры и давления взрыва парогазовоздушных систем	38
Приложение	42

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в деле подготовки специалистов по инженерной защите окружающей среды играет дисциплина “Теория горения и взрыва”. В ее задачу входит: дать современные научные представления об основных понятиях и определениях, характеризующих пожарную опасность веществ и материалов, закономерностях процессов возникновения и развития устойчивого горения, методики оценки пожаровзрывоопасности среды.

Глубокое изучение такого сложного и многофакторного явления, как процесс горения, практически невозможно без выполнения решения задач по расчету параметров пожарной опасности веществ и материалов.

Цель лабораторных работ: овладение методами расчета параметров пожарной опасности веществ и более углубленного понимания закономерностей процессов воспламенения, распространения горения и его прекращения.

Список принятых обозначений

- n – число молей вещества
 P – давление газа, Па
 T – температура вещества, К
 Q – количество теплоты, Дж
 V_i – объем i -го газообразного вещества, м³, кмоль
 α – коэффициент избытка воздуха
 $T_{\text{св}}$ – температура самовоспламенения, К
 q^+ – скорость тепловыделения, кДж/с
 q^- – скорость теплоотвода, кДж/с
 $T_{\text{всп}}$ – температура вспышки, К
 m – масса вещества, кг
 M – масса одного кмоль вещества, кг/кмоль
 $V_{\text{в}}$ – теоретическое количество воздуха, необходимое для горения, кмоль/кмоль, м³/кг
 $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания вещества, кДж/моль, кДж/кг
 H_i – энтальпия i -го вещества, кДж/моль, кДж/м³
 $T_{\text{г}}$ – температура горения, К
 c_{p_i} – теплоемкость i -го газа при постоянном давлении, кДж/(моль·К), кДж/(м³·К)
 η – коэффициент теплопотерь
 $S_{\text{н(в)}}$ – нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени, об. %
 μ_i – мольная доля i -го вещества
 $T_{\text{н(в)}}$ – нижний (верхний) температурный предел воспламенения, К
 M_p – число концевых функциональных групп
 ℓ_i – длина i -й углеродной цепи

1. Материальные балансы процессов горения

Теоретической базой для расчётов материального и теплового балансов являются фундаментальные законы сохранения веществ и энергии.

1.1. Расчёт количества воздуха, необходимого для горения веществ

Для практических расчётов принимают, что воздух состоит из 21 % кислорода и 79 % азота. Тогда, объёмное соотношение азота и кислорода в воздухе составит:

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3.76 \quad (1.1.1)$$

где $\varphi_{N_2}, \varphi_{O_2}$ – соответственно объёмное (% об.) содержание азота и кислорода в окислительной среде.

Следовательно, на 1 м³ (кмоль) кислорода в воздухе приходится 3,76 м³ (кмоль) азота.

Весовое соотношение азота и кислорода в воздухе составляет 23,3% O₂ и 76,7% N₂. Его можно определить, исходя из

$$\frac{\varphi_{N_2} M_{N_2}}{\varphi_{O_2} M_{O_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3.29 \quad (1.1.2)$$

где M_{O_2}, M_{N_2} – молекулярные массы кислорода и азота.

Для удобства расчётов, горючие вещества разделяют на три типа (табл. 1.1.1): *индивидуальные химические соединения* (метан, уксусная кислота и т.п.), *вещества сложного состава* (древесина, торф, сланцы, нефть, и т.п.), *смесь газов* (генераторный газ и т.п.).

Таблица 1.1.1

Тип горючего вещества	Расчётные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_{\Gamma}} \quad (1.1.3,а)$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}; \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$
	$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \cdot V_0}{n_{\Gamma} M} \quad (1.1.3,б)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$
Вещество сложного состава	$V_B^0 = 0.269 \left(\frac{C}{3} + P + \frac{S - O}{8} \right) \quad (1.1.4)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Смесь газов	$V_B^0 = \frac{\sum \varphi_{\Gamma} n_{O_{2i}} - \varphi_{O_2}}{21} \quad (1.1.5)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

Здесь V_B^0 – теоретическое количество воздуха; n_G, n_{O_2}, n_{N_2} – количество горючего, кислорода и азота, получаемого из уравнения химической реакции горения, кмоль; M – молекулярная масса горючего; V_0 – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях ($22,4 \text{ м}^3$); C, H, S, O – весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего, % φ_{Gi} – концентрация i -го горючего компонента, % об.; φ_{O_2} – концентрация кислорода в составе горючего газа, % об.; $n_{O_{2i}}$ – количество кислорода, необходимое для окисления одного кмоль i -го горючего компонента, кмоль.

Для *определения объёма воздуха* при горении в условиях, отличных от нормальных, используют уравнение состояния идеальных газов

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}, \quad (1.1.6)$$

где p_0 – нормальное давление, Па;
 T_0 – нормальная температура, К;
 V_0 – объём воздуха при нормальных условиях, м^3 ;
 p_1 – заданное давление, Па;
 T_1 – заданная температура, К;
 V_1 – заданный объём газа, м^3 .

Практический объём воздуха V_B , поступивший в зону горения. Отношение практического объёма воздуха к теоретическому объёму называется коэффициентом избытка воздуха α :

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^0} \quad (1.1.7)$$

Разность между практическим и теоретическим объёмами воздуха называется избытком воздуха ΔV_B :

$$\Delta V_B = V_B - V_B^0 \quad (1.1.8)$$

Из уравнений (1.1.7) и (1.1.8) следует, что

$$\Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1) \quad (1.1.9)$$

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

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{n_2}}{V_B^0 (21 - \varphi_{O_2})} \quad (1.1.10)$$

где φ_{O_2} – содержание кислорода в продуктах горения, % об.;
 V_B^0 – теоретический объём продуктов горения.

Для веществ, у которых объём продуктов горения равен объёму исходного воздуха (например, углерод), формула (1.1.10) упрощается:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}. \quad (1.1.11)$$

В случае образования продуктов неполного сгорания (CO, H₂, CH₄, и др.) формула (1.1.11) приобретает вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2} + 0,5\varphi_{CO_2} + 0,5\varphi_{H_2} + 2\varphi_{CH_4}} \quad (1.1.12)$$

где $\varphi_{O_2}, \varphi_{CO_2}, \varphi_{H_2}, \varphi_{CH_4}$ – содержание соответствующих веществ в продуктах горения, % об.

Если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе, то формулу (1.1.12) можно записать в виде:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{nz}}{V_B^0 (\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2})} \quad (1.1.13)$$

или соответственно формуле (1.1.13)

$$\alpha = \frac{21}{\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2}} \quad (1.1.14)$$

где $\varphi_{O_2}^0$ – исходное содержание кислорода в окислительной среде, % об.

Часто в пожарно-технических расчётах требуется определить массу воздуха, пошедшего на горение,

$$M_B = V_B \rho_B \quad (1.1.15)$$

где ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Очевидно, что

$$\rho = \frac{\varphi_{N_2} \mu_{N_2} + \varphi_{O_2} \mu_{O_2}}{V_0} \cdot \frac{P_1 T_0}{P_0 T_1} \quad (1.1.16)$$

После подстановки постоянных значений в формулу (1.1.16) получим

$$\rho_B = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} \quad (1.1.17)$$

где P – атмосферное давление, Па;

T – температура воздуха, К.

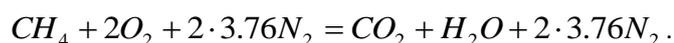
Примеры

Пример 1. определить теоретическую массу и объём воздуха, необходимого для сгорания 1 м³ метана при нормальных условиях.

Решение.

Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчёта его объёма надо пользоваться фор-

мулой (1.1.3,а), запишем уравнение химической реакции горения CH_4 в воздухе



Из уравнения находим $n_{O_2} = 2; n_{N_2} = 2 \cdot 3.76 = 7.52; n_{CH_4} = 1$, тогда

$$V_B^0 = \frac{2 + 7.52}{1} = 9.52 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ или кмоль/кмоль}$$

По формуле (1.1.15) с учётом уравнения (1.1.16) рассчитаем массу воздуха

$$M_B = 9.52 \frac{0.76 \cdot 28 + 0.21 \cdot 32}{22.4} = 9.52 \cdot 1.28 = 12.2 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 2. Определить теоретический объём воздуха, необходимого для горения 1 кг бензола.

Решение.

Горючее – индивидуальное химическое соединение, поэтому для расчёта по формуле (1.1.3,б) запишем уравнение химической реакции горения



найдем $n_{C_6H_6} = 1; n_{O_2} = 7.5; n_{N_2} = 7.5 \cdot 3.76 = 28.2$.

Молекулярная масса бензола $M = 6 \cdot 12 + 6 \cdot 1 = 78$.

Объём 1 кмоль газа при нормальных условиях составляет 22,4 м³

$$V_B^0 = \frac{(7.5 + 28.2)}{1 \cdot 78} = 10.3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример 3. Определить объём и массу воздуха, необходимого для горения 1 кг органической массы состава С – 60 %, Н – 5 %, О – 25 %, N – 5 %, W – 5 % (влажность), если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,5$; температура воздуха 305 К, давление 99500 Па.

Решение.

Так как горючее вещество сложного состава, то теоретическое количество воздуха при нормальных условиях определяется по формуле (1.1.4)

$$V_B = 0.269 \left(\frac{60}{3} + 5 - \frac{25}{8} \right) = 5.9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Из формулы (1.1.7) рассчитаем практическое количество воздуха при нормальных условиях

$$V_B = \alpha V_B^0 = 2.5 \cdot 5.9 = 14.75 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Найдем количество воздуха, пошедшего на горение веществ при заданных условиях горения. Используя формулу (1.1.6), получим

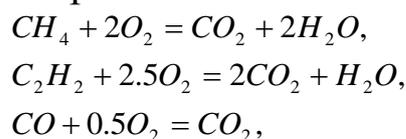
$$M_B(P,T) = \frac{14.75 \cdot 101325 \cdot 305}{99500 \cdot 273} = 16.8 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$M_B(P,T) = V_B \rho_B = 16.8 \cdot 1.28 \frac{99500 \cdot 273}{305 \cdot 101325} = 18.9 \text{ кг/кг.}$$

Пример 4. Определить объём воздуха, необходимого для горения 5 м смеси газов, состоящих из 20 % – CH_4 ; 40 % – C_2H_2 ; 10 % – CO ; 5 % – N_2 и 25 % – O_2 , если коэффициент избытка воздуха 1,8.

Решение.

Горючее – смесь газов, поэтому для расчёта объёма воздуха, пошедшего на горение, воспользуемся формулой (1.1.5). Для определения стехиометрических коэффициентов при кислороде n_{O_2} запишем уравнение реакций горения горючих компонентов в кислороде



тогда

$$V_B^0 = \frac{2 \cdot 20 + 2.5 \cdot 40 + 0.5 \cdot 10 - 25}{21} = 5.7 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

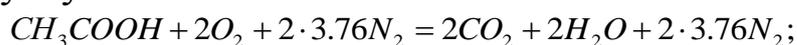
Для горения 5 м³ газовой смеси необходимый теоретический объём воздуха составит $V_B^0 = 5 \cdot 5.7 = 28.5 \text{ м}^3$. Практическое количество воздуха:

$$V_B = 1.8 \cdot 28.5 = 51.3 \text{ м}^3.$$

Пример 5. Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты, если на горение 1 кг поступило 3 м³ воздуха.

Решение.

Для определения коэффициента избытка воздуха по формуле (1.1.7) необходимо рассчитать его теоретическое количество. Молекулярная масса уксусной кислоты 60.



$$V_B^0 = \frac{(2 + 2 \cdot 3.76)22.4}{1 \cdot 60} = 3.6 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

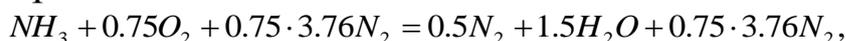
Тогда коэффициент избытка воздуха по формуле (1.1.7) равен

$$\alpha = \frac{3,0}{3,6} = 0,8$$

Горение протекало при недостатке воздуха.

Пример 6. Определить объём воздуха, пошедшего на окисление 1 м³ аммиака, если в продуктах горения содержание кислорода составило 18%.

Решение. Определяем теоретическое количество воздуха, необходимого для горения 1 м³ аммиака:



тогда

$$V_B^0 = \frac{0.75 + 0.75 \cdot 3.76}{1} = 3.6 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Для определения коэффициента избытка воздуха необходимо рассчитать теоретическое количество продуктов горения 1 м³ аммиака

$$V_B^0 = \frac{1.5 + 0.5 + 0.75 \cdot 3.76}{1} = 4.8 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = 1 + \frac{18 \cdot 4.8}{3.6(21 - 18)} = 9$$

Объём воздуха, участвующего в процессе горения 1 м³ аммиака, определим из формулы (1.1.7)

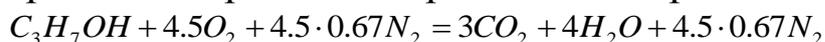
$$V_B = 9 \cdot 3.6 = 32.4 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Пример 7. Определить объём окислительной среды, состоящей из 60 % O₂ и 40 % N₂, необходимый для горения 1 кг изоприлового спирта, если её температура равна 295 К, давление 62,0 кПа.

Решение.

Так как окислительная среда отличается по составу от воздуха, определим по формуле (1.1.1) объёмное соотношение кислорода и азота 40:60=0,67.

Уравнение реакции горения изоприлового спирта



Теоретический объём окислительной среды при нормальных условиях рассчитаем по формуле (1.1.3,б). Молекулярная масса горючего равна 60,

$$V_{OC}^0 = \frac{(4.5 + 4.5 \cdot 0.67)22.4}{1 \cdot 60} = 2.8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

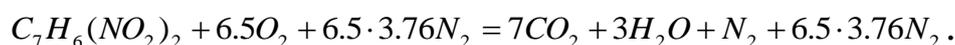
Объём окислительной среды при заданных условиях горения определим из формулы (1.1.6)

$$V_{OC(PT)}^0 = \frac{2.8 \cdot 295 \cdot 101.325}{62.0 \cdot 273} = 4.9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример 8. Определить массу динитротолуола, сгоревшего в герметичном объёме 100 м³, если содержание кислорода в продуктах горения составило 12 %.

Решение.

Так как в продуктах горения содержится кислород, то горение протекало в избытке воздуха, коэффициент избытка определим по формуле (1.1.10).



Молекулярная масса горючего равна 183. Теоретический объём воздуха

$$V_B^0 = \frac{(6.5 + 6.5 \cdot 3.76)22.4}{1 \cdot 182} = 3.8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объём продуктов горения (формула 1.1.15)

$$V_{пр}^0 = \frac{(7 + 3 + 1 + 6.5 \cdot 3.76)22.4}{1 \cdot 182} = 4.4 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\alpha = 1 + \frac{12 \cdot 4.4}{3.8(21 - 12)} = 2.55.$$

Практический объём воздуха, пошедший на горение

$$V_B = 2.5 \cdot 3.8 = 9.7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тогда массу сгоревшего динитротолуола M_2 определим из соотношения

$V_n = 100 \text{ м}^3$ - полный объём помещения

$$M_2 = \frac{V_n}{V_B} = \frac{100}{9.7} = 10.3 \text{ кг}.$$

Задание на самостоятельную работу

Задача: Рассчитать теоретически необходимое количество воздуха для сгорания m кг вещества при $T = \dots$ и $P = \dots$ (жидкость)

Вариант	Вещество	m , кг	T , °C	P , мм рт.ст.
1	Амилбензол	3	-20	780
2	Н-Амиловый спирт	5	20	760
3	Анизол	7	-15	778
4	Анилин	15	15	762
5	Бутилацетат	20	-10	776
6	Бутиловый спирт	10	10	764
7	Бензол	2	-5	774
8	Диэтиловый эфир	4	5	768
9	Ксилол	6	-18	772
10	Уайт-спирит	8	18	770
11	Этиленгликоль	9	-16	740
12	Трет-Амиловый спирт	11	16	758
13	Гексан	12	-14	742
14	Метиловый спирт	13	14	756
15	Толуол	14	-12	744
16	Стирол	16	12	754
17	Пентан	19	-8	746
18	Этанол	17	8	752

Вариант	Вещество	m, кг	T, °C	P, мм рт.ст.
19	Амилметилкетон	18	-6	748
20	Бутилбензол	22	6	750
21	Бутилвиниловый эфир	24	-4	769
22	Ацетон	1	4	779
23	Этиловый спирт	21	-2	749
24	Гептан	25	2	761
25	Октан	28	-25	765
26	Гексан	1,5	19	759
27	Бутиловый спирт	8	-6	757
28	Анилин	4,6	21	769
29	Бензол	9	-11	770
30	Ксилол	2	13	754
31	Анизол	8	-16	770
32	Диэтиловый эфир	6	6	778
33	Бутиловый спирт	12	8	764
34	Этиловый спирт	16	-4	749
35	Бензол	8	-8	770
36	Ксилол	4	12	754
37	Ацетон	2	6	779
38	Этиловый спирт	18	-4	749
39	Гептан	20	4	761
40	Октан	24	-20	765

Задача: Рассчитать теоретически необходимое количество воздуха для сгорания V м³ горючего газа

Вариант	Горючий газ	V , м ³
1	Ацетилен	25
2	Метан	5
3	Окись углерода	15
4	Этан	7
5	Водород	10
6	Пропан	8
7	Сероводород	3
8	Бутан	27
9	Ацетилен	4
10	Метан	26
11	Окись углерода	6
12	Этан	24
13	Водород	9
14	Пропан	23
15	Сероводород	11
16	Бутан	22

Вариант	Горючий газ	V, м ³
17	Метан	12
18	Этан	21
19	Пропан	13
20	Бутан	20
21	Окись углерода	10
22	Ацетилен	30
23	Водород	14
24	Метан	16
25	Ацетилен	3
26	Метан	6
27	Окись углерода	4
28	Этан	5
29	Водород	2
30	Пропан	1,5
31	Сероводород	10
32	Бутан	18
33	Ацетилен	45
34	Метан	18
35	Окись углерода	5
36	Этан	14
37	Водород	8
38	Пропан	16
39	Ацетилен	2
40	Водород	16

1.2. Расчёт объёма и состава продуктов горения

С целью упрощения расчёта все горючие вещества разделены на три типа: индивидуальные, сложные, смеси горючих газов (табл. 1.2.1).

Таблица 1.2.1

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{III}^0 = \frac{\sum n_{IIIi}}{n_r} \quad (1.2.1)$	$\frac{м^3}{м^3} \cdot \frac{кмоль}{кмоль}$
	$V^0 = \frac{V_0 \sum n_{IIIi}}{n_r M} \quad (1.2.2)$	$\frac{м^3}{кг}$

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Вещество сложного состава	$V_{CO_2} = 1.86 \frac{C}{100} \quad (1.2.3)$	$\frac{м^3}{кг}; \frac{кмоль}{кг}$
	$V_{H_2O} = 11.2 \frac{H}{100} + 1.24 \frac{W}{100} \quad (1.2.4)$	
	$V_{SO_2} = 0.7 \frac{S}{100} \quad (1.2.5)$	
	$V_{N_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.63S + 0.8N \right] \quad (1.2.6)$	
Смесь газов	$V_{пр}^0 = \sum V_{прi} \quad (1.2.7)$	$\frac{м^3}{м^3}; \frac{кмоль}{кмоль}$
	$V_{прi} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{прi} \varphi_{Гi}}{n_{Г}} + \sum \varphi_{НДk} \right] \quad (1.2.8)$	

Здесь $V_{пр}^0$ – теоретический объём продуктов горения; $n_{прi}$ – количество i -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль; $n_{Г}$ – количество горючего, кмоль; V^0 – объём 1 кмоль газа; M – молекулярная масса горючего; $V_{прi}$ – объём i -го продукта реакции; C, H, S, O, N – содержание соответствующих элементов (углерода, водорода, серы, кислорода и азота) в горючем веществе, % вес; $\varphi_{Гi}$ – содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, % об.; $n_{прi}$ – содержание i -го негорючего компонента в составе газовой смеси, % об.

Практический (полный) объём продуктов горения состоит из теоретического объёма продуктов горения и избытка воздуха

$$V_{пр} = V_{пр}^0 + \Delta V_B \quad (1.2.9)$$

или

$$V_{пр} = V_{пр}^0 + V_B^0(\alpha - 1) \quad (1.2.10)$$

Состав продуктов горения, т.е. содержание i -го компонента определяется по формуле

$$\varphi_{прi} = \frac{V_{прi}}{\sum V_{прi}} 100 \quad (1.2.11)$$

где $\varphi_{прi}$ – содержание i -го компонента в продуктах сгорания, % об.;

$V_{прi}$ – объём i -го компонента, м³, кмоль;

$\sum V_{прi}$ – полный объём продуктов горения, м³, кмоль.

При горении в избытке воздуха в продуктах горения содержится кислород и азот

$$V_{O_2} = 0.21 \Delta V_B \quad (1.2.12)$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0.79 \Delta V_B \quad (1.2.13)$$

где $V_{N_2}^0$ – теоретический объём азота в продуктах горения, м³, кмоль.

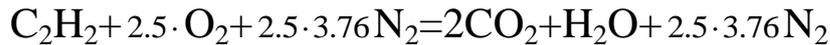
$$V_{N_2}^0 = 0.79V_B^0 \quad (1.2.14)$$

Примеры

Пример 1. Какое количество продуктов горения выделится при сгорании 1 м^3 ацетилена в воздухе, если температура горения составила 1450 К .

Решение.

Горючее – индивидуальное химическое соединение (формула 1.2.1). Запишем уравнение химической реакции горения:



Объём продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{2+1+2.5 \cdot 3.76}{1} = 12.4\text{ м}^3/\text{м}^3$$

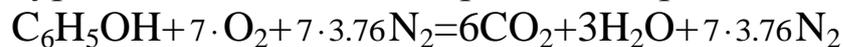
Объём продуктов горения при 1450 К

$$V_{\text{пр}(pT)}^0 = \frac{12.4 \cdot 1450}{273} = 62.9\text{ м}^3/\text{м}^3$$

Пример 2. Определить объём продуктов горения при сгорании 1 кг фенола, если температура горения 1200 К , давление 95000 Па , коэффициент избытка воздуха $1,5$.

Решение.

Горючее – индивидуальное химическое соединение (формула 1.2.2). Запишем уравнение химической реакции горения



Молекулярная масса горючего 98 .

Теоретический объём продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{(6+3+7 \cdot 3.76)22,4}{1 \cdot 98} = 8,1\text{ м}^3/\text{кг}$$

Практический объём воздуха при нормальных условиях

$$V_{\text{пр}}^0 = 8,1 + \frac{(7+7 \cdot 3.76)(1,5-1)}{1 \cdot 98} 22,4 = 11,9\text{ м}^3/\text{кг}$$

Объём продуктов горения при заданных условиях

$$V_{\text{пр}(pT)}^0 = \frac{11,9 \cdot 101325 \cdot 1200}{95000 \cdot 273} = 55,9\text{ м}^3/\text{м}^3$$

Пример 3. Определить объём продуктов горения при сгорании 1 кг органической массы состава: $\text{C} - 55\%$, $\text{O} - 13\%$, $\text{H} - 5\%$, $\text{S} - 7\%$, $\text{N} - 3\%$, $\text{W} - 17\%$, если температура горения 1170 К , коэффициент избытка воздуха – $1,3$.

Решение.

Горючее – вещество сложного состава (формулы 1.2.3–1.2.6).
Теоретический состав продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{CO_2} = 1.86 \frac{55}{100} = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{H_2O} = 11.2 \frac{5}{100} + 1.24 \frac{17}{100} = 0.6 + 0.2 = 0.8 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{SO_2} = 0.7 \frac{7}{100} = 0.05 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} \left[7 \cdot 55 + 21 \left(5 - \frac{13}{8} \right) + 2.63 \cdot 7 + 0.8 \cdot 3 \right] = 4.7 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Полный теоретический объём продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{III}^0 = 1 + 0.8 + 0.05 + 4.7 = 6.55 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Практический объём продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{III}^0 = 6.55 + 0.269 \left(\frac{55}{3} + 5 + \frac{7-13}{8} \right) (1.3-1) = 6.55 + 1.8 = 8.35 \text{ м}^3/\text{кг}$$

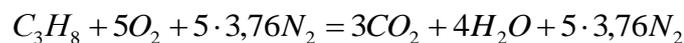
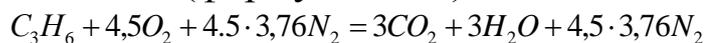
Практический объём продуктов горения при температуре горения

$$V_{III(пр)}^0 = \frac{8.35 \cdot 1170}{273} = 35.8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример 4. Рассчитать объём продуктов горения при сгорании 1 м³ газовой смеси, состоящей из C₃H₆ – 70 %, C₃H₈ – 10 %, CO₂ – 5 %, O₂ – 15 %, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха – 2,8. Температура окружающей среды 293 К.

Решение.

Горючее – смесь газов (формула 1.2.7).



Объём продуктов горения определяется по формуле (1.2.8)

$$V_{CO_2} = \frac{1}{100} (3 \cdot 70 + 3 \cdot 10 + 5) = 2.45 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} (3 \cdot 70 + 4 \cdot 10) = 2.4 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Так как газовая смесь содержит в составе кислород, он будет окислять часть горючих компонентов, следовательно, понизится расход воздуха (формула 1.1.5).

В этом случае теоретический объём азота удобнее определять по формуле (1.2.14)

$$V_{N_2}^0 = 0.79 \frac{4.5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} = 13.2 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретический объём продуктов горения

$$V_{III}^0 = 2.45 + 2.4 + 13.2 = 18.5 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Практический объём продуктов горения

$$V_{III} = 18.5 + \frac{4.5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} (2.8 - 1) = 42.05$$

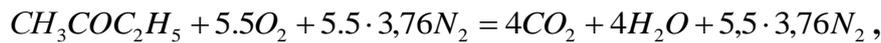
Объём продуктов горения при температуре 1300 К

$$V_{III(pT)}^0 = \frac{42.05 \cdot 1300}{298} = 183.4 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Пример 5. Определить состав продуктов горения метилэтилкетона.

Решение.

При такой постановки задачи, рационально определить непосредственно из уравнения горения объём продуктов в киломолях, выделившихся при сгорании 1 кмоля горючего



$$V_{C_2O} = 4 \text{ кмоля}; V_{H_2O} = 4 \text{ кмоля}; V_{N_2} = 20.7 \text{ кмоля}; \sum V_{III} = 28.7 \text{ кмоля}.$$

По формуле (1.2.11) находим состав продуктов горения

$$\varphi_{H_2O} = \varphi_{C_2O} = \frac{4 \cdot 100}{28.7} = 14\%, \quad \varphi_{N_2} = 100 - (14 + 14) = 72\%.$$

Пример 6. Определить объём и состав продуктов горения 1 кг минерального масла состава: С – 85 %, Н – 15 %, если температура горения 1450 К, коэффициент избытка воздуха – 1,9.

Решение. По формулам (1.2.3–1.2.6) определим объём продуктов горения

$$V_{CO_2} = 1.86 \frac{85}{100} = 1.6 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{H_2O} = 11.2 \frac{15}{100} = 1.7 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} (7 \cdot 85 + 21 \cdot 15) = 9.1 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Теоретический объём продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{III}^0 = 1.6 + 1.7 + 9.1 = 12.4 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Практический объём продуктов горения при нормальных условиях формула (1.2.10)

$$V_{III} = 12.4 + 0.269 \left(\frac{85}{3} + 15 \right) (1.9 - 1) = 12.4 + 10.5 = 22.9 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Объём продуктов горения при температуре 1450 К

$$V_{\text{пр}(pT)}^0 = \frac{22,4 \cdot 1450}{273} = 121,7 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Очевидно, что состав продуктов горения не зависит от температуры горения, поэтому целесообразно определить его при нормальных условиях. По формулам (1.2.11; 1.2.13)

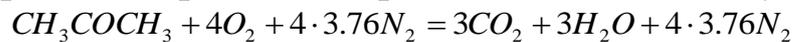
$$\varphi_{\text{C}_2\text{O}} = \frac{1,6 \cdot 100}{22,9} = 7,1\% ; \varphi_{\text{O}_2} = \frac{0,21 \cdot 10,5 \cdot 100}{22,9} = 9,4\% ;$$

$$\varphi_{\text{N}_2} = \frac{(9,1 + 0,79 \cdot 10,5) 100}{22,9} = 76,2\% ; \varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,7 \cdot 100}{22,9} = 7,3\% .$$

Пример 7. Определить количество сгоревшего ацетона, кг, если объём выделившийся двуокиси углерода, приведённый к нормальным условиям, составил 50 м^3 .

Решение.

Запишем уравнение реакции горения ацетона в воздухе:



Из уравнения следует, что при горении из 58 кг (молекулярная масса ацетона) выделяется $3 \cdot 22,4 \text{ м}^3$ двуокиси углерода. Тогда для образования 50 м^3 двуокиси углерода должно вступить в реакцию M_r горючего

$$M_r = \frac{50 \cdot 58}{3 \cdot 22,4} = 43,2 \text{ кг}$$

Пример 8. Определить количество сгоревшей органической массы состава С – 58 %, О – 22 %, Н – 8 %, N – 2 %, W – 10 % в помещении объёмом 350 м^3 , если содержание двуокиси углерода составило 5%.

Решение. Определим объём выделившейся двуокиси углерода

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{выд}} = 350 \cdot 0,05 = 17,5 \text{ м}^3 .$$

По формуле (1.2.6) для вещества сложного состава определим объём CO_2 , выделившейся при горении 1 кг горючего,

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{58}{100} = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

Определим количество сгоревшего вещества

$$M_r = \frac{17,5}{1,1} = 15,9 \text{ кг} .$$

Пример 9. Определить время, когда содержание двуокиси углерода в помещении объёмом 480 м^3 в результате горения древесины (С – 45 %, Н – 50 %, О – 42 %, W – 8 %) составило 8%, если удельная массовая скорость выгорания древесины $0,008 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, а поверхность горения 38 м^2 . При решении газообмен с окружающей средой не учи-

тывать, разбавлением в результате выделения продуктов горения пренебречь.

Решение.

Поскольку не учитывается разбавление продуктов горения, определяем объём выделившейся в результате горения двуокиси углерода, соответствующей 8% её содержания в атмосфере

$$V_{CO_2} = \frac{8 \cdot 480}{100} = 38.4 \text{ м}^3$$

Из выражения (1.2.3) определим, сколько должно сгореть горючего материала, чтобы выделился данный объём двуокиси углерода

$$M_{\Gamma} = \frac{38,4}{1,86 \cdot 0,45} = 46 \text{ кг.}$$

Время горения определим, исходя из соотношения

$$\tau = \frac{M_{\Gamma}}{v_m F},$$

где τ – время горения;

M_{Γ} – масса выгоревшей древесины, кг;

v_m – массовая скорость выгорания древесины, кг/(м²с);

F – поверхность горения, м²;

$$\tau = \frac{46}{0.008 \cdot 38} = 2.5 \text{ мин.}$$

Задание на самостоятельную работу

Задача: Определить объём продуктов горения при сгорании 1 кг заданного вещества, если температура горения ... К, давление ... мм рт.ст., $\alpha = \dots$

Вариант	Вещество	Тп.г., К	Р, мм рт.ст.	α
1	Амилбензол	1200	740	1,1
2	Н-Амиловый спирт	1210	745	1,2
3	Анизол	1220	750	1,3
4	Анилин	1230	755	1,4
5	Бутилацетат	1240	720	1,5
6	Бутиловый спирт	1250	725	1,6
7	Бензол	1260	730	1,7
8	Диэтиловый эфир	1270	735	1,8
9	Ксилол	1280	710	1,1
10	Уайт-спирит	1290	715	1,2

Вариант	Вещество	Тп.г., К	Р, мм рт.ст.	α
11	Этиленгликоль	1300	717	1,3
12	Трет-Амиловый спирт	1310	719	1,4
13	Гексан	1320	724	1,5
14	Метиловый спирт	1330	732	1,6
15	Толуол	1340	754	1,7
16	Стирол	1350	756	1,8
17	Пентан	1360	721	1,1
18	Этанол	1370	700	1,2
19	Амилметилкетон	1380	708	1,3
20	Бутилбензол	1390	704	1,4
21	Бутилвиниловый эфир	1400	706	1,5
22	Ацетон	1100	757	1,6
23	Этиловый спирт	1150	746	1,7
24	Гептан	1160	738	1,8
25	Октан	1120	737	1,1
26	Гексан	1370	747	1,2
27	Бутиловый спирт	1365	754	1,3
28	Анилин	1400	748	1,4
29	Бензол	1354	750	1,5
30	Ксилол	1378	751	1,6

Задача: Определить объем и состав (% об.) продуктов горения, выделившихся при сгорании 1 м^3 горючего газа, если температура горения составила ... К, давление ... мм рт.ст.

Вариант	Вещество	Тп.г., К	Р, мм рт.ст.
1	Ацетилен	1200	750
2	Метан	1210	749
3	Окись углерода	1220	748
4	Этан	1230	747
5	Водород	1240	746
6	Пропан	1250	745
7	Сероводород	1260	744
8	Бутан	1270	743
9	Ацетилен	1280	742

Вариант	Вещество	Тп.г., К	Р, мм рт.ст.
10	Метан	1290	741
11	Окись углерода	1300	740
12	Этан	1310	759
13	Водород	1320	758
14	Пропан	1330	757
15	Сероводород	1340	756
16	Бутан	1350	755
17	Метан	1360	754
18	Этан	1370	753
19	Пропан	1380	752
20	Бутан	1390	751
21	Окись углерода	1400	750
22	Ацетилен	1100	749
23	Водород	1150	748
24	Метан	1160	747
25	Ацетилен	1120	746
26	Метан	1370	745
27	Окись углерода	1365	744
28	Этан	1400	743
29	Водород	1354	742
30	Пропан	1378	741

2. Концентрационные пределы распространения пламени

2.1. Расчёт концентрационных пределов распространения пламени

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени – минимальная (максимальная) концентрация горючего в окислителе, способная воспламениться от высокоэнергетического источника с последующим распространением горения на всю смесь.

Расчетные формулы

Нижний концентрационный предел распространения пламени φ_H определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м³ различных газоздушных смесей на НКПР выделяет при горении постоянное среднее количество тепла – 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

$$\varphi_n = \frac{Q_{\text{ПР}} \cdot 100}{Q_H} \quad (2.1.1)$$

если принять среднее значение $Q_{\text{ПР}}$ равным 1830 кДж/м^3 , то φ_n будет равно

$$\varphi_n = \frac{1830 \cdot 100}{Q_H} \quad (2.1.2)$$

где Q_H – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м^3 .

Нижний и верхний КПР пламени могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{an + b} \quad (2.1.3)$$

где n – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции; a и b эмпирические константы, значения которых приведены в табл. 2.1.1

Таблица 2.1.1.

Концентрационные пределы распространения пламени	Значения коэффициента	
	a	b
Нижний предел	4,342	4,679
Верхний предел		
$n \leq 1,5$	0,775	0,560
$n > 1,5$	0,384	6,554

Концентрационные пределы распространения пламени паров жидких и твердых веществ могут быть рассчитаны, если известны температурные пределы

$$\varphi_{H(B)} = \frac{p_{n(e)} \cdot 100}{p_0} \quad (2.1.4)$$

где $p_{n(e)}$ – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу распространения пламени, Па; p_0 – давление окружающей среды, Па.

Давление насыщенного пара может быть определено по уравнению Антуана или по табл. 13 приложения

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \quad (2.1.5)$$

где A, B, C – константы Антуана (табл. 7 приложения);

t – температура, $^{\circ}\text{C}$ (температурные пределы)

Для расчета концентрационных пределов распространения пламени смесей горючих газов используют правило Ле-Шателье

$$\varphi_{H(B)}^{CM} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{H(B)_i}}} \quad (2.1.6)$$

где $\varphi_{H(B)}^{CM}$ – нижний (верхний) КПР пламени смеси газов, % об.;

$\varphi_{H(B)_i}$ – нижний (верхний) предел распространения пламени i -го горючего газа %, об.;

μ_i – мольная доля i -го горючего газа в смеси.

Следует иметь при этом в виду, что $\sum \mu_i = 1$, т.е. концентрация горючих компонентов газовой смеси принимается за 100 %.

Если известны концентрационные пределы распространения пламени при температуре T_1 , то при температуре T_2 они вычисляются по формулам

$$\varphi_{HT_2} = \varphi_{HT_1} \left(1 - \frac{T_2 - T_1}{T_G - T_1} \right), \quad (2.1.7)$$

$$\varphi_{BT_2} = \varphi_{BT_1} \left(1 + \frac{T_2 - T_1}{T_G - T_1} \right), \quad (2.1.8)$$

где φ_{HT_1} , φ_{HT_2} – нижний концентрационный предел распространения пламени соответственно при температурах

T_2 и T_1 ; φ_{BT_1} и φ_{BT_2} – верхний концентрационный предел распространения пламени соответственно при температурах T_1 и T_2 ;

T_G – температура горения смеси.

Приближенно при определении НКПР пламени T_2 принимают 1550 К, при определении ВКПР пламени – 1100 К.

При разбавлении газовой смеси инертными газами (N_2 , CO_2 , H_2O пары и т.п.) область воспламенения сужается: верхний предел снижается, а нижний – возрастает. Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой нижний и верхний пределы распространения пламени смыкаются, называется минимальной флегматизирующей концентрацией φ_ϕ . Содержание кислорода такой системе называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода МВСК. Некоторое содержание кислорода ниже МВСК называют безопасным $\varphi_{O_2\text{без}}$.

Расчет указанных параметров проводят по формулам

$$\varphi_{\Phi} = \frac{h_f' \Delta H_f^0 + h_{\Phi}' + \sum h_i' m_i}{h_{\Phi}'' - 1 + \sum h_i'' m_i} 100 \quad (2.1.9)$$

$$\varphi_{O_2} = \frac{100 - \varphi_{\Phi}}{4,844} \quad (2.1.10)$$

$$\varphi_{O_2, \text{БЕЗ}} = 1,2 \varphi_{O_2} - 4,2 \quad (2.1.11)$$

где ΔH_f^0 – стандартная теплота образования горючего, Дж/моль;

h_f' , h_i'' , h_{Φ}'' – константы, зависящие от вида химического элемента в молекуле горючего и вида флегматизатора, табл. 14 приложения;

m_i – количество атомов i -го элемента (структурной группы) в молекуле горючего.

Пример 1. По предельной теплоте сгорания определены нижний концентрационный предел воспламенения бутана в воздухе.

Решение. Для расчета по формуле (2.1.1) в табл. 15 приложения находим низшую теплоту сгорания вещества 2882,3 кДж/моль. Эту величину надо перевести в другую размерность – кДж/м³:

$$\frac{2882,3 \cdot 1000}{22,4} = 128,7 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3$$

По формуле (2.1.1) определим нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР)

$$\varphi_H = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 103} = 1,42\%$$

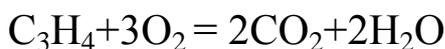
По табл. 13 приложения находим, что экспериментальное значение φ_H – 1,9%. Относительная ошибка расчета, следовательно, составила

$$\Delta_H = \frac{1,9 - 1,42}{1,9} 100 \approx 25\%$$

Пример 2. Определить концентрационные пределы распространения пламени этилена в воздухе.

Решение.

Расчет КПР пламени проводим по аппроксимационной формуле. Определяем значение стехиометрического коэффициента при кислороде



Таким образом, $n = 3$, тогда

$$\varphi_H = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25\% \quad \varphi_B = \frac{100}{1,55 \cdot 3 + 0,56} = 18,26\%$$

Определим относительную ошибку расчета. По табл. 13 приложения экспериментальные значения пределов составляют 3,0–32,0:

Следовательно, при расчете НКПР этилена результат завышен на 8%, а при расчете ВКПР – занижен на 40%.

Пример 3. Определим, концентрационные пределы распространения пламени насыщенных паров метанола в воздухе, если известно, что его температурные пределы составляют 280–312 К. Атмосферное давление нормальное.

Решение.

Для расчета по формуле (2.1.4) необходимо определить давление насыщенных паров, соответствующее нижнему (7 °С) и верхнему (39 °С) пределам распространения пламени.

По уравнению Антуана (2.1.5) находим давление насыщенного пара, воспользовавшись данными табл. 7 приложения.

$$\lg P_H = 8.22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 7} = 1,65999$$

$$P_H = 45,7 \text{ мм.рт.ст.} = 45,7 \cdot 133,2 = 6092,8 \text{ Па}$$

$$\lg P_H = 8.22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 39} = 2,39789$$

$$P_H = 250 \text{ мм.рт.ст.} = 250 \cdot 133,2 = 33300 \text{ Па}$$

По формуле (2.1.3) определим НКПР и ВКПР:

$$\varphi_H = \frac{6092,8 \cdot 100}{101325} = 6\% \quad \varphi_B = \frac{33300 \cdot 100}{101325} = 32,9\%$$

Пример 4. Определить концентрационные пределы распространения пламени газовой смеси, состоящей 40 % пропана, 50 % бутана и 10 % пропилена.

Решение.

Для расчета КПР пламени смеси газов по правилу Ле-Шателье (2.1.6) необходимо определить КПР пламени индивидуальных горючих веществ, методы расчета которых рассмотрены выше.

$$C_3H_8 - 2,1 \div 9,5 \%; \quad C_3H_6 - 2,2 \div 10,3 \%; \quad C_4H_{10} - 1,9 \div 9,1 \%$$

$$\varphi_H^{CM} = \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,1}{2,2} + \frac{0,5}{2,2}} = 2,0\% \quad \varphi_B^{CM} = \frac{1}{\frac{0,4}{9,5} + \frac{0,1}{10,1} + \frac{0,5}{9,1}} = 9,38\%$$

Пример 5. Каково минимальное количество диэтилового эфира, кг, способное при испарении в ёмкости объёмом 350 м³ создать взрывоопасную концентрацию.

Решение.

Концентрация будет взрывоопасной, если $\varphi_{\text{н}} = \varphi_{\text{пг}}$ где ($\varphi_{\text{пг}}$ – концентрация паров горючего вещества). Расчетом (см. примеры 1-3 данного раздела) или по табл. 5 приложения находим НКПР пламени диэтилового эфира. Он равен 1,7 %.

Определим объем паров диэтилового эфира, необходимый для создания в объеме 350 м^3 этой концентрации

$$V_{\text{пг}} = \frac{1,7 \cdot 350}{100} = 19,7 \text{ м}^3$$

Таким образом, для создания НКПР диэтилового эфира об объеме 350 м^3 необходимо ввести $5,95 \text{ м}^3$ его паров. Принимая во внимание, что 1 кмоль (74 кг) пара, приведенный к нормальным условиям, занимает объем, равный $22,4 \text{ м}^3$, находим количество диэтилового эфира

$$M_{\text{г}} = \frac{74 \cdot 5,95}{22,4} = 19,7 \text{ кг}$$

Пример 6. Определить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации в объеме 50 м^3 при испарении 1 кг гексана, если температура окружающей среды 300 К.

Решение.

Очевидно, паровоздушная смесь будет взрывоопасной, если $\varphi_{\text{н}} \leq \varphi_{\text{пг}} \leq \varphi_{\text{в}}$. При 300 К объем паров гексана, образующийся в результате испарения 5 кг вещества, найдем, принимая во внимание, что при испарении 1 кмоль (86 кг) гексана при 273 К объем паровой фазы будет равен $22,4 \text{ м}^3$

$$V_{\text{пг}} = \frac{5 \cdot 22,4 \cdot 300}{86 \cdot 273} = 1,43 \text{ м}^3$$

Концентрация паров гексана в помещении объемом 50 м^3 , следовательно, будет равна

$$\varphi_{\text{пг}} = \frac{1,43}{50} 100 = 2,86\%$$

Определив концентрационные пределы распространения пламени гексана в воздухе (1,2–7,5 %), по таблицам или расчетом устанавливаем, что образующаяся смесь является взрывоопасной.

Пример 7. Определить, образуется ли взрывоопасная концентрация насыщенных паров над поверхностью резервуара, содержащего 60% диэтилового эфира (ДЭ) и 40% этилового спирта (ЭС), при температуре 245 К?

Решение.

Концентрация паров будет взрывоопасной, если $\varphi_{н}^{см} \leq \varphi_{нп}^{см} \leq \varphi_{в}^{см}$ ($\varphi_{нп}^{см}$ – концентрации насыщенных паров смеси жидкостей).

Очевидно, что в результате различной летучести веществ состав газовой фазы будет отличаться от состава конденсированной фазы. Содержание компонентов в газовой фазе по известному составу жидкой определим по закону Рауля для идеальных растворов жидкостей.

1. Определим мольный состав жидкой фазы

$$\mu_i^{жс} = \frac{q_i / M_i}{\sum q_i / M_i},$$

где $\mu_i^{жс}$ – мольная доля i -го вещества;

q_i – весовая доля i -го вещества;

M_i – молекулярная масса i -го вещества; ($M_{ДЭ}=74$, $M_{ЭС}=46$)

$$\eta_{ДЭ}^{жс} = \frac{\frac{0,6}{74}}{\frac{0,6}{74} + \frac{0,4}{46}} = 0,479 \quad \eta_{ЭС}^{жс} = \frac{\frac{0,4}{46}}{\frac{0,6}{74} + \frac{0,4}{46}} = 0,521$$

2. По уравнению (2.1.5), используя значения табл. 12 приложения. Находим давление насыщенного эфира и этилового спирта при температуре 19 °С (245 К)

$$\lg P_{ДЭ} = 6,9979 - \frac{1098,945}{232,372 - 19} = 1,84753$$

$$P_{ДЭ} = 70,39 \text{ мм.рт.ст.} = 382,6 \text{ Па}$$

$$\lg P_{ЭС} = 8,68665 - \frac{1918,508}{252,125 - 19} = 0,45713$$

$$P_{ЭС} = 2,87 \text{ мм.рт.ст.} = 382,6 \text{ Па}$$

3. Согласно закону Рауля, парциальное давление насыщенных паров i -й жидкости над смесью равно произведению давления насыщенного пара над чистой жидкостью на ее мольную долю в жидкой фазе, т.е.

$$P_{ДЭ(нар)} = 9384,4 \cdot 0,479 = 4495,1 \text{ Па};$$

$$P_{ЭС(нар)} = 382,6 \cdot 0,521 = 199,3 \text{ Па.}$$

4. Приняв сумму парциальных давлений насыщенных паров диэтилового эфира и этилового спирта равной 100%, определим

а) концентрацию паров в воздухе

$$\varphi_{нп}^{см} = \frac{4495,1 + 199,3}{101325} \cdot 100 = 4,6\%$$

б) мольный состав газовой фазы (закон Рауля-Дуартье)

$$\mu_{ДЭ(г)} = \frac{4495,1}{4495,1 + 199,3} \cdot 0,958 \quad \mu_{ЭС(г)} = 1,00 - 0,960 = 0,042$$

5. Определив расчетом или по справочным данным (табл.16 приложения) КПР пламени индивидуальных веществ (диэтиловый эфир 1,7÷59%, этиловый спирт 3,6÷19%). По правилу Ле-Шагелле рассчитаем КПР пламени паровой фазы

$$\varphi_H^{CM} = \frac{1}{\frac{0,958}{1,7} + \frac{0,042}{3,6}} = 1,7\% \quad \varphi_B^{CM} = \frac{1}{\frac{0,958}{49} + \frac{0,042}{19}} = 46,1\%$$

6. Сравнивая полученные в п.4,а концентрацию паровоздушной смеси с концентрационными пределами распространения пламени (1,7–46,1 %), делаем заключение, что при 245 К над данной жидкой фазой образуется взрывоопасная концентрация насыщенных паров в воздухе.

Пример 8. Рассчитать безопасную концентрацию кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе.

Решение.

По табл. 15 приложения находим теплоту образования ацетона $248,1 \cdot 10^3$ Дж/моль. Из химической формулы ацетона (C_3H_6O) следует, что $m_c=3$, $m_H=6$, $m_o=1$. Значения остальных параметров, необходимые для расчета по формуле (2.8), выбираем из табл. 11 для двуокиси углерода

$$\varphi_\phi = \frac{0,735 \cdot 10^{-5} \cdot 248 \cdot 10^3 + 0,579 + 1,251 \cdot 3 + 0,418 \cdot 6 + 0,542 \cdot 1}{2,020 - 1 + 4,642 \cdot 3 + 1,160 \cdot 6 - 2,321 \cdot 1} 100 = 48,1\%$$

$$\varphi_{O_2} = \frac{100 - 48,1}{4,844} = 10,7\% \quad \varphi_{O_2,БЕЗ} = 1,2 \cdot 10,7 - 4,2 = 8,6$$

Следовательно, при снижении концентрации кислорода в четырехкомпонентной системе, состоящей из паров ацетона, двуокиси углерода, азота и кислорода, до 8,6 % смесь становится взрывобезопасной. При содержании же кислорода, равном 10,7 % эта смесь будет предельной по взрываемости. Согласно справочным данным: (справочник "Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности". – М.: Химия, 1979), МВСК ацетоно-воздушной смеси при разбавлении ее двуокисью углерода составляет 14,9 %. Определим относительную ошибку расчета

$$\Delta = \frac{10,7 - 14,9}{14,9} = -28\%$$

Таким образом, результаты расчета МВСК занижены на 28%.

Задание на самостоятельную работу

Задача: Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить

с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку:

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
1	Амилбензол	Ацетилен
2	Н-Амиловый спирт	Метан
3	Анизол	Окись углерода
4	Анилин	Этан
5	Бутилацетат	Водород
6	Бутиловый спирт	Пропан
7	Бензол	Сероводород
8	Диэтиловый эфир	Бутан
9	Ксилол	Ацетилен
10	Уайт-спирит	Метан
11	Этиленгликоль	Окись углерода
12	Трет-амиловый спирт	Этан
13	Гексан	Водород
14	Метиловый спирт	Пропан
15	Толуол	Сероводород
16	Стирол	Бутан
17	Пентан	Метан
18	Этанол	Этан
19	Амилметилкетон	Пропан
20	Бутилбензол	Бутан
21	Бутилвиниловый эфир	Окись углерода
22	Ацетон	Ацетилен
23	Этиловый спирт	Водород
24	Гептан	Метан
25	Октан	Ацетилен
26	Гексан	Метан
27	Бутиловый спирт	Окись углерода
28	Анилин	Этан
29	Бензол	Водород
30	Ксилол	Пропан

3. Температурные показатели пожарной опасности

К температурным показателям пожарной опасности относятся температурные пределы распространения пламени (нижний T_H и верхний T_B , температура вспышки в закрытом и открытом приборах, температура воспламенения $T_{вп}$, температура самовоспламенения $T_{св}$, температура зажигания T_3 , температура, горения T_2 . В порядке возрастания они могут быть расположены в виде ряда

$$T_H \leq T_{BC}^3 < T_{BC}^O < T_{ВП} < T_{СВ} < T_3 < T_2$$

3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени

Нижний (верхний) температурный предел распространения пламени – температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров равна нижнему (верхнему) концентрационному пределу распространения.

Существует несколько полуэмпирических методов расчета температурных пределов распространения пламени, однако они мало отличаются друг от друга по точности.

Температурные пределы распространения пламени (ТПР) жидкостей рассчитывают по температуре кипения

$$t_{H(B)} = kt_{КИП} - l \quad (3.1.1)$$

где $t_{H(B)}$ – нижний (верхний) температурный предел распространения пламени;

$t_{КИП}$ – температура кипений, °С;

k, l – константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей.

Температурные пределы распространения пламени могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

$$P_{H(B)} = \frac{\varphi_{H(B)} P_O}{100} \quad (3.1.2)$$

где $P_{H(B)}$ – давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения;

$\varphi_{H(B)}$ – нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени;

P_O – атмосферное давление.

Из уравнения Антуана или по табл.17 приложения определяем температуру вещества, при которой достигается данное давление.

Эта температура будет являться соответственно нижним (верхним) пределом воспламенения.

Примеры

Пример 1. Определить ТПР пламени метилового спирта, если температура его кипения равна 65°C .

Решение.

Расчет проводим по формуле (3.1.1), значение констант определяем по табл. 8 приложения для нормальных жирных спиртов

$$t_H = 0,5746 \cdot 65 - 33,7 = 3,6^{\circ}\text{C} = 276,6 \text{ К};$$

$$t_B = 0,6028 \cdot 65 - 15,0 = 30^{\circ}\text{C} = 303 \text{ К}.$$

Определим относительную ошибку расчета. По табл. 16 приложения находим, что ТПР пламени метилового спирта составляют 280–320К:

$$\Delta_H = \frac{276,6 - 280}{280} 100 = -1,2\% \quad \Delta_B = \frac{303 - 312}{312} 100 = -2,9\%$$

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3%.

Пример 2. Определить температурные пределы распространения пламени ацетона, если его концентрационные пределы в воздухе равны 2,2–13,0 %. Атмосферное давление – нормальное.

Решение.

По формуле (3.1.2) определим давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам распространения пламени,

$$P_H = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2230 \text{ Па};$$

$$P_H = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13172 \text{ Па}$$

$$P_H = \frac{2230}{133,32} = 16,78 \text{ мм р. ст.};$$

$$P_H = \frac{13172}{13332} = 98,9 \text{ мм р. ст.}$$

Из уравнения Антуана следует

$$t = \frac{B}{A - \lg P} - C$$

Из табл. 12 приложения находим значение констант A , B и C для ацетона

$$A=7,25058; \quad B=1281,721; \quad C=237,088.$$

$$\lg P_H = 1,2235; \quad \lg P_B = 1,9994.$$

$$t_H = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,2235} - 237,088 = -25^{\circ}\text{C} = 248 \text{ К};$$

$$t_B = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,9994} - 237,088 = 8^{\circ}\text{C} = 281 \text{ К}.$$

Для решения этой же задачи можно воспользоваться данными табл.7 приложения. Из табл.17 следует, что НТПР пламени находим

между температурами 241,9–252,2 °С, а ВТПР пламени – между 271,0 и 280,7 К.

Линейной интерполяцией определим ТПР пламени:

$$T_H = 2417,9 + \frac{(22,3 - 13,33)(252,2 - 241,9)}{26,66 - 13,33} = 248,8K$$

$$T_B = 271 + \frac{(131,7 - 79,99)(280,7 - 271)}{133,32 - 79,99} = 280,4K$$

3.2. Расчет температуры вспышки и воспламенения

Температура вспышки – минимальная температура жидкости, при которой в условиях, специальных испытаний, происходит воспламенение паров жидкости при кратковременном воздействии высоко энергетического источника без последующего перехода горения в стационарный диффузионный режим.

Температура воспламенения – минимальная температура жидкости, при которой в условиях, специальных испытаний, происходит воспламенение паров жидкости при кратковременном воздействии высоко энергетического источника с последующим переходом горения в стационарный диффузионный режим.

Наиболее распространенным и достаточно точным является Ра – счет температур вспышки и воспламенения по формуле В.И. Блинова

$$T_{BC(ВП)} = \frac{A}{P_{НП} D n} \quad (3.2.1)$$

где $T_{BC(ВП)}$ – температура вспышки (воспламенения)

$P_{НП}$ – давление насыщенного пара при температуре вспышки (воспламенения);

D – коэффициент диффузии паров горючего в воздухе;

n – стехиометрический коэффициент при кислороде – количество молей кислорода, необходимое для полного окисления (до CO_2 , H_2O , SO_2 .) одного моля горючего вещества;

A – константа метода определения (табл. 3.2.1).

Таблица 3.2.1

Температура, К	Значение параметра А, $\frac{м^2 \cdot К \cdot Па}{с}$
Вспышки в закрытом тигле	28,0
Вспышки в открытом тигле	45,3
Воспламенения	53,3

Коэффициенты диффузии некоторых газов и паров в воздухе при нормальных условиях (D_0) приведены в табл. 7 приложения. При их отсутствии последние определяют по формуле

$$D_0 = \frac{10^{-1}}{\sqrt{\sum \Delta M_i \mu_i}} \quad (3.2.2)$$

где D_0 – коэффициент диффузии, м³/с;

μ_i – количество i -го элемента в молекуле горючего вещества;

ΔM_i – атомные (элементные) составляющие (табл. 3.2.2).

При температуре, отличающейся от нормальной, коэффициент диффузии D может быть рассчитан по соотношению

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n \quad (3.2.3)$$

где n – показатель, значение которого приведено в табл. 7 приложения.

Таблица 3.2.2

Название i -го элемента	Значение ΔM *
Углерод	25-50
Водород	1
Кислород	17
Азот	16
Сера	48
Хлор	37
Бром	79
Йод	104
Фтор	16

* значение ΔM зависит от числа атомов углерода и их положения в молекуле горючего:

- 1) $\Delta M=25$ для атомов углерода, входящих в ароматический цикл;
- 2) $\Delta M=25+3C$ – для атомов углерода в открытой цепи, если их количество меньше или равно восьми ($C, 8$);
- 3) $\Delta M=50$ – для атомов углерода в открытой цепи при $C>8$;
- 4) $\Delta M=25+2C$ – для атомов углерода, входящих в неароматический цикл при $C<8$;
- 5) $\Delta M=42$ – для атомов углерода, входящих в неароматический цикл при $C>8$.

Простым, но менее четным является расчет температур вспышки в закрытом тигле по формуле Элея

$$t_{BC} = t_{КИП} - 18\sqrt{k} \quad (3.2.4)$$

где t_{BC} – температура вспышки, °С;

$t_{\text{кип}}$ – температура кипения, °С;

k – коэффициент, определяющийся по формуле

$$k = 4m_C + m_H + 4m_S + m_N - 2m_O - 2m_{Cl} - 3m_F - 5m_{Br} \quad (3.2.5)$$

где $m_C, m_H, m_S, m_N, m_O, m_{Cl}, m_F, m_{Br}$ – количество элементов углерода, водорода, серы, азота, кислорода, хлора, фтора, брома в молекуле горючего вещества.

Температура вспышки в закрытом тигле может быть определена по нижнему температурному пределу воспламенения

$$t_{\text{вс}} = \frac{t_H + 2}{0,875} \quad (3.2.6)$$

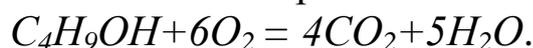
эта формула применима, если $0 < t_{\text{вс}} < 160$ °С.

Примеры

Пример 1. по формуле В.И. Блинова определить температуру воспламенения бутилового спирта.

Решение.

1. Определим значение стехиометрического коэффициента



Следовательно, $n=6$.

2. Определим значение коэффициента диффузии по формуле (3.2.2). Для этого по табл. 3.2.2 устанавливаем, что $\Delta M = 25 + 3,4 = 37$, тогда

$$D_0 = \frac{10^{-4}}{\sqrt{37 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 17 \cdot 1}} = 75,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$$

3. По табл. 3.2.1 выберем значение $A = 53,3$ и по формуле (3.2.1) определим произведение

$$T_{\text{вп}} P_{\text{нп}} = \frac{53,3}{75,8 \cdot 10^{-7} \cdot 6} = 1172 \cdot 10^{-3} \text{ К} \cdot \text{Па}$$

4. По табл. 17 приложения задаемся температурой 326,4 К, давление насыщенного пара при которой равно 5333 Па.

Произведение $TP = 326,4 \cdot 5333 = 1740 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}$.

Сравнивая полученные значения с вычислением в п.3, устанавливаем, что $T_{\text{вп}} P_{\text{нп}} < TP$.

5. Задаемся по табл.17 приложения меньшей температурой 314,5 К. Давление насыщенного пара при этом равно 2666 Па.

$TP = 314,5 \cdot 2666 = 5840 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}$.

Так как $TP > T_{\text{вп}} P_{\text{нп}}$, линейной интерполяцией находим значение температуры воспламенения

$$T_{ВП} = 314,5 + \frac{10^3(1172-840)(326,4-314,5)}{10^3(1740-840)} = 319 \text{ К}$$

Справочное значение температуры воспламенения составляет 314 К.

Погрешность расчета $\Delta = \frac{319-314}{314} = 1,6\%$

Пример 2. По формуле Элея определить, температуру вспышки бензола в закрытом тигле.

Решение.

Для расчета по формуле (3.2.4) необходимо знать температуру кипения бензола (C_6H_6) и значение коэффициента k .

Температура кипения бензола 353 К или 80 °С. Величину k определим по формуле

$$K_{III} = \frac{S_{III_i}}{S_{II_i}}$$

$$k = 4 \cdot 6 + 6 = 30.$$

Определим искомую величину температуры вспышки

$$T_{вс} = 80 - 18 \sqrt{30} = 18,6 \text{ °С или } 254,4 \text{ К.}$$

Согласно справочным данным, температура вспышки бензола равна 259 К. Определим ошибку расчета

$$\Delta = \frac{254,4 - 259}{259} 100 = -1,8\%$$

Результат расчета занижен менее чем на 2 %

Задание на самостоятельную работу

Задача: Рассчитать температурные пределы воспламенения, температуру вспышки паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку.

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
1	Амилбензол	Ацетилен
2	Н-Амиловый спирт	Метан
3	Анизол	Окись углерода
4	Анилин	Этан
5	Бутилацетат	Водород
6	Бутиловый спирт	Пропан
7	Бензол	Сероводород

Вариант	Вещество жидкость	Вещество газ
8	Диэтиловый эфир	Бутан
9	Ксилол	Ацетилен
10	Уайт-спирит	Метан
11	Этиленгликоль	Окись углерода
12	Трет-Амиловый спирт	Этан
13	Гексан	Водород
14	Метиловый спирт	Пропан
15	Толуол	Сероводород
16	Стирол	Бутан
17	Пентан	Метан
18	Этанол	Этан
19	Амилметилкетон	Пропан
20	Бутилбензол	Бутан
21	Бутилвиниловый эфир	Окись углерода
22	Ацетон	Ацетилен
23	Этиловый спирт	Водород
24	Гептан	Метан
25	Октан	Ацетилен
26	Гексан	Метан
27	Бутиловый спирт	Окись углерода
28	Анилин	Этан
29	Бензол	Водород
30	Ксилол	Пропан

3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения

Температура самовоспламенения – минимальная температура газо-(паро-)воздушной смеси, при которой происходит ее воспламенение без влияния высокоэнергетического источника зажигания.

Расчет температуры самовоспламенения проводят в следующей последовательности.

Определяют количество углеродных цепей

$$m_{ц} = \frac{M_p(M_p - 1)}{2}, \quad (3.3.1)$$

где $m_{ц}$ – общее число цепей;

M_p – количество функциональных групп в молекуле горючего вещества $-CH_3$, $-OH$, фенил. Фенильная группа может быть как концевой, так и в середине цепи.

Определяют длину каждой цепи (количество атомов углерода) и среднюю длину цепи

$$l_{cp} = \frac{\sum m_i C_i}{m_{ц}} \quad (3.3.2)$$

где C_i – количество атомов углерода в i -й цепи. При определении C_i надо иметь в виду, что группа $-OH$ удлиняет цепь, а фенильная группа уменьшает её на один атом углерода.

По табл. 9-11 приложения по средней длине цепи определяют температуру самовоспламенения. Температуру самовоспламенения можно также рассчитать по формулам

$$l_c = 300 + 116\sqrt{5 - l_{cp}} \text{ при } l_{cp} \leq 5; \quad (3.3.3,а)$$

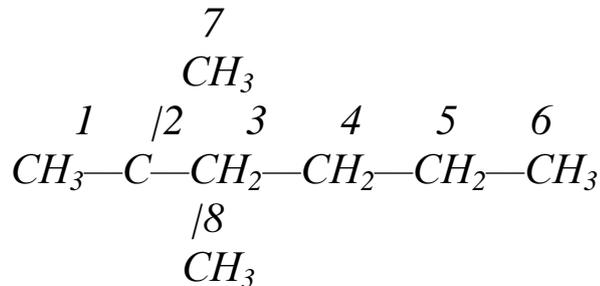
$$l_c = 300 - 38\sqrt{l_{cp} - 5} \text{ при } l_{cp} > 5; \quad (3.3.3,б)$$

Примеры

Пример 1. рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.

Решение.

Запишем структурную формулу горючего вещества и определим количество цепей



$M_p = 4$, так как в молекуле содержится четыре группы $-CH_3$.

$$m_{ц} = \frac{4(4-1)}{2} = 6$$

2. Находим длину каждой цепи и среднюю длину

m_i	1-6	7-6	8-6	1-7	1-8	7-8
C_i	6	6	6	3	3	3

$$l_{cp} = \frac{3 \cdot 6 + 3 \cdot 3}{6} = 4,5$$

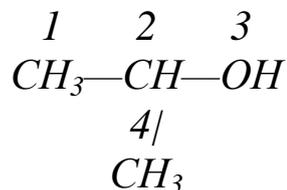
По табл. 9 приложения определяем, что температура самовоспламенения равна 643 К. по формуле (3.3.3,б)

$$t_c = 300 + 116\sqrt{5 - 4,5} = 328 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ или } 655 \text{ K}$$

Пример 2. Рассчитать температуру самовоспламенения изо-пропилового спирта.

Решение.

Исходя из структурной формулы вещества, определим количество цепей



$M_p = 3$, так как в молекуле содержится две группы —CH_3 и одна группа —OH

Находим длину каждой цепи и среднюю длину

m_i	1-3	3-4	1-4
C_i	2+1	2+1	3

В цепях 1-3 и 3-4 содержится по два атома углерода и одна группа —OH , которая удлиняет цепь на один атом углерода

$$l_{cp} = \frac{3 \cdot 6}{3} = 3$$

По табл. 11 приложения находим, что температура самовоспламенения изопропилового спирта равна 706 К; по формуле (4.10)

$$t_C = 300 + 116\sqrt{5-3} = 464 \text{ }^\circ\text{C} \text{ или } 737 \text{ К}$$

согласно справочным данным, температура самовоспламенения равна 693 К.

Относительная ошибка расчета с использованием таблицы составляет

$$\Delta = \frac{706 - 693}{693} 100 = 1,9\%$$

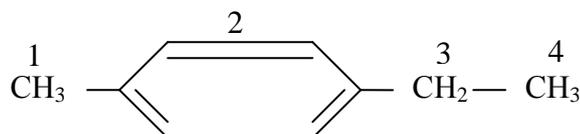
Если расчет вести по формуле (4.10), она возрастает до

$$\Delta = \frac{737 - 693}{693} 100 = 6,3\%$$

Пример 3. Определить температуру самовоспламенения вещества 1-метил-4-этилбензола.

Решение.

Структурная формула вещества



$M_p = 3$, так как в молекуле две метильные и одна фенильная группы.

Определим длину цепей

m_i	1-4	1-2	2-4
C_i	3-1	1-1	2-1

Длина цепи уменьшается на один атом углерода, так как в нее входит фенильная группа

$$l_{CP} = \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{3} = 1,0$$

По табл. 10. приложения определяем, что температура самовоспламенения равна 712 К.

Задание на самостоятельную работу

Задача: Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения i -го вещества. Сравнить расчетное значение с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку расчета.

Номер варианта	Вещество	
	Предельный углеводород	Ароматический углеводород
1	4, 4-диметилгептан	1, 2-диметилбензол
2	Изопентан	1, 3-диметилбензол
3	2, 3-диметилоктан	1, 4-диметилбензол
4	3-метилгексан	1, 2, 3-триметилбензол
5	2, 3-диметилпентан	1, 2, 4-триметилбензол
6	2-метилбутан	1, 3, 5-триметилбензол
7	2, 4-диметилгексан	Толуол
8	2, 2, 4-триметилбутан	о-Ксилол
9	2, 4-диметилпентан	м-Ксилол
10	Изобутан	п-Ксилол
11	2, 2-диметилбутан	1, 2-диметилбензол
12	2, 2-диметилпентан	1, 3-диметилбензол
13	Тетраметилметан	1, 4-диметилбензол
14	2, 4, 6-триметилнонан	1, 2, 3-триметилбензол
15	1, 3, 5, 7-тетраметилнонан	1, 2, 4-триметилбензол
16	4, 4-диметилгептан	1, 3, 5-триметилбензол
17	Изопентан	Толуол
18	2, 3-диметилоктан	о-Ксилол
19	3-метилгексан	м-Ксилол
20	2, 3-диметилпентан	п-Ксилол
21	2-метилбутан	1, 2-диметилбензол

Номер варианта	Вещество	
	Предельный углеводород	Ароматический углеводород
22	2, 4-диметилгексан	1, 3-диметилбензол
23	2, 2, 4-триметилбутан	1, 4-диметилбензол
24	2, 4-диметилпентан	1, 2, 3-триметилбензол
25	Изобутан	1, 2, 4-триметилбензол
26	2, 2-диметилбутан	1, 3, 5-триметилбензол
27	2, 2-диметилпентан	Толуол
28	Тетраметилметан	о-Ксилол
29	2, 4, 6-триметилнонан	м-Ксилол
30	1, 3, 5, 7-тетраметилнонан	п-Ксилол

4. Параметры взрыва парогазовоздушных систем

4.1. Расчет температуры и давления взрыва парогазовоздушных систем

Температура взрыва – температура (зоны пламени), до которой нагреваются продукты реакции горения. Это максимальная температура зоны химической реакции (зоны пламени).

Температура взрыва определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_H = \sum C_{pi} V_{nc} (T_v - T_0), \quad (4.1.1)$$

из этого уравнения адиабатическая температура взрыва равна:

$$T_v^* = T_0 + \frac{Q_H}{\sum C_{pi} V_{пг}}, \quad (4.1.2)$$

а действительная температура взрыва соответствует:

$$T_v = T_0 + \frac{Q_{пг}}{\sum C_{pi} V_{пг}}, \quad (4.1.3)$$

где T_v^* и T_v – соответственно адиабатическая и действительная температуры взрыва;

T_0 – начальная температура;

$V_{пгi}$ – объем i -го продукта горения;

Q_H – низшая теплота горения вещества;

$Q_{пг}$ – теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения.

Теплоту, пошедшую на нагрев продуктов горения, определяют из уравнения:

$$Q_{пг} = Q_H (1 - \eta) \quad , \quad (4.1.4)$$

где η – доля теплотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

Расчет температуры взрыва по формуле (4.1.2) или (4.1.3) может быть проведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоёмкость газов зависит от температуры горения (табл. 4.1.1)

Таблица 4.1.1

№	Определяемые параметры	Примечание
1	Объём и состав продуктов горения	кмоль, м ³
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплотерь)	Q_{ng} или Q_n кДж/кмоль, кДж/кг
3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{cp} = \frac{Q_{H(ПГ)}}{\sum V_{ПГi}}$ (4.1.5)
4	Температура горения T_1 (табл. 1,2 прил.) по средней энтальпии с помощью табл. 1 (если H_{cp} выражена в кДж/м ³), ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 1,2 прил.)	$Q'_{ng} = \sum H_i V_{ngi}$ (4.1.6)
6	Если $Q'_{ПГ} < Q_{H(ПГ)}$, то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $Q'_{ПГ} > Q_{H(ПГ)}$, то $T_2 < T_1$)	H_i – энтальпия i -продукта горения; V_i – объём i -продукта горения
7	Q''_{ng} по формуле (4.1.6)	
8	Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{ng} < Q_{H(ng)} < Q''_{ng}$	
9	Температура горения	$T_G = T_1 + \frac{(Q_{H(ПГ)} - Q''_{ПГ})(T_2 - T_1)}{Q'''_{ПГ} - Q''_{ПГ}}$ (4.1.7)

Действительная температура взрыва на пожаре для большинства газообразных, жидких и твёрдых веществ изменяется в достаточно узких пределах (1300–1800 К). В связи с этим расчетная оценка действительной температуры взрыва может быть значительно упрощена, если теплоемкость продуктов горения выбирать при температуре 1300 К:

$$T_{ПГ} = T_0 + \frac{Q_H}{\sum C_{Pi}^* V_{ПГi}} \quad (4.1.8)$$

где C_{Pi}^* – теплоемкость i -го продукта горения при 1500 К (табл. 4.1.2)

Таблица 4.1.2

Вещество	Теплоёмкость	
	кДж/(м·К)	Дж/(моль·К)
CO ₂	2,27	50,85·10 ⁻³
SO ₂	2,28	51,07·10 ⁻³
H ₂ O (пар)	1,78	39,87·10 ⁻³
N ₂	1,42	31,81·10 ⁻³
Воздух	1,44	32,26·10 ⁻³

Давление при взрыве – важный фактор для расчета противовзрывной защиты аппаратов и расчета ослабленных и легкообрасываемых конструкций зданий и сооружений.

Давление при взрыве можно определить по формуле

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \sum_{i=1}^n n_i}{T_0 \sum_{i=1}^m m_i} \quad (4.1.9)$$

где P_0 – начальное давление смеси;

T_0 – начальная температура смеси;

$T_{взр}$ – температура взрыва;

$\sum_{i=1}^n n_i$ – сумма молей продуктов горения;

$\sum_{i=1}^m m_i$ – сумма молей исходной смеси.

Пример

Пример 1. Рассчитать температуру взрыва и развиваемого давления при взрыве паров уксусной кислоты CH₃COOH в смеси с воздухом при стехиометрической концентрации при начальной температуре 25 °С и давления 101,325 КПа.

Решение

По справочным данным (справочник Корольченко) определяем стандартную теплоту сгорания одного моля уксусной кислоты

$$\Delta H = -786500 \text{ Дж}$$

Составляем термохимическое уравнение реакции горения



Определяем разность молей продуктов горения и исходной смеси

$$n_{n_2} = 2 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 11,52 \text{ моль}$$

$$n_{ucx} = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ моль}$$

$$\Delta n = n_{n_2} - n_{ucx} = 11,52 - 10,52 = 1 \text{ моль}$$

Определяем энергию взрыва

$$Q_{взр} = \Delta H - R \cdot T \Delta n$$

$$Q_{взр} = -786500 - 8,314 \cdot (273 + 25) \cdot 1 = -788977,6 \text{ Дж}$$

Определяем внутреннюю энергию продуктов взрыва, приняв начальную температуру взрыва равной 2200К

$$U_1 = 2 \cdot 95,062 + 2 \cdot 74,083 + 2 \cdot 3,76 \cdot 53,845 = 743,204 \text{ КДж} = 743204 \text{ Дж}$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва оказалась меньше энергии взрыва, значит, принимаем за температуру взрыва, следующую большую и повторяем расчет:

$$U_2 = 2 \cdot 105,727 + 2 \cdot 82,760 + 2 \cdot 3,76 \cdot 59,477 = 824,241 \text{ КДж} = 824241 \text{ Дж}$$

Внутренняя энергия продуктов взрыва оказалась выше энергии взрыва, значит, температуру взрыва следует определять методом интерполяции.

Находит температуру взрыва методом линейной интерполяции

$$T_{взр} = 2200 + \frac{(2400 - 2200) \cdot (788977,6 - 743204)}{(824241 - 743204)} = 2312,97 \text{ К}$$

Определяем давление взрыва паров уксусной кислоты в смеси с воздухом при стехиометрической концентрации и при заданных условиях

$$P_{взр} = \frac{P_0 \cdot T_{взр} \sum_{i=1}^n n_i}{T_0 \sum_{i=1}^m m_i}; [\text{КПа}]$$

$$P_{взр} = \frac{101,325 \cdot 2312,97 \cdot (2 + 2 + 2 \cdot 3,76)}{(273 + 25) \cdot (1 + 2 + 2 \cdot 3,76)} = 935,96 \text{ КПа} = 9,2 \text{ атм} = 7020,3 \text{ мм.рт.ст.}$$

Задание на самостоятельную работу

Задача: Рассчитать температуру и давление при взрыве паров горючей жидкости при начальной температуре ... °С и давлении ... мм рт. ст. Концентрация стехиометрическая.

Вариант	Вещество	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{мм рт.ст.}$
1	Амилбензол	10	780
2	Н-Амиловый спирт	11	760
3	Анизол	12	778

Вариант	Вещество	$T_o, ^\circ\text{C}$	$P_o, \text{мм рт.ст.}$
4	Анилин	15	762
5	Бутилацетат	17	776
6	Бутиловый спирт	18	764
7	Бензол	-5	774
8	Диэтиловый эфир	20	768
9	Ксилол	22	772
10	Уайт-спирит	-6	770
11	Этиленгликоль	25	740
12	Трет-Амиловый спирт	27	758
13	Гексан	5	742
14	Метиловый спирт	8	756
15	Толуол	-10	744
16	Стирол	12	754
17	Пентан	18	746
18	Этанол	4	752
19	Амилметилкетон	-6	748
20	Бутилбензол	6	750
21	Бутилвиниловый эфир	-4	769
22	Ацетон	4	779
23	Этиловый спирт	-2	749
24	Гептан	2	761
25	Октан	28	765
26	Гексан	19	759
27	Бутиловый спирт	-6	757
28	Анилин	21	769
29	Бензол	-11	770
30	Ксилол	13	754

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Атомные массы некоторых элементов

Название	Химический знак	Порядковый номер	Атомная масса
Азот	N	7	14
Аргон	Ar	18	39,95
Бром	Br	35	79,9
Водород	H	1	1,01
Гелий	He	2	4,0
Йод	I	53	126,9
Кислород	O	8	16,0
Неон	Ne	10	20,18
Сера	S	16	32,06
Углерод	C	6	12,01
Фосфор	P	15	30,97
Фтор	F	9	19,0
Хлор	Cl	17	35,45

Таблица 2

Основные физические постоянные

Название	Обозначение	Численное значение
Число Авогадро	N_A	$6,0225 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	8,3143 Дж/(моль·К)

Таблица 3

Основные физические константы некоторых газов

Название или химическая формула	M , кг/кмоль	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, К	$T_{кип}$, К	ΔH_f^0 , кДж/моль
Воздух	28,98	1,293	60	81	0
Ar	39,95	1,784	83,7	87,3	0
CO	28,01	1,250	68	81	112,7
CO ₂	44,01	1,977	216,4	194,5	396,9
CH ₄	16,04	0,717	90,5	112,4	75
C ₂ H ₆	30,06	1,357	90,5	184,4	88,4
C ₃ H ₈	44,10	2,019	85,6	230,9	109,4
H ₂ C ₄ H ₁₀	58,12	2,703	134,6	272,5	132,4
изо-C ₄ H ₁₀	58,12	2,668	113,4	261,3	-
C ₂ H ₄	28,05	1,260	110,8	169,3	-48,6
C ₂ H ₂	26,04	1,173	192,2	189,2	-224,6
H ₂	2,02	0,090	13,8	20,3	0
H ₂ O (пар)	18,02	0,768	273	373,0	242,2
N ₂	28,01	1,251	63	77,2	0
O ₂	32,0	1,429	54,6	90,1	0
NH ₃	17,0	0,770	-	240	46,1
H ₂ S	76,14	1,263	160,9	319,25	201,1

Примечание: M – молекулярная масса газа; ρ – плотность при нормальных условиях; $T_{пл}$ и $T_{кип}$ – температуры плавления и кипения при давлении 101325 Па; ΔH_f^0 – теплота образования.

**Показатели пожарной опасности
некоторых твердых горючих материалов**

Название вещества	$T_{всп},$ К	$T_{св},$ К	$Q_H,$ кДж/кг
Антрацит	-	773	34400
Винипласт	623	723	18105
Волокно ацетатное	593	718	-
Волокно вискозное	508	733	-
Волокно лавсан	663	713	-
Волокно капрон	668	713	-
Древесина сосновая ($W = 9\%$)	528	672	18731-20853
Картон	632	713	31087
Каучук натуральный	402	648	44769
Линолеум ПВХ	603	683	13690-14309
Пенопласт ПХВ	699	774	18325-19493
Парафин ($C_{13} - C_{15}$)	371-385	473	-
Полистирол	618	763	39800-40700
Полиэтилен	-	653	46588
Стекло органическое	533	733	27702
Хлопок ($W = 4,5\%$)	483	680	15712,5

Средняя объемная теплоемкость газов

Температура T, K	$c_p, \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot K)^*$						
	CO_2	H_2O	N_2	O_2	SO_2	H_2	CH_4
500	1,79	1,52	1,30	1,37	1,89	1,30	1,76
600	1,86	1,54	1,31	1,37	1,96	1,30	1,89
700	1,93	1,57	1,32	1,38	2,01	1,30	2,01
800	1,99	1,59	1,33	1,40	2,07	1,31	2,14
900	2,04	1,63	1,34	1,41	2,12	1,31	2,26
1000	2,09	1,64	1,35	1,44	2,15	1,31	2,38
1100	2,13	1,67	1,37	1,45	2,18	1,32	2,50
1200	2,17	1,70	1,38	1,47	2,22	1,33	2,60
1300	2,20	1,72	1,39	1,48	2,24	1,33	2,70
1400	2,24	1,75	1,40	1,49	2,26	1,34	2,80
1500	2,26	1,78	1,41	1,50	2,28	1,34	2,86
1600	2,29	1,80	1,42	1,51	2,29	1,35	-
1700	2,30	1,83	1,43	1,52	2,31	1,36	-
1800	2,34	1,85	1,44	1,53	2,32	1,37	-
1900	2,36	1,88	1,45	1,54	2,34	1,38	-

Температура T , К	c_p , кДж/(м ³ ·К)*						
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO ₂	H ₂	CH ₄
2000	2,38	1,90	1,46	1,55	2,35	1,38	-
2100	2,39	1,92	1,47	1,55	2,36	1,39	-
2200	2,41	1,94	1,48	1,56	2,38	1,40	-
2300	2,42	1,96	1,48	1,57	2,40	1,41	-
2400	2,44	1,98	1,49	1,58	2,41	1,42	-
2500	2,45	2,00	1,50	1,58	2,43	1,42	-

* Средняя теплоемкость приводится для температурного интервала от 273 К до указанной в таблице температуры

Таблица 6

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, К	Теплосодержание, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,3
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7
2200	78,1	74,1	74,7	120,8	98,8	118,5
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	119,4	141,5

Температура, К	Теплосодержание, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
2700	97,9	92,6	93,1	151,5	124,8	147,3
2800	101,8	96,4	96,8	157,6	130,3	153,0
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7

Таблица 7

Константы уравнения Антуана для давления пара некоторых органических жидкостей в области указанных температур

$$\lg P = A - \frac{B}{T - C}, \text{ где } P, \text{ Па; } T, \text{ К}$$

Жидкость	A	B	C	Интервал температур, К
Ацетон	9,376	1282	36,1	258-366
Бензол	9,109	1252	48,0	264-353
Гексан	8,995	1166	49,6	219-342
Глицерин	11,18	3074	58,5	414-536
Пентан	8,096	1063	41,2	223-309
Метанол	10,53	1660	27,4	263-363
Этанол	10,81	1918	21,1	242-351
Пропанол-1	10,44	1752	48,1	273-370
Бутанол-1	11,72	2665	-6,4	274-399
<i>n</i> -Амиловый спирт	9,307	1288	111,9	347-430
Толуол	9,08	1345	53,7	243-473
Эфир диэтиловый	9,123	1099	40,8	213-308

Величины параметров K и ℓ для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей

Гомологический ряд	Формула $n = 0, 1, 2, 3, \dots$	Параметры	
		K	ℓ
Нормальные алканы	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	0,6957	73,8
		0,7874	50,3
2-метилалканы	$(\text{CH}_3)_2-\text{CH}(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	0,6885	74,9
		0,7900	52,2
Нормальные 1-алкены	$\text{CH}_2=\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	0,6867	74,5
		0,7976	49,5
Нормальные жирные спирты	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	0,5746	33,7
		0,6928	15,0
2-метилкарбинолы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	0,6582	44,1
		0,7278	21,5
<i>n</i> -Алкилформиаты	$\text{HCOO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	0,5359	47,6
		0,6050	25,0
<i>n</i> -Алкилацетаты	$\text{CH}_3\text{COO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	0,5940	50,9
		0,7761	40,8

Примечание. Числитель параметра относится к нижнему температурному пределу воспламенения, знаменатель параметра – к верхнему температурному пределу воспламенения.

Температура самовоспламенения некоторых предельных углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

ℓ_{cp}	$T_{\text{св}}, \text{K}$						
3,0	743	6,0	507	9,0	482	12,0	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,4	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,5	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,6	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4,0	686	7,0	496	10,0	479	13,0	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477

l_{cp}	T_{CB}, K						
4,3	665	7,3	494	10,3	479	13,3	477
4,4	654	7,4	493	10,4	478	13,4	477
4,5	643	7,5	492	10,5	478	13,5	476
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5,0	560	8,0	488	11,0	478	14,0	476
5,1	547	8,1	487	11,1	478	14,1	476
5,2	535	8,2	486	11,2	478	14,2	476
5,3	528	8,3	486	11,3	478	14,3	476
5,4	522	8,4	485	11,4	478	14,4	476
5,5	517	8,5	484	11,5	478	14,5	476
5,6	513	8,6	484	11,6	477	14,6	476
5,7	511	8,7	483	11,7	477	14,7	476
5,8	509	8,8	483	11,8	477	14,8	476
5,9	508	8,9	482	11,9	477	14,9	476
-	-	-	-	-	-	15,0	475

Таблица 10

***Температура самовоспламенения некоторых предельных
одноатомных спиртов в зависимости от средней длины
углеродной цепи***

l_{cp}	T_{CB}, K						
2,0	737	4,4	610	6,8	545	9,2	518
2,1	736	4,5	606	6,9	543	9,3	517
2,2	734	4,6	602	7,0	542	9,4	516
2,3	732	4,7	599	7,1	540	9,5	516
2,4	730	4,8	595	7,2	539	9,6	515
2,5	728	4,9	592	7,3	537	9,7	514
2,6	725	5,0	588	7,4	536	9,8	513
2,7	721	5,1	585	7,5	535	9,9	513
2,8	716	5,2	582	7,6	534	10,0	512
2,9	711	5,3	579	7,7	533	10,5	509
3,0	706	5,4	577	7,8	531	11,0	507
3,1	696	5,5	574	7,9	530	11,5	506
3,2	693	5,6	572	8,0	529	12,0	505
3,3	636	5,7	569	8,1	528	12,5	505
3,4	678	5,8	567	8,2	527	13,0	504
3,5	669	5,9	564	8,3	526	13,5	504

l_{cp}	T_{CB}, K						
3,6	658	6,0	562	8,4	525	14,0	503
3,7	649	6,1	560	8,5	524	14,5	503
3,8	642	6,2	557	8,6	523	15,0	502
3,9	634	6,3	555	8,7	522	15,5	502
4,0	628	6,4	553	8,8	521	16,0	501
4,1	623	6,5	551	8,9	520	16,5	501
4,2	619	6,6	549	9,0	519	17,0	500
4,3	614	6,7	547	9,1	519	17,5	500

Таблица 11

Температура самовоспламенения некоторых ароматических углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

l_{cp}	T_c, K	l_{cp}	T_c, K	l_{cp}	T_c, K
-2	843	-	-	-	-
-1,9	842	0,1	810	2,1	702
-1,8	841	0,2	794	2,2	701
-1,7	840	0,3	774	2,3	701
-1,6	840	0,4	753	2,4	700
-1,5	839	0,5	733	2,5	700
-1,4	838	0,6	723	2,6	699
-1,3	837	0,7	718	2,7	699
-1,2	837	0,8	715	2,8	698
-1,1	836	0,9	713	2,9	698
-1	835	1	712	3	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
-0,2	827	1,8	704	3,8	696
-0,1	824	1,9	703	3,9	696
0	819	2	703	4	695

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, °С	Теплосодержание, кДж/ м ³ ·10 ⁻²					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	1,3	1,3	1,3	1,7	1,5	1,8
200	2,7	2,6	2,6	3,6	3,0	3,8
300	4,1	3,9	3,9	5,6	4,7	5,9
400	5,5	5,3	5,3	7,7	5,9	8,2
500	6,7	6,7	6,7	9,3	6,3	10,3
600	8,5	8,1	8,1	12,3	9,7	12,7
700	10,0	9,5	9,6	14,6	11,5	15,1
800	11,6	11,0	11,1	17,1	13,4	17,5
900	13,2	12,5	12,6	19,5	15,3	19,9
1000	14,8	14,0	14,1	22,1	17,2	22,4
1100	16,4	15,5	15,6	24,6	19,3	24,9
1200	18,0	17,1	17,2	27,2	21,3	27,4
1300	19,7	18,6	18,8	29,8	23,5	29,8
1400	21,3	20,1	20,4	32,4	25,6	32,4
1500	23,0	21,8	21,9	35,1	27,8	34,9
1600	24,6	23,4	23,6	37,7	30,0	37,5
1700	26,3	25,0	25,2	40,4	32,3	40,0
1800	28,0	26,6	26,8	43,1	34,6	42,6
1900	29,7	28,2	28,4	45,8	36,9	45,3
2000	31,4	29,8	30,0	48,5	39,3	47,9
2100	33,1	31,4	31,7	51,2	41,7	50,6
2200	35,0	33,0	33,3	53,9	44,1	53,4
2300	36,6	34,7	35,0	56,6	46,7	56,1
2400	38,3	36,3	36,6	59,3	48,9	58,9
2500	40,0	38,0	38,3	62,1	51,4	61,7
2600	41,8	39,5	40,0	64,8	53,9	64,6
2700	43,7	41,4	41,6	67,6	56,4	67,5
2800	45,5	43,0	43,2	70,3	59,0	70,5
2900	47,3	44,7	44,8	73,1	61,6	73,5
3000	49,4	46,3	46,5	75,9	64,3	76,6

Таблица 13

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Газы	Плотность по воздуху	Температура самовоспламенения, К	Пределы воспламенения, %	
			нижний	верхний
Аммиак	0,59	903	15,0	28,0
Ацетилен	0,9	608	2,0	81,0
Бутан	2,0	678	1,9	9,1
Бутилен	1,93	657	1,6	9,4
Водород	0,069	783	4,0	75,0
Метан	0,55	810	5,0	15,0
Окись углерода	0,967	883	12,5	74,0
Окись этилена	1,5	702	3,0	80,0
Окись пропилена	2,0	673	2,0	22,0
Пропан	1,56	739	2,1	95,0
Пропилен	1,45	683	2,2	10,3
Сероводород	1,19	519	4,3	46,0
Этан	1,04	745	2,9	15,0
Этилен	0,97	813	3,0	32,0

Таблица 14

Значение параметров для расчета минимальной флегматизирующей концентрации инертных газов

Параметры, моль/Дж	Значение параметров при разбавлении смеси		
	Азотом, $\times 10^{-5}$	водяным паром, $\times 10^{-5}$	двуокисью углерода, $\times 10^{-5}$
h'_f	0,864	0,800	0,735
h'_ϕ	1,256	0,780	0,579
h'_c	2,5277	1,651	1,251
h'_H	0,7592	0,527	0,418
h'_o	0,197	1,446	0,542
h'_N	-0,151	-0,147	-0,135
$h'_{C=C}$	1,500	1,500	1,500
h''_ϕ	2,800	2,236	2,020
h''_c	5,946	5,000	4,642
h''_H	1,486	1,250	1,160
h''_o	-2,973	-2,500	-2,321
$h''_{C=C}$	0	0	0
h''_N	0	0	0

Теплота образования и сгорания некоторых веществ

Вещество	Теплота образования, кДж/моль	Теплота сгорания, кДж/моль
Альдегид муравьиный (ж)	121,1	561,5
Альдегид уксусный (ж)	166,3	1173,2
Аммиак (газ)	46,1	384,2
Анилин (ж)	29,7	3484,0
Антрацен (тв)	-101,4	7102,0
Ацетилен (газ)	-224,6	1307,3
Ацетон (ж)	248,1	1789,1
Бензол (ж)	-34,8	3282,4
Бутадиен – 1,3 (ж)	-104,3	2547,9
н – Бутан (газ)	132,4	2882,3
н – Бутан (ж)	153,8	2863,0
Бутен – 1 (газ)	6,3	2723,9
Винилхлорид (газ)	-37,7	1259,9
Винилхлорид (ж)	-17,2	1239,4
Вода (ж)	286,6	-
Вода (газ)	242,2	-
н – Гексан	167,2	4150,6
н – Гептан	239,7	4814,3
Глицерин	675,4	1658,8
Двуокись серы	297,5	-
Двуокись углерода	396,6	-
Диоксон (ж)	375,4	2354,8
Дифенил (тв)	-80,4	6258,2
Изобутан (ж)	159,2	2857,6
КИСЛОТЫ		
Бензойная (тв)	394,3	3233,8
Масляная	525,0	2178,8
Муравьиная (ж)	419,0	263,1
Олеиновая	625,1	11183,1
Пропионовая (ж)	458,4	1589,3
Стеариновая (тв)	937,7	11304,6
Уксусная (ж)	485,6	942,7
Метан	75,0	891,5
Мочевина	-	636,9
Нафталин	-62,8	5161,2
Нитроэтан (ж)	144,1	1364,3
Окись углерода	112,7	283,2

Вещество	Теплота образования, кДж/моль	Теплота сгорания, кДж/моль
н-Пентан (ж)	184,4	3515,0
Пропан (газ)	109,4	2223,2
Пропан (ж)	125,3	2209,0
Сероводород	201,1	338,5
Сероуглерод (ж)	-88,0	979,6
СПИРТЫ		
н-Амиловый	359,1	3297,5
н-Бутиловый	341,5	2677,4
н-Гексиловый	385,1	3996,8
Метиловый	239,0	726,6
Пропиловый	307,1	2019,6
Этиловый	278,2	1374,3
ЭФИРЫ		
Теофен (ж)	-81,7	2536,2
Тетралин	81,7	5597,4
Толуол (ж)	4,19	3921,8
Фенол (тв)	171,4	3067,1
Этан (газ)	88,4	1562,0
Этилбензол (ж)	33,1	4567,5
Этилен	-48,6	1391,1
Этилглицерин (ж)	455,4	1152,2
ЭФИРЫ		
Диметиловый (ж)	207,8	1443,9
Диэтиловый (ж)	283,2	2730,6
Уксусноаниловый	594,7	4189,8
Уксуснобутиловый (ж)	542,2	3551,4
Уксуснометиловый (ж)	411,9	1635,8
Уксуснопропиловый (ж)	513,7	2899,1
Уксусноэтиловый (ж)	480,2	2256,3

Показатели пожарной опасности некоторых жидкостей

Жидкости	Плотность, кг/м ³	Температура самовоспламенения, %	ТПР пламени, %		КПР пламени, %	
			нижний (температура вспышки)	верхний	нижний	верхний
Анилин	1022	835	343	363	1,3	4,2
Альдегид уксусный	780	458	235	-	4,0	5,0
Ацетон	790	738	253	279	2,2	13,0
Бензол	879	813	259	283	1,4	7,1
Глицерин	1260	673	431	513	-	-
Кислота уксусная (ледяная)	1049	727	308	349	3,3	22,0
Сероуглерод	1263	363	223	299	1,0	50,0
СПИРТЫ						
Изоамиловый	816	628	310	335	1,07	5,0
Бензиловый	1050	673	360	418	1,0	15,5
н-Бутиловый	814	683	304	333	1,52	7,9
Изобутиловый	820	828	299	323	1,89	7,3
Метиловый	795	-	280	312	6,0	34,7
н-Пропиловый	803	737	293	326	2,02	13,55
Изопропиловый	785	643	281	310	2,25	11,65
Этиловый	789	693	284	314	3,6	19,0
ЭФИРЫ						
Стирол	902	803	299	332	1,08	6,2
Толуол	886	809	273	303	1,3	6,7
Этеленгликоль	1114	653	385	297	3,8	6,35
Диэтиловый	713	437	228	386	1,7	49,0
Уксусноизоамиловый	870	703	276	330	0,2	4,35
Уксусноэтиловый	881	673	-	-	-	-

**Давление насыщенных паров
некоторых индивидуальных веществ, Па**

Вещество	133,322	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13332,2	26664,4	53328,8	101325
	Температура, К								
Акриловая кислота	276,5	312,0	325,0	339,2	348,0	359,1	376,3	395,0	414,0
Альдегид уксусный	191,5	216,2	225,2	235,2	241,6	250,4	263,0	277,9	293,3
Ангидрид уксусный	274,7	309,0	321,8	335,1	343,8	355,2	373,0	392,8	412,6
Ацетон	213,6	241,9	252,2	163,6	271,0	280,7	295,7	312,5	329,5
Бензол	236,3	261,5	270,4	280,6	288,4	299,1	315,2	333,6	353,1
Бромистый этил	198,7	225,5	235,2	246,3	253,5	263,2	287,5	294,0	311,4
Бутилбензол	295,7	335,0	349,3	365,4	375,6	389,2	409,9	432,2	456,1
Бутилформиат	246,6	271,1	291,0	304,6	312,8	324,0	340,9	359,2	379,0
Метилэтил-кетон	224,2	255,3	266,5	279,0	287,0	298,0	314,6	333,0	352,6
Метилцикло-гексан	237,1	269,8	281,7	295,0	303,5	317,1	332,6	252,6	373,9
3-метил-2-бутанол	253,1	283,3	291,3	302,6	309,2	318,5	332,0	346,8	361,9
2-метилбутан	190,1	216,0	225,7	236,5	243,4	-	267,1	283,5	300,8
Окись этилена	198,0	224,0	233,7	244,5	251,7	261,0	275,1	290,8	307,5
Октан	259,0	281,3	304,5	318,1	326,8	338,7	356,0	377,0	398,6
Пропилбензол	279,3	316,4	329,8	344,6	354,1	-	386,5	408,7	432,2
СПИРТЫ									
Аллиловый	253,0	283,5	294,7	306,4	313,3	323,0	337,5	353,2	369,6
Амиловый	286,6	317,9	328,8	341,0	348,5	358,8	375,0	392,8	410,8
Бензиловый	331,0	365,6	378,8	392,8	402,3	414,7	433,0	456,0	477,7
Бутиловый	271,8	303,2	314,5	326,4	333,3	343,1	357,3	373,8	390,5
Бутиловый (вторичный)	270,8	389,9	300,3	311,1	318,2	327,1	340,9	356,9	372,5
Изобутиловый	264,0	287,3	294,7	317,1	324,7	334,58	348,9	364,4	381,0
Метиловый	229,0	256,8	267,0	278,8	285,1	294,2	307,8	322,9	337,7
н-пропиловый	258,0	287,7	298,3	309,4	316,5	325,8	339,8	365,0	370,8
Пропиловый (вторичный)	249,1	275,4	285,7	296,8	303,5	312,5	326,0	340,8	355,5
Этиловый	241,7	270,7	231,0	292,0	299,0	309,9	321,4	336,8	351,4
Стирол									
Стирол	266,0	303,8	317,6	332,8	342,5	355,0	374,3	395,5	418,2
Серовуглерод									
Серовуглерод	199,2	228,3	238,7	250,5	257,7	267,9	283,4	301,0	319,5
Толуол									
Толуол	246,3	279,4	291,4	304,8	313,3	324,9	342,5	362,5	383,6
Этилбензол									
Этилбензол	263,2	298,9	311,6	325,8	334,8	347,1	365,7	386,8	409,2
ЭФИРЫ									
Диэтиловый	198,7	224,9	234,5	245,2	251,2	261,5	275,2	290,9	376,0
Уксусно-метиловый	215,8	243,7	253,9	265,1	272,5	282,4	297,0	313,0	330,8
Уксусно-	246,3	278,4	289,0	301,8	310,0	320,8	337,0	-	374,8

Вещество	133,322	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13332,2	26664,4	53328,8	101325
	Температура, К								
пропиловый									
Уксусно-этиловый	229,6	259,5	270,0	282,1	289,6	300,0	315,0	332,3	350,1

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 280100 "Безопасность жизнедеятельности" специальности 280101.65 "Безопасность жизнедеятельности в техносфере" / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов; ГОУ ВПО "Юго-Запад. гос. ун-т", Рос. гос. технолог. ун-т им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ). – Москва : Юрайт, 2014. – 435 с.

2. Пузырев, В. Н. Теория горения, взрыва и газодинамических явлений [Электронный ресурс] : курс лекций / ГОУ ВПО "Кузбас. гос. техн. ун-т". – Кемерово, 2006. – 106 с.

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90111&type=utchposob:common>

3. Девясилов В. А. Теория горения и взрыва: практикум : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Техносферная безопасность" / В. А. Девясилов, Т. И. Дроздова, С. С. Тимофеева ; под общ. ред. В. А. Девясилова. – М. : Форум, 2012. – 352 с.

Дополнительная литература

4. Варнатц, Ц. Маас. Горение, физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ц. Маас Варнатц, Р. Диббл. – М.: Физматлит, 2003.

5. Померанцев В. В. Основы практической теории горения. – Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

6. Генералов М. Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ. – М.: ИЦК «Академкнига», 2004. – 397 с.

7. Демидов, П. Г. Горение и свойства горючих веществ: учеб. пособие / П. Г. Демидов, В. А. Шандыба, П. П. Щеглов. – Москва : Химия, 1973. – 247 с.

8. Катанов, И. Б. Технология и безопасность взрывных работ [Электронный ресурс] : учеб. пособие / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос.

техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. открытых горн. работ. – Кемерово, 2012. – 112 с. –

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90701&type=utchposob:common>

9. Ганопольский, М.И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности : препринт. – М. : Горная книга, 2011. – 38 с. –

<http://www.biblioclub.ru/book/69817/>

10. Процессы горения / И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Л. К. Исаев, Е. В. Крылов. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1984. – 389с.

11. Абдурагимов И. М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И. М. Абдурагимов, В. Ю. Говаров, Е. В. Макаров. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1988. – 255 с.

12. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ / П. Г. Демидов, В. С. Саушев. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1975. – 278 с.

13. Монахов В.Т. «Методы исследований пожарной опасности веществ». – М.: Химия, 1972. – 413 с.

14. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. Ч. 1-2 / А. Я. Корольченко, В. А. Корольченко. – М.: Химия, 2004.

15. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.