

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Методические указания к проведению практических занятий
для студентов направления бакалавриата 280700 – Техносферная
безопасность

Белгород
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

Кафедра безопасности жизнедеятельности

Утверждено
научно-методическим советом
университета

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Методические указания к проведению практических занятий
для студентов направления бакалавриата 280700 – Техносферная
безопасность

Белгород
2013

УДК 662(07)

ББК 24.54я7

Т11

Составители: д-р техн. наук, проф. А. Н. Лопанов
канд. техн. наук, доц. Е. А. Фанина
инженер И. В. Прушковский

Рецензент: канд. хим. наук, проф. Г. И. Тарасова

Т11 **Теория** горения и взрыва: методические указания к проведению практических занятий / сост.: А. Н. Лопанов, Е. А. Фанина, И. В. Прушковский – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 96 с.

Методические указания к проведению практических занятий по дисциплине «Теория горения и взрыва» составлены в соответствии с государственным образовательным стандартом и предназначены для студентов направления бакалавриата 280700 – Техносферная безопасность.

Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК 662(07)
ББК 24.54я7

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2013

Оглавление

1. Расчеты параметров процессов горения.....	4
1.1. Расход воздуха, необходимого для горения веществ.....	4
1.2. Расчет объема и состава продуктов горения.....	15
1.3. Расчет низшей теплоты сгорания веществ и интенсивности тепловыделения.....	26
1.4. Уравнение теплового баланса. Расчет температуры продуктов горения и взрыва.....	30
2. Концентрационные пределы распространения пламени.....	40
3. Температурные показатели пожарной опасности.....	52
3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения).....	52
3.2. Расчет температур вспышки и воспламенения.....	55
3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения.....	60
4. Энергия и мощность взрыва. Тротиловый эквивалент.....	65
4.1. Расчет максимального давления взрыва.....	65
4.2. Расчет тротилового эквивалента взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн.....	67
4.3. Определение взрывоопасности смеси горючих газов.....	71
Приложение.....	80
Библиографический список.....	95

1. РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Основой теоретической базы для расчетов параметров процессов горения являются фундаментальные законы сохранения вещества и энергии.

1.1. Расход воздуха, необходимого для горения веществ

В качестве окислителя в процессах горения обычно используют атмосферный воздух, в некоторых промышленных установках – воздух, обогащенный кислородом или забалластированный инертными примесями. Состав сухого воздуха, без учета незначительных количеств двуокси углерода CO_2 и редких газов, принимается следующим (в процентах):

	по объему	по весу
Кислород	21,0	23,2
Азот	79,0	76,8

Таким образом, объемное соотношение азота и кислорода в воздухе составит:

$$\frac{\varphi_{\text{N}_2}}{\varphi_{\text{O}_2}} = \frac{79}{21} = 3,76, \quad (1.1)$$

где φ_{N_2} , φ_{O_2} – соответственно объемное, % (об.), содержание азота и кислорода в окислительной среде.

Следовательно, на 1 м^3 (кмоль) кислорода в воздухе приходится $3,76\text{ м}^3$ азота. Массовое соотношение азота и кислорода в воздухе составляет $23,3\% \text{ O}_2$ и $76,7\% \text{ N}_2$. Его можно определить, исходя из выражения:

$$\frac{\varphi_{\text{N}_2} M_{\text{N}_2}}{\varphi_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3,29, \quad (1.2)$$

где M_{N_2} , M_{O_2} – молекулярные массы соответственно азота и кисло-

рода.

Горючие вещества разделяют на три типа (табл. 1.1): индивидуальные химические соединения (метан, уксусная кислота и т. п.), вещества сложного состава (древесина, торф, сланцы, нефть и т. п.) и смесь газов (генераторный газ и т. д.).

Таблица 1.1

Типы горючих веществ и формулы для расчета объема воздуха при их горении

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_r} \quad (1.3 \text{ а})$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$
	$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \cdot V_0}{n_r M_r} \quad (1.3 \text{ б})$	$\frac{\text{м}^3}{\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}}$
Вещество сложного состава	$V_B^0 = 0,269 \cdot \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) \quad (1.4)$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$
Смесь газов	$V_B^0 = \frac{\sum \varphi_i n_{O_{2i}} - \varphi_{O_2}}{21} \quad (1.5)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

Примечание. Здесь V_B^0 – теоретическое количество воздуха; n_r, n_{O_2}, n_{N_2} – количество горючего, кислорода и азота, получаемого из уравнения химической реакции горения, кмоль; M_r – молекулярная масса горючего; V_0 – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях ($22,4 \text{ м}^3$); C, H, S, O – массовое содержание соответствующих элементов в составе горючего, %; φ_{r_i} – 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 объема воздуха при горении в условиях, отличных от нормальных, пользуются уравнением состояния идеальных газов

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (1.6)$$

где P_0 – нормальное давление, Па; T_0 – нормальная температура, К;

V_0 – объем воздуха при нормальных условиях; $P_1 V_1 T_1$ – соответственно

давление, объем и температура воздуха, характеризующие заданные условия горения.

Практическое количество воздуха V_B – объем воздуха, фактически поступивший в зону горения. Отношение практического объема воздуха к теоретическому называется *коэффициентом избытка воздуха* α

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^0} \quad (1.7)$$

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется *избытком воздуха* ΔV_B :

$$\Delta V_B = V_B - V_B^0 \quad (1.8)$$

Из уравнений (1.7) и (1.8) следует, что

$$\Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1) \quad (1.9)$$

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

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{п.г}^0}{V_B^0 (21 - \varphi_{O_2})} \quad (1.10)$$

где φ_{O_2} – концентрация кислорода в продуктах горения, % (об.); $V_{п.г}^0$ – теоретический объем продуктов горения.

Для веществ, у которых объем продуктов горения равен объему израсходованного воздуха (например, углерод), формула (1.10) упрощается:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}} \quad (1.11)$$

В случае образования продуктов неполного сгорания (CO, H₂, CH₄ и др.) формула (1.11) приобретает вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2} + 0,5\varphi_{CO} + 0,5\varphi_{H_2} + 2\varphi_{CH_4}} \quad (1.11 \text{ a})$$

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

Если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе, то формулу (1.10) можно записать в виде:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{п.г}^0}{V_B^0 (\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2})} \quad (1.12)$$

и соответственно формулу (1.11)

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2}^0}{\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2}} \quad (1.13)$$

где $\varphi_{O_2}^0$ – исходное содержание кислорода в окислительной среде, % (об.); $V_{п.г}^0$ – объем окислительной среды.

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

$$m_B = V_B \rho_B \quad (1.14)$$

где ρ_B – плотность воздуха, $кг/м^3$.

Тогда

$$\rho_B = \frac{\varphi_{N_2} M_{N_2} + \varphi_{O_2} M_{O_2}}{V_0} \cdot \frac{PT_0}{PT_t} \quad (1.15)$$

После подстановки постоянных значений в формулу (1.15) получим

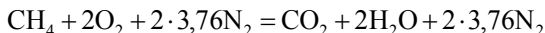
$$\rho_B = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} \quad (1.16)$$

где P – атмосферное давление, Па; T – температура воздуха, К.

Задача 1.1. Определить теоретические массу и объем воздуха, не-

обходимого для горения 1 м³ метана при нормальных условиях.

Решение. Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчета объема воздуха надо пользоваться формулой (1.3 а). Запишем уравнение химической реакции горения в воздухе



Из уравнения находим $n_{\text{O}_2} = 2$; $n_{\text{N}_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,52$; $n_{\text{CH}_4} = 1$, тогда

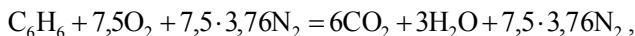
$$V_B^0 = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \text{ или кмоль} / \text{кмоль}$$

По формуле (1.14) с учетом уравнения (1.15) рассчитываем массу воздуха

$$m_B = 9,52 \frac{0,79 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32}{22,4} = 9,52 \cdot 1,28 = 12,2 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Задача 1.2. Определить теоретический объем воздуха, необходимого для горения 1 кг бензола.

Решение. Горючее – индивидуальное химическое соединение, поэтому для расчета по формуле (1.3 б) запишем уравнение химической реакции горения



найдем $n = 1$; $n_{\text{O}_2} = 7,5$; $n_{\text{N}_2} = 7,5 \cdot 3,76 = 28,2$.

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

Объем 1 кмоль газа при нормальных условиях составляет 22,4 м³:

$$V_B^0 = \frac{(7,5 + 28,2) 22,4}{1 \cdot 78} = 10,3 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Задача 1.3. Определить объем 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 99 500 Па.

Решение. Так как горючее вещество сложного состава, то теорети-

ческое количество воздуха при нормальных условиях определим по формуле (1.4):

$$V_B^0 = 0,269 \left(\frac{60}{3} + 5 + \frac{25}{8} \right) = 5,9 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Из формулы (1.7) рассчитаем практическое количество воздуха при нормальных условиях

$$V_B = \alpha V_B^0 = 2,5 \cdot 5,9 = 14,75 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

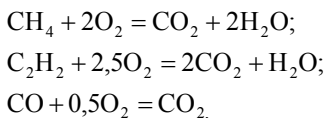
Находим количество воздуха, пошедшего на горение вещества при заданных условиях горения. Используя формулу (1.6), получим

$$V_{B(PT)} = \frac{14,75 \cdot 101325 \cdot 305}{99500 \cdot 273} = 16,8 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

$$m_{B(PT)} = V_B \rho_B = 16,8 \cdot 1,28 \cdot \frac{99500 \cdot 273}{305 \cdot 101325} = 18,9 \text{ кг} / \text{кг}.$$

Задача 1.4. Определить объем воздуха, необходимого для горения 5 м^3 смеси газов, состоящих из 20 %; 40 % C_2H_2 ; 10 % CO ; 5 % N_2 и 25 % O_2 , если коэффициент избытка воздуха равен 1,8.

Решение. Горючее – смесь газов, поэтому для расчета объема воздуха, пошедшего на горение, воспользуемся формулой (1.5). Для определения стехиометрических коэффициентов при кислороде запишем уравнение реакций горения горючих компонентов в кислороде:

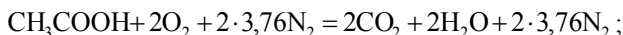


$$\text{Тогда } V_B^0 = \frac{2 \cdot 20 + 2,5 \cdot 40 + 0,5 \cdot 10 - 25}{21} = 5,7 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Для горения 5 м^3 газовой смеси необходимый теоретический объем воздуха составит $V_B^0 = 5 \cdot 5,7 = 28,5 \text{ м}^3$. Практическое количество воздуха: $V_B^0 = 1,8 \cdot 28,5 \text{ м}^3$.

Задача 1.5. 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 (1.7) необходимо рассчитать его теоретическое количество. Молекулярная масса уксусной кислоты 60.



$$V_B^0 = \frac{(2 + 2 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 60} = 3,6 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

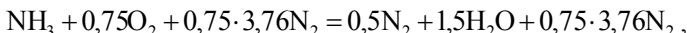
Тогда коэффициент избытка воздуха по формуле (1.7) равен

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

Горение протекало при недостатке воздуха.

Задача 1.6. Определить объем 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 по формуле (1.10) необходимо рассчитать теоретическое количество продуктов горения 1 м³ аммиака, (1.14):

$$V_{\text{п.г}}^0 = \frac{1,5 + 0,5 + 0,75 \cdot 3,76}{1} = 4,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3 .$$

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = 1 + \frac{18 \cdot 4,8}{3,6(21 - 18)} = 9.$$

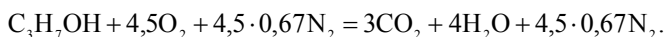
Объем воздуха, участвующего в процессе горения 1 м³ аммиака, определим по формуле (1.7)

$$V_B = 9 \cdot 3,6 = 32,4 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Задача 1.7. Определить объем окислительной среды, состоящей из 60 % O₂ и 40 % N₂, необходимый для горения 1 кг изопропилового спирта, если ее температура равна 295 К, давление 62,0 кПа.

Решение. Так как окислительная среда отличается по составу от воздуха, определим по формуле (1.1) объемное соотношение кислорода и азота 40 : 60 = 0,67.

Уравнение реакции горения изопропилового спирта



Теоретический объем окислительной среды при нормальных условиях рассчитаем по формуле (1.3 б). Молекулярная масса горючего равна 60:

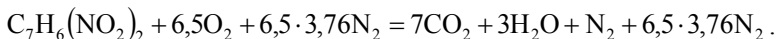
$$V_{o.c}^0 = \frac{(4,5 + 4,5 \cdot 0,67) 22,4}{1 \cdot 60} = 2,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем окислительной среды при заданных условиях горения определим из формулы (1.6)

$$V_{o.c}^0 = \frac{2,8 \cdot 295 \cdot 101,325}{62,0 \cdot 273} = 4,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Задача 1.8. Определить массу динитротолуола C₇H₆(NO₂)₂, сгоревшего в герметичном объеме 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 (1.10).



Молекулярная масса горючего 182. Теоретический объем 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 объем продуктов горения (формула (1.14)):

$$V_{п.г}^0 = \frac{(7 + 3 + 1 + 6,5 \cdot 3,76) 22,4}{1 \cdot 182} = 4,4 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\alpha = 1 + \frac{12 \cdot 4,4}{3,8(21 - 12)} = 2,55.$$

Практический объем воздуха, пошедшего на горение

$$V_B = 2,55 \cdot 3,8 = 9,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тогда массу сгоревшего динитротолуола m , определим из соотношения

$$m_r = \frac{V_{п.г}}{V_B} = \frac{100}{9,7} = 10,3 \text{ кг}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить массу и объем (теоретический) воздуха, необходимого для горения 1 кг метилового, этилового, пропилового и амилового спиртов. Построить график зависимости объема воздуха от молекулярной массы спирта.

2. Определить теоретический объем воздуха, необходимого для горения 1 м³ метана, этана, пропана, бутана и пентана. Построить график зависимости объема воздуха от положения вещества в гомологическом ряду (содержания углерода в молекуле вещества).

3. Определить теоретическую массу воздуха, пошедшего на горение 1 кг метана, метилового спирта, муравьиного альдегида, муравьиной кислоты. Объяснить причину влияния состава вещества на объем воздуха, требуемого для их горения.

4. Определить объем и массу воздуха, пошедшего на горение 1 кг древесины, состава: С – 47 %, Н – 8 %, О – 40 %, W – 5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,8; давление 100000 Па, температура 285 К.

5. Сколько воздуха, кг, поступило на горение 1 кг углерода, если в продуктах горения содержание кислорода составило 17 %?

6. Сколько воздуха, кг, требуется подать на сжигание 200 м³ генераторного газа состава: CO – 29 %, H₂ – 14 %, CH₄ – 3 %, CO₂ – 6,5 %, N₂ – 45 %, O₂ – 2,5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,5?

7. Определить количество сгоревшего толуола, кг, в помещении объемом 400 м³, если после пожара при отсутствии газообмена установлено, что содержание кислорода снизилось до 17 %.

8. Сколько хлора, м³, поступило на горение 300 м³ водорода, если в продуктах горения избыток окислителя составил 80 м³?

9. Определить избыток воздуха в продуктах горения газовой смеси состава: CO – 15 %, C₄H₁₀ – 45 %, O₂ – 30 %, N₂ – 10 %, если коэффициент избытка воздуха равен 1,9.

10. Сколько окислительной среды, м³, состоящей из 50 % кислорода и 50 % азота, необходимо для горения 8 кг этилацетата, если коэффициент избытка равен 1,2; температура 265 К, давление 10⁵ Па.

11. Определить коэффициент избытка окислительной среды, состоящей из 70 % кислорода и 30 % азота, если при горении серы содержание кислорода снизилось до 55 %. Определить количество сгоревшей серы, если объем помещения равен 180 м³.

12. Сколько антрацита (принять, что содержание углерода равно 100 %) сгорело в помещении объемом 150 м³, если горение прекратилось при снижении кислорода до 13 %. Газообмен не учитывать.

13. Рассчитать объем и массу окислительной среды, необходимые для горения *i*-го горючего вещества. Данные для расчета представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Данные для расчета объема и массы окислительной среды, необходимые для горения 1-го горючего вещества

№ п/п	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	2	3	4	5	6
1	Метиловый спирт	CH ₃ OH	2 кг	Воздух	T = 300 К P = 101325 Па α = 3
2	Анилин	C ₆ H ₇ N	5 кг	O ₂ – 70 % N ₂ – 30 %	T = 290 К P = 90000 Па α = 2,5

Продолжение табл. 1.2

1	2	3	4	5	6
3	Смесь газов	CO – 45 % N ₂ – 15 % C ₄ H ₈ – 10 % O ₂ – 30 %	3 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,8$
4	Нитробензол	C ₆ H ₅ NO ₂	30 кг	Воздух	T = 280 К P = 98000 Па $\alpha = 2,5$
5	Сложное вещество	C – 65 % O – 20 % H – 5 % S – 10 %	200 г	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,4$
6	Этилен	C ₂ H ₄	5 м ³	O ₂ – 25 % N ₂ – 75 %	Нормальные $\alpha = 2,5$
7	Сера	S	2 кг	O ₂ – 60 % N ₂ – 40 %	T = 350 К P = 120000 Па $\alpha = 1,8$
8	Сложное вещество	C – 90 % H – 3 % N – 5 % O – 2 %	1 кг	Воздух	T = 300 К P = 95000 Па $\alpha = 1,5$
9	Смесь газов	CH ₄ – 15 % C ₃ H ₈ – 70 % O ₂ – 10 % H ₂ – 5 %	5 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,9$
10	Алюминий	Al	15 кг	O ₂ – 42 % N ₂ – 58 %	Нормальные $\alpha = 2,8$
11	Сплав	Mg – 20 % Al – 80 %	8 кг	Воздух	T = 265 К P = 92000 Па $\alpha = 1,5$
12	Муравьиная кислота	CH ₂ O ₂	5 кг	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,2$
13	Диметиловый эфир	(CH ₃) ₂ O	10 кг	Воздух	T = 282 К P = 101600 Па $\alpha = 4,2$
14	Смесь газов	H ₂ S – 25 % SO ₂ – 15 % CO ₂ – 15 % H ₂ – 30 % O ₂ – 15 %	15 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,4$
15	Сложное вещество	C – 82 % H – 8 % W – 10 %	0,7 кг	Воздух	T = 260 К P = 110000 Па $\alpha = 1,4$
16	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	1 кг	Воздух	T = 305 К P = 101300 Па $\alpha = 1,9$
17	Ацетилен	C ₂ H ₂	150 л	Cl ₂ – 18 % N ₂ – 82 %	Нормальные $\alpha = 1,8$
20	Метилэтил кетон	C ₄ H ₈ O	5 кг	Воздух	Нормальные $\alpha = 2,5$

Окончание табл. 1.2

1	2	3	4	5	6
18	Смесь газов	CH ₄ – 30 %; O ₂ – 8 %; N ₂ – 15 %; H ₂ – 47 %	3 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 3,2$
19	Этиловый эфируксусной кислоты	C ₄ H ₈ O ₂	5 кг	Воздух	T = 270 К P = 85000 Па $\alpha = 1,5$
21	Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	7 кг	Воздух	T = 305 К P = 1000 Па $\alpha = 2,8$
22	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	1 кг	O ₂ – 25 % N ₂ – 75 %	T = 280 К P = 98000 Па $\alpha = 1,4$
23	Смесь газов	NH ₃ – 25 % C ₄ H ₁₀ – 25 % C ₄ H ₈ – 15 % CO ₂ – 30 % O ₂ – 5 %	200 л	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,8$
24	Бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	4 кг	Воздух	T=265 К P=120000 Па $\alpha = 1,8$
25	Дибромгексан	C ₆ H ₁₂ Br ₂	3кг	O ₂ – 65 % N ₂ – 35 %	T = 280 К P = 98000 Па $\alpha = 1,7$
26	Сложное вещество	C – 70 %; S – 5 %; H – 5 % O – 20 %	15кг	Воздух	T = 285 К P = 100000 Па $\alpha = 2,8$
27	Смесь газов	C ₃ H ₈ – 10 % CO – 79 % H ₂ – 5 % O ₂ – 5 % N ₂ – 10 %	10 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 3,5$

1.2. Расчет объема и состава продуктов горения

В целях упрощения расчета все горючие вещества разделены на три типа: индивидуальные, сложные, смеси горючих газов, табл. 1.3.

Практический (полный) объем продуктов горения состоит из теоретического объема продуктов горения и избытка воздуха

$$V_{п.г} = V_{п.г}^0 + \Delta V_B \quad (1.24)$$

$$\text{или } V_{п.г} = V_{п.г}^0 + V_B^0 (\alpha - 1) \quad (1.25)$$

Таблица 1.3

**Расчетные формулы для определения объема
продуктов горения**

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное	$V_{п.г} = \frac{\sum n_{п.г}}{n_r} \quad (1.17)$ $V_{п.г}^0 = \frac{V_0 \sum n_{п.г_i}}{n_r M} \quad (1.18)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещество сложного состава	$V_{co_2} = 1,86 \frac{c}{100} \quad (1.19)$ $V_{h_2o} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} \quad (1.20)$ $V_{so_2} = 0,7 \frac{S}{100} \quad (1.21)$ $V_{n_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] \quad (1.22)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}$
Смесь газов	$V_{п.г}^0 = \sum V_{п.г_i} \quad (1.23)$ $V_{п.г_i} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{п.г_i} \varphi_{г_i}}{n_r} + \sum \varphi_{н.г_i} \right]$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

Примечание. Здесь $V_{п.г}^0$ – теоретический объем продуктов горения; $n_{п.г_i}$ – количество i -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль; n_r – количество горючего, кмоль; V_0 – объем одного кмоль газа; M – молекулярная масса горючего; $V_{п.г_i}$ – объем i -го продукта реакции; C, H, S, O, N, W – содержание соответствующих элементов (углерода, водорода, серы, кислорода, азота) и влаги в горючем веществе, % (вес); $\varphi_{г_i}$ – содержание горючего компонента в газовой смеси, % (об.); $\varphi_{н.г_i}$ – содержание негорючего компонента в составе газовой смеси, % (об.).

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

$$\varphi_{п.г_i} = \frac{V_{п.г_i}}{\sum V_{п.г_i}} \cdot 100, \quad (1.26)$$

где $\varphi_{п.г.i}$ – содержание i -го компонента в продуктах горения, об. %; $V_{п.г.i}$ – объем i -го компонента, м³, кмоль; $\sum V_{п.г.i}$ – полный объем продуктов горения, м³, кмоль.

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

$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_B \quad (1.27)$$

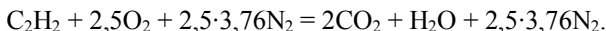
$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79\Delta V_B \quad (1.28)$$

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

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_B^0 \quad (1.29)$$

Задача 1.9. Какое количество продуктов горения выделится при сгорании 1 м³ ацетилена в воздухе, если температура горения составила 1450 К.

Решение. Горючее – индивидуальное химическое соединение (формула (1.17)). Запишем уравнение химической реакции горения



Объем продуктов горения при нормальных условиях

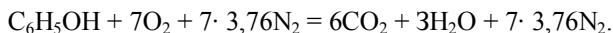
$$V_{п.г}^0 = \frac{2+1+2,5 \cdot 3,76}{1} = 12,4 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Объем продуктов горения при 1450 К

$$V_{п.г.(PT)}^0 = \frac{12,4 \cdot 1450}{273} = 65,9 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Задача 1.10. Определить объем продуктов горения при сгорании 1 кг фенола, если температура горения 1200 К, давление 95 000 Па, коэффициент избытка воздуха 1,5.

Решение. Горючее – индивидуальное химическое соединение (формула (1.18)). Запишем уравнение химической реакции горения



Молекулярная масса горючего 98.

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{п.г}^0 = \frac{(6+3+7 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 98} = 8,1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем воздуха при нормальных условиях (1.25)

$$V_{п.г}^0 = 8,1 + \frac{(7+7 \cdot 3,76) \cdot (1,5-1)}{1 \cdot 98} 22,4 = 11,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем продуктов горения при заданных условиях

$$V_{п.г(р.т)}^0 = \frac{11,9 \cdot 101325 \cdot 1200}{95000 \cdot 273} = 55,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Задача 1.11. Определить объем продуктов горения при сгорании 1 кг органической массы состава: С – 55 %, О – 13 %, Н – 5 %, S – 7 %, N – 3 %, W – 17 %, если температура горения 1170 К, коэффициент избытка воздуха – 1,3.

Решение. Горючее вещество сложного состава (формулы (1.19) – (1.22)). Теоретический состав продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{55}{100} = 1,0 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{5}{100} + 1,24 \frac{17}{100} = 0,6 + 0,2 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{7}{100} = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[7 \cdot 55 + 21 \left(5 - \frac{17}{8} \right) + 2,63 \cdot 7 + 0,8 \cdot 3 \right] = 4,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Полный теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{п.г}^0 = 1 + 0,8 + 0,05 + 4,7 = 6,55 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях:

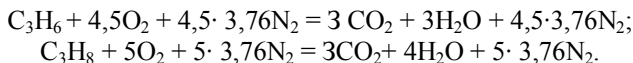
$$V_{п.г} = 6,55 + 0,269 \cdot \left(\frac{55}{3} + 5 + \frac{7-13}{8} \right) \cdot (1,3 - 1) = 6,55 + 1,8 = 8,35 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем продуктов горения при температуре горения:

$$V_{п.г(pm)} = \frac{8,35 \cdot 1170}{273} = 35,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Задача 1.12. Рассчитать объем продуктов горения при сгорании 1 м^3 газовой смеси, состоящей из C_3H_6 – 70 %, C_3H_8 – 10 %, CO_2 – 5 %, O_2 – 15 %, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха 2,8. Температура окружающей среды 298 К.

Решение. Горючее – смесь газов (формула (1.23)):



Объем продуктов горения определим по формуле (1.23):

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= \frac{1}{100} (3 \cdot 70 + 3 \cdot 10 + 5) = 2,45 \text{ м}^3/\text{м}^3; \\ V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{1}{100} (3 \cdot 70 + 4 \cdot 10) = 2,4 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Так как газовая смесь содержит в составе кислород, он будет окислять часть горючих компонентов, следовательно, понизится расход воздуха (формула (1.5)).

В этом случае теоретический объем азота удобнее определять по формуле (1.29):

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \frac{4,5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} = 13,2 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем продуктов горения

$$V_{п.г}^0 = 2,45 + 2,4 + 13,2 = 18,05 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Практический объем продуктов горения (формулы (1.24), (1.25))

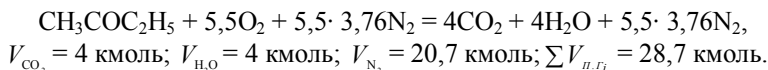
$$V_{п.г} = 18,05 + \frac{4,5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} \cdot (2,8 - 1) = 42,05 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов горения при температуре 1300 К

$$V_{п.г(pm)} = \frac{42,05 \cdot 1300}{298} = 183,4 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Задача 1.13. Определить состав продуктов горения метилэтилкетона.

Решение. При такой постановке задачи рациональнее определять непосредственно из уравнения горения объем продуктов в кмоль, выделившихся при сгорании 1 кмоль горючего:



По формуле (1.26) находим состав продуктов горения

$$\phi_{\text{H}_2\text{O}} = \phi_{\text{CO}_2} = \frac{4 \cdot 100}{28,7} = 14 \%, \phi_{\text{N}_2} = 100 - (14 + 14) = 72\%.$$

Задача 1.14. Определить объем и состав, % (об.), продуктов горения 1 кг минерального масла состава: С – 85 %, Н – 15 %, если температура горения 1450 К, коэффициент избытка воздуха 1,9.

Решение. По формулам (1.19) – (1.22) определим объем продуктов горения:

$$V_{\text{N}_2} = 1,86 \frac{85}{100} = 1,6 \text{ м}^3/\text{кг}; V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{15}{100} = 1,7 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} (7 \cdot 85 + 21 \cdot 15) = 9,1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{п.г}^0 = 1,6 + 1,7 + 9,1 = 12,4 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях (формула (1.25))

$$V_{п.г} = 12,4 + 0,269 \cdot \left(\frac{85}{3} + 15\right) \cdot (1,9 - 1) = 12,4 + 10,5 = 22,9 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем продуктов горения при температуре 1450 К

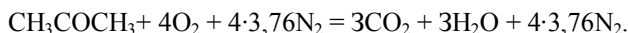
$$V_{п.г(рм)} = \frac{22,9 \cdot 1450}{273} = 121,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Состав продуктов горения не зависит от температуры горения, поэтому целесообразно определять его при нормальных условиях. По формулам (1.26), (1.28):

$$\begin{aligned} \phi_{\text{CO}_2} &= \frac{1,6 \cdot 100}{22,9} = 7,1\%; & \phi_{\text{O}_2} &= \frac{0,21 \cdot 10,5 \cdot 100}{22,9} = 9,4\%; \\ \phi_{\text{N}_2} &= \frac{(9,1 + 0,79 \cdot 10,5)100}{22,9} = 76,2\%; & \phi_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{1,7 \cdot 100}{22,9} = 7,3\%. \end{aligned}$$

Задача 1.15. Определить количество сгоревшего ацетона, кг, если объем выделившейся двуокиси углерода, приведенный к нормальным условиям, составил 50 м³.

Решение. Запишем уравнение реакции горения ацетона в воздухе



Из уравнения следует, что при горении из 58 кг (молекулярная масса ацетона) выделяется 3 · 22,4 м³ двуокиси углерода. Тогда для образования 50 м³ двуокиси углерода должно вступить в реакцию m_r горючего:

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

Задача 1.16. Определить количество сгоревшей органической массы состава: С – 58 %, О – 22 %, Н – 8 %, N – 2 %, W – 10 % в помещении объемом 350 м³, если содержание двуокиси углерода составило 5 %.

Решение. Определим объем выделившейся двуокиси углерода

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

По формуле (1.19) для вещества сложного состава определим объем CO_2 , выделяющийся при горении 1 кг горючего:

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

Определим количество сгоревшего вещества

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

Задача 1.17. Определить время, когда содержание двуокиси углерода в помещении объемом 480 м^3 в результате горения древесины (С – 45 %, Н – 50 %, О – 42 %, W – 8 %) составило 8 %, если удельная массовая скорость выгорания древесины $0,008 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а поверхность горения 38 м^2 . При решении газообмен с окружающей средой не учитывать, разбавлением в результате выделения продуктов горения пренебречь.

Решение. Поскольку не учитывается разбавление продуктами горения, определяем объем выделявшейся в результате горения двуокиси углерода, соответствующий 8 % ее содержания в атмосфере:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{8 \cdot 480}{100} = 38,4 \text{ м}^3;$$

из выражения (1.19) определим, сколько должно сгореть горючего материала, чтобы выделился данный объем двуокиси углерода:

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

Время горения определим, исходя из соотношения

$$\tau = \frac{m_r}{U_m F},$$

где τ – время горения; m_r – масса выгоревшей древесины, кг; U_m – массовая скорость выгорания древесины, кг/(м² · с); F – поверхность горения, м²;

$$\tau = \frac{46}{0,008 \cdot 38} = 151 \text{ с} = 2,5 \text{ мин.}$$

Задачи для самостоятельного решения

14. Определить объем и состав, % (об.), продуктов горения 1 м³ этилена, пропилена, бутилена, если температура горения 1800 К, давление 98000 Па. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания отдельных компонентов от молекулярной массы горючего.

15. Определить объем продуктов горения и содержание паров воды и кислорода при горении 1 кг гексана, гептана, октана, декана, если температура горения 1300 К, давление 101325 Па, коэффициент избытка воздуха при горении 1,8. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания кислорода от молекулярной массы горючего.

16. Определить объем и состав продуктов горения 10 кг древесины состава С – 49 %, Н – 6 %, О – 44 %, N – 1 %, если температура горения 1250 К, коэффициент избытка воздуха 1,6.

17. Сколько продуктов горения, приведенных к нормальным условиям, образуется в результате сгорания 25 м³ газовой смеси состава Н₂ – 45 %, С₄Н₁₀ – 20 %, СО – 5 %, NH₃ – 15 %, О₂ – 15 %, если горение протекало при коэффициенте избытка воздуха, равном 3,2?

18. Определить, сколько сырой нефти состава: С – 85 %, Н – 10 %, S – 5 % выгорело в объеме 2500 м³, если содержание сернистого газа составило 2,5 м³. Рассчитать при каком содержании кислорода наступило прекращение горения.

19. Через какое время содержание СО₂ в помещении объемом 300 м³ в результате горения гексанола с поверхности 8 м² составит 7 %? Массовая скорость выгорания гексана 0,06 кг/(м² · с).

20. Определить содержание SO₂, % (об.), в помещении объемом 1200 м³ при горении нефти состава: С – 82 %, Н – 8 %, S – 10 % со скоростью выгорания 0,4 кг/(м² · с) с площади 5 м² на 4-й минуте пожара.

21. Определить объем выделившихся на 5-й минуте после воспламенения продуктов горения газовой смеси состава: С₂Н₂ – 30 %, Н₂ –

22 %, O_2 – 15 %, H_2S – 18 %, CO_2 – 15 %, и содержание двуокиси углерода, если коэффициент избытка воздуха – 1,5, температура горения 1300 К. Расход газа m^3/c , температура газа 295 К.

22. Рассчитать объем образующихся продуктов, m^3 , и содержание в них азота, % (об.), при горении i -го вещества. Данные для расчета приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

**Данные для расчета объема образующихся продуктов
и содержание в них азота при горении вещества**

№ п/п	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окис- лительной среды	Условия горе- ния
1	2	3	4	5	6
1	Диэтиловый спирт	$(C_2H_5)_2O$	1 кг	Воздух	$T_r = 1500$ К $P = 101400$ Па $\alpha = 2,5$
2	Уксусная кисло- та	$C_2H_4O_2$	5 кг	Воздух	$T_r = 1200$ К $P = 98000$ Па $\alpha = 2,6$
3	Сплав	Mg – 20 % Al – 80 %	1 кг	Воздух	$T_r = 2800$ К $P = 95000$ Па $\alpha = 1,6$
4	Смесь газов	CH_4 – 20 % C_3H_8 – 65 % O_2 – 15 %	1 m^3	Воздух	$T_r = 1480$ К $P = 101300$ Па $\alpha = 2,4$
5	Октиловый спирт	$C_8H_{18}O$	10 кг	Воздух	$T_r = 1320$ К $P = 102000$ Па $\alpha = 2,5$
6	Сложное вещество	C – 90 % H – 5 % O – 5 %	1 кг	Воздух	$T_r = 1320$ К $P = 97000$ Па $\alpha = 1,6$
7	Смесь газов	NH_3 – 10 % C_4H_{10} – 80 % N_2 – 7 % O_2 – 3 %	1 m^3	Воздух	$T_r = 1600$ К $P = 101300$ Па $\alpha = 1,2$
8	Анилин	C_6H_7N	1 кг	Воздух	$T_r = 1550$ К $P = 94000$ Па $\alpha = 1,7$

Окончание табл. 1.4

1	2	3	4	5	6
9	Диэтиловый эфир	$(C_2H_5)_2O$	25 кг	Воздух	$T_r = 1600 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,4$
10	Смесь газов	$CO - 70 \%$ $C_3H_8 - 25 \%$ $O_2 - 5 \%$	1 м^3	$O_2 - 42 \%$ $N_2 - 58 \%$	$T_r = 1400 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
11	Сложное вещество	$C - 70 \%$ $H - 6 \%$ $O - 14 \%$ $W - 10 \%$	1 кг	Воздух	$T_r = 1300 \text{ К}$ $P = 97000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,3$
12	Смесь газов	$CH_4 - 60 \%$ $CO_2 - 30 \%$ $H_2 - 10 \%$	1 м^3	Воздух	$T_r = 1500 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,2$
13	Диметиловый эфир	$(CH_3)_2O$	10 кг	$O_2 - 30 \%$ $N_2 - 70 \%$	$T_r = 1800 \text{ К}$ $P = 87000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,8$
14	Глицерин	$C_3H_8O_3$	1 кг	$O_2 - 27 \%$ $N_2 - 73 \%$	$T_r = 1600 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,1$
15	Сложное вещество	$C - 80 \%$ $H - 12 \%$ $O - 8 \%$	1 кг	Воздух	$T_r = 1350 \text{ К}$ $P = 99000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,8$
16	Смесь газов	$C_2H_6 - 60 \%$ $C_3H_8 - 30 \%$ $H_2 - 5 \%$ $O_2 - 5 \%$	1 м^3	Воздух	$T_r = 165 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
17	Метилэтил кетон	C_4H_8O	1 кг	Воздух	$T_r = 1480 \text{ К}$ $P = 91000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
18	Сложное вещество	$C - 60 \%$ $H - 7 \%$ $O - 21 \%$ $W - 12 \%$	4 кг	Воздух	$T_r = 1210 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,4$
19	Нитроглицерин	$C_7H_7NO_2$	2 кг	Воздух	$T_r = 1340 \text{ К}$ $P = 100000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
20	Смесь газов	$NH_3 - 40 \%$ $C_3H_8 - 40 \%$ $H_2 - 10 \%$ $O_2 - 10 \%$	1 м^3	Воздух	$T_r = 1800 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
21	Дибромгексан	$C_6H_{12}Br_2$	1 кг	$O_2 - 50 \%$ $N_2 - 50 \%$	$T_r = 1400 \text{ К}$ $P = 92000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,3$
22	Динитробензол	$C_6H_4(NO_2)_2$	1 кг	Воздух	$T_r = 1650 \text{ К}$ $P = 81000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,1$

1.3. Расчет низшей теплоты сгорания веществ и интенсивности тепловыделения

При расчетах теплового баланса на пожаре определяют, как правило, низшую теплоту сгорания, табл. 1.5. Количество тепла, выделяющегося при сгорании единицы массы (объема) горючего при газообразном состоянии воды

$$Q_a - Q_n = Q_{ис},$$

где Q_a – высшая теплота сгорания; Q_n – низшая теплота сгорания; $Q_{ис}$ – теплота испарения воды, образующейся при сгорании вещества.

Таблица 1.5

Расчетные формулы для определения низшей теплоты сгорания веществ

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальные вещества	$Q_n = \sum (n_i \Delta H_i - n_j \Delta H_j)$ (1.30)	кДж/моль
Вещества сложного состава	$Q_n = 339,4C + 1257H - 108,9(O-S) - 25,1(9H+W)$ (1.31)	кДж/кг
Смесь газов	$Q_n = \frac{1}{100} \sum Q_{ni} \varphi_{Г_i}$ (1.32)	кДж/моль; кДж/м³

Примечание. Здесь ΔH_i , ΔH_j – соответственно теплота образования одного кмоль i -го конечного продукта горения и j -го исходного вещества; n_i , n_j – соответственно количество кмоль i -го продукта реакции и j -го исходного вещества в уравнении реакции горения; C, H, S, W – соответственно содержание, % (масс), углерода, водорода, серы и влаги в составе вещества; O – сумма кислорода и азота, % (вес); Q_{ni} – низшая теплота сгорания i -го горючего компонента газовой смеси, кДж/кмоль; $\varphi_{Г_i}$ – содержание i -го горючего компонента в газовой смеси, % (об.)

Расчет теплоты сгорания газозводушных смесей проводят по формуле:

$$Q_n^{см} = \frac{1}{100} Q_{ni} \varphi_{Г_i} \quad (1.33)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{сн}}$ – теплота сгорания газовой смеси, кДж/м³, кДж/кмоль;
 $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³,
 кДж/кмоль; $\varphi_{\text{г}}$ – концентрация горючего в смеси с окислителем, %
 (об.).

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении равна

$$q = Q_{\text{н}} U_{\text{м}}, \quad (1.34)$$

где q – удельная интенсивность тепловыделения, кВт/м²; $U_{\text{м}}$ – массовая скорость выгорания, кг/(м²с). Скорость тепловыделения при горении (теплота пожара) равна

$$q_{\text{н}} = Q_{\text{н}} U_{\text{м}} F, \quad (1.35)$$

где $q_{\text{н}}$ – интенсивность тепловыделения, кВт; F – площадь горения, м².

Задача 1.18. Определить низшую теплоту сгорания уксусной кислоты, если теплота ее образования 485,6 кДж/моль.

Решение. Для расчета по формуле (1.30) запишем уравнение горения уксусной кислоты в кислороде

$$\begin{aligned} \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{O}_2 &= 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}; \\ Q_{\text{н}} &= (2 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 1 \cdot 485,6) = 792,6 \text{ кДж/моль} = \\ &= 792,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}. \end{aligned}$$

Для расчета количества тепла, выделяющегося при горении 1 кг горючего, необходимо полученную величину разделить на его молекулярную массу (64):

$$Q_{\text{н}} = \frac{792,6 \cdot 10^3}{60} = 13210 \text{ кДж/кг}.$$

Задача 1.19. Рассчитать низшую теплоту сгорания органической массы состава: С – 62 %, Н – 8 %, О – 28 %, S – 2 %.

Решение. $Q_{\text{н}} = 339,462 + 1257 \cdot 8 - 108,9(28 - 2) - 25,1 \cdot 9 \cdot 8 =$

= 26460 кДж/кг.

Задача 1.20. Определить низшую теплоту сгорания газовой смеси, состоящей из CH_4 – 40 %, C_4H_{10} – 20 %, O_2 – 15 %, H_2S – 5 %, NH_3 – 10 %, CO_2 – 10%.

Решение. Для каждого горючего компонента смеси по формуле (1.30) находим теплоту сгорания (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Расчет теплоты сгорания веществ

Уравнение реакции	Теплота образования горючего, 10^{-3} кДж/кмоль	Теплота сгорания, 10^{-3} кДж/кмоль
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	75	$Q_H = 1 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 75 = 806,3$
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	132,4	$Q_H = 4 \cdot 396,9 + 5 \cdot 242,2 - 132 = 2666,1$
$\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$	201,1	$Q_H = 242,2 + 297,5 - 201,1 = 338,6$
$\text{NH}_3 + 0,75\text{O}_2 = 1,5\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{N}_2$	46,1	$Q_H = 1,5 \cdot 242,2 - 46,1 = 317,2$

По формуле (1.32) определим теплоту сгорания газовой смеси

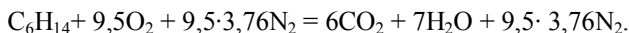
$$Q_H = \frac{1}{100} (806,3 \cdot 40 + 2666,1 \cdot 20 + 338,6 \cdot 5 + 317,2 \cdot 10) 10^3 = 1278,5 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}.$$

Для определения теплоты сгорания 1 м³ газовой смеси необходимо полученное значение разделить на объем, занимаемый 1 кмоль газа при стандартных условиях (24,4 м³):

$$Q_H = \frac{1278,5 \cdot 10^3}{24,4} = 57076 \text{ кДж/м}^3.$$

Задача 1.21. Рассчитать теплоту сгорания 1 м³ стехиометрической гексановоздушной смеси.

Решение. Находим стехиометрический состав горючей смеси по уравнению реакции горения



Весь объем вступивших в реакцию компонентов (1+9,5+ 9,5·3,76) принимаем за 100 %, а количество горючего (1 кмоль) будет соответствовать стехиометрической концентрации:

$$\phi_r = \frac{1 \cdot 100}{1 + 9,5 + 9,5 \cdot 3,76} = 2,2\%.$$

Теплоту сгорания 1 м³ гексана определим по формуле (1.30)

$$Q_{II} = 6 \cdot 396,9 + 7 \cdot 242,2 - 167,2 = 3909,6 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_H = \frac{3909,6}{24,4} 10^3 = 160,2 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3.$$

Объем одного кмоль газа при стандартных условиях равен 24,4 м³.

Теплоту сгорания 1 м³ стехиометрической гексановоздушной смеси определим по формуле (1.33):

$$Q = \frac{160,2 \cdot 10^3 \cdot 2,2}{100} = 3525 \text{ кДж/м}^3.$$

Задача 1.22. Определить интенсивность тепловыделения на пожаре органической массы (состав в примере 2), если скорость выгорания 0,015 кг/(м²·с), а площадь пожара 150 м².

Решение. Согласно формуле (1.35)

$$q_{II} = 26460 \cdot 0,015 \cdot 150 = 59,5 \cdot 10^3 \text{ кВт} = 59,5 \text{ МВт}$$

Задачи для самостоятельного решения

23. Определить низшую теплоту сгорания 1 м³ этана, пропана, бутана, пентана и гексана. Построить зависимость Q_{II} от молекулярной массы горючего. Теплота образования горючих веществ: этана – 88,4 кДж/моль, пропана – 109,4 кДж/моль, бутана – 232,4 кДж/моль, пентана – 184,4 кДж/моль, гексана – 211,2 кДж/моль.

24. Рассчитать теплоту сгорания 1 м³ ацетиленовоздушной смеси на нижнем и верхнем концентрационных пределах воспламенения, а также при стехиометрической концентрации. Концентрационные пределы воспламенения (КПВ) ацетилена равны 2,0–81,0 %.

Примечание. Построить график зависимости низшей теплоты сгорания от концентрации горючего в воздухе. При расчете теплоты сгорания смеси на ВКПВ необходимо учесть, что только часть горючего способна полностью окислиться в воздухе, остальное количество горючего не вступит в реакцию горения вследствие недостатка окислителя.

25. Определить низшую теплоту сгорания 1 кг древесины состава С – 49 %, Н – 8 %, О – 43 %. Какова удельная интенсивность тепловыделения на пожаре, если массовая скорость выгорания составляет 0,01 кг/(м² · с)?

26. Для условия предыдущей задачи определить изменение теплоты сгорания и удельной интенсивности тепловыделения при содержании влаги в древесине (сверх 100 %) в количестве 3, 5, 10 и 15 %. Скорость выгорания влажной древесины соответственно снизится до 0,009, 0,008, 0,006 и 0,005 кг/(м² · с). Построить график зависимости Q_H и q от содержания влаги в горючем материале.

Примечание. Для решения задачи необходимо пересчитать состав древесины с учетом влаги таким образом, чтобы содержание всех компонентов равнялось 100 %.

27. Определить интенсивность тепловыделения, кВт, при горении газовой смеси состава: СО – 15 %, С₄Н₈ – 40 %, О₂ – 20 %, Н₂ – 14 %, СО₂ 11 %, если скорость истечения 0,8 м³/с.

1.4. Уравнение теплового баланса. Расчет температуры продуктов горения и взрыва

Температура горения – температура продуктов горения в зоне химической реакции. Это максимальная температура зоны пламени.

Температура горения и взрыва определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_H = \sum_{i=1}^n C_{p(V)_H} V_{п.г_i} (T_r - T_o) \quad (1.36)$$

При этом адиабатическая температура горения

$$T_r^* = T_o + \frac{Q_H}{\sum C_{p(V)_H} V_{п.г_i}^o}, \quad (1.37)$$

а действительная температура горения

$$T_r = T_o + \frac{Q_{п.г}}{\sum C_{pi} V_{п.гi}}, \quad (1.38)$$

где T_r^* и T_r – соответственно адиабатическая и действительная температуры горения; T_o – начальная температура; $V_{п.гi}$ – практический объем i -го продукта горения; $V_{п.гi}^o$ – теоретический объем i -го продукта горения; $Q_{п.г}$ – низшая теплота горения вещества; $Q_{п.г}$ – теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения; C_{vi} – теплоемкость i -го продукта горения при постоянном объеме; C_{pi} – теплоемкость i -го продукта горения при постоянном давлении.

При этом

$$Q_{п.г} = Q_H (1 - \eta), \quad (1.39)$$

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

Расчет температуры горения по формуле (1.37) или (1.38) может быть проведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения, табл. 1.7.

Таблица 1.7

Определение температуры горения

№ п/п	Определяемые параметры	Примечание
1	2	3
1	Объем и состав продуктов горения	$V_{п.г}$ (п.1.2) кмоль/кмоль, м ³ /кг
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплотерь)	$Q_{п.г}$ или $Q_{п.г}$ (п.1.3) кДж/кмоль, кДж/кг
3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{cp} = \frac{Q_{п.г}}{\sum V_{п.гi}}$ (1.40)
4	Температура горения T_1 по средней энтальпии с помощью табл. 1а или 1б приложения, ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	–

1	2	3
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 1а или 1б приложения)	$\dot{Q}_{п.г} = \sum H_i V_{п.г.i} \quad (1.41)$
6	Если $\dot{Q}_{п.г} < \dot{Q}_{н(п.г)}$, то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $\dot{Q}_{п.г} > \dot{Q}_{н(п.г)}$, то $T_2 < T_1$)	H_i – энтальпия i -го продукта горения; V_i – объем i -го продукта горения
7	$\dot{Q}_{п.г}$ по формуле (1.41)	–
8	Расчет проводим до получения неравенства $\dot{Q}_{п.г} < \dot{Q}_{н(п.г)} < \dot{Q}_{п.г}$	–
9	Температура горения	$T_r = T_1 + \frac{(\dot{Q}_{н(п.г)} - \dot{Q}_{п.г})(T_2 - T_1)}{\dot{Q}_{п.г} - \dot{Q}_{п.г}}$

Температура взрыва, протекающего в изохорно-адиабатическом режиме (при постоянном объеме) рассчитывается по уравнению теплового баланса (1.36) по методике, приведенной в табл. 1.7. Отличие заключается в том, что при расчетах вместо средней энтальпии продуктов горения и их теплосодержания (п.п. 3–7) используется значение внутренней энергии газов (табл. 2 приложения). Внутренняя энергия газов

$$U = C_v T,$$

где C_v – теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(моль К), кДж/(м³К).

Действительная температура горения на пожаре для большинства газообразных, жидких и твердых веществ изменяется в достаточно узких пределах (1300–1800 К). В связи с этим расчетная оценка действительной температуры горения может быть значительно упрощена, если теплоемкость продуктов горения выбирать при температуре 1500 К

$$T_r = T_o + \frac{\dot{Q}_n}{\sum C_{p_i}^* V_{п.г.i}}, \quad (1.43)$$

где $C_{p_i}^*$ – теплоемкость i -го продукта горения при 1500 К, табл. 1.8.

Таблица 1.8

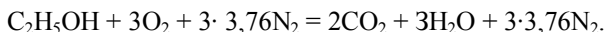
Теплоемкость некоторых продуктов горения

Вещество	Теплоемкость	
	кДж/(м ³ К)	кДж/(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

Задача 1.23. Определить адиабатическую температуру горения этилового спирта в воздухе.

Решение. Расчет проводим по схеме, приведенной в табл. 1.7.

1. Так как горючее – индивидуальное вещество, для определения объема и состава продуктов горения запишем уравнение химической реакции горения



Следовательно, продукты горения состоят из:

$$V_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль}, V_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль}, V_{\text{N}_2} = 11,28 \text{ моль}, V_{\text{п.г}} = 16,28 \text{ моль}.$$

2. Низшую теплоту сгорания определим по формуле (1.30).

Из табл. 3 приложения находим теплоту образования горючего – 278,2 кДж/моль:

$$Q_{\text{н}} = 2 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - 278,2 = 1242,2 \text{ кДж/моль}.$$

3. Средняя энтальпия продуктов горения

$$H_{\text{ср}} = \frac{1242,2}{16,28} = 76,3 \text{ кДж/моль}.$$

4. Так как величина $H_{\text{ср}}$ выражена в кДж/моль, по табл. 1 а приложения выбираем, ориентируясь на азот, первую приближенную температуру горения $T_1 = 2100^\circ\text{C}$.

5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2100 °С по формуле (1.41):

$$\dot{Q}_{п.г} = 114,7 \cdot 2 + 93,4 \cdot 3 + 70,4 \cdot 11,28 = 1303,7 \text{ кДж/моль}.$$

6. Сравниваем \dot{Q}_H и $\dot{Q}_{п.г}$ так как $\dot{Q}_{п.г} > \dot{Q}_H$, выбираем температуру горения, равную 2000 °С.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2000 °С:

$$\dot{Q}_{п.г}^* = 108,6 \cdot 2 + 88,1,6 \cdot 3 + 66,8 \cdot 11,28 = 1235 \text{ кДж/моль}.$$

8. Так как $\dot{Q}_{п.г}^* < \dot{Q}_H < \dot{Q}_{п.г}^*$, определим температуру горения по формуле (1.42):

$$T_G^0 = 2000 + \frac{(1242,2 - 1235) \cdot (2100 - 2000)}{1303,7 - 1235} = 2010 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Задача 1.24. Определить адиабатическую температуру горения органической массы, состоящей из С–60%, Н–7%, О–25%, W – 8 %.

Решение.

1. Так как горючее представляет собой сложное вещество, состав продуктов горения рассчитываем по формулам (1.19) – (1.21):

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{60}{100} = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{7}{100} + 1,24 \frac{8}{100} = 0,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} 7 \cdot 60 + 2(7 - \frac{25}{8}) = 5,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий объем продуктов горения равен $V_{п.г}^0 = 7,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$

2. Определим низшую теплоту сгорания вещества по формуле Д. И. Менделеева (1.31):

$$\dot{Q}_H = 339,4 \cdot 60 + 1157 \cdot 7 - 108,9 \cdot 25 - 25,1(9 \cdot 7 + 8) = 23958,4 \text{ кДж/кг}.$$

3. Определим среднюю энтальпию продуктов горения

$$H_{CP} = \frac{23958,4}{7,01} = 3417,7 \text{ кДж/м}^3.$$

4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м³, первую приближенную температуру выбираем по табл. 16 приложения, ориентируясь на азот. Принимаем $T_1 = 2100 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $2100 \text{ }^\circ\text{C}$ по формуле (1.41):

$$Q_{п.г} = 5118,2 \cdot 1,12 + 4166,1 \cdot 0,88 + 3142,9 \cdot 5,01 = 25144,5 \text{ кДж/кг}.$$

6. Из сравнения Q_H и $Q_{п.г}$ ($Q_H > Q_{п.г}$) выбираем вторую приближенную температуру, равную $1900 \text{ }^\circ\text{C}$.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $1900 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$Q_{п.г}^* = 4579,7 \cdot 1,12 + 3693,5 \cdot 0,88 + 2818,2 \cdot 5,1 = 22498,8 \text{ кДж/кг}.$$

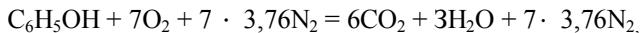
8. Так как $Q_{п.г}^* < Q_H < Q_{п.г}$ определим температуру горения:

$$T_G^0 = 1900 + \frac{(23958,4 - 22498,8) \cdot (2100 - 1900)}{25144 - 22498,8} = 2010 \text{ }^\circ\text{C}$$

Задача 1.25. Рассчитать действительную температуру горения фенола ($\Delta H_{\text{обр.}} = 4,2 \text{ кДж/моль}$), если потери тепла излучением составили 25 % от Q_H , а коэффициент избытка воздуха при горении – 2,2.

Решение.

1. Определим состав продуктов горения:



$$V_{\text{CO}_2} = 6 \text{ моль}, V_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль}, V_{\text{N}_2} = 26,32 \text{ моль},$$

$$\Delta V_B = (7 + 7 \cdot 3,76)(2,2 - 1) = 39,98 \text{ моль}, V_{п.г} = 75,3 \text{ моль}.$$

2. Определим низшую теплоту сгорания фенола (формула (1.30):

$$Q_H = 6 \cdot 3969 + 3 \cdot 242,2 - 1 \cdot 4,2 = 3102,7 \text{ кДж/моль},$$

так как по условию задачи 25 % тепла теряется, определим количество тепла, пошедшее на нагрев продуктов горения (теплосодержание продуктов горения при температуре горения) (формула (1.39)):

$$Q_{п.г} = 3102,7(1-0,25) = 2326,5 \text{ кДж/моль}.$$

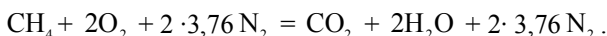
По формуле (1.43) определим действительную температуру горения

$$T_r = 273 + \frac{2326,5}{10^{-3}(50,85 \cdot 6 + 39,87 \cdot 3 + 31,81 \cdot 26,32 + 32,26 \cdot 39,97)} = 1185 \text{ К}.$$

Задача 1.26. Рассчитать температуру взрыва метановоздушной смеси стехиометрического состава.

Решение. Расчет проводим по схеме, представленной в табл. 1.7.

1. Объем и состав продуктов горения



Продукты горения:

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= 1 \text{ кмоль/кмоль}, V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ моль/моль}, \\ V_{\text{N}_2} &= 2 \cdot 3,76 = 7,5 \text{ кмоль/кмоль}. \end{aligned}$$

2. Низшая теплота сгорания:

$$Q_H = 1 \cdot 396,6 + 2 \cdot 242,2 - 75 = 806 \text{ кДж/моль}.$$

3. Средняя внутренняя энергия продуктов горения

$$U_{cp} = \frac{Q_H}{V_{п.г}} = \frac{806}{10,5} = 76,8 \text{ кДж/моль}.$$

4. По табл. 2 приложения принимаем первую приближенную температуру взрыва (по азоту) $T_i = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов горения при T_1 :

$$U_1 = \sum V_{n,i} U_i = 1 \cdot 128,9 + 2 \cdot 102,4 + 7,5 \cdot 70,2 = 860,2 \text{ кДж/моль.}$$

6. Сравнение значения Q_f и U_1 показывает, что T_1 завышена.

7. Выбираем $T_2 = 2500^\circ\text{C}$.

$$U_2 = 1 \cdot 118,3 + 2 \cdot 94,3 + 7,5 \cdot 64,3 = 789,2 \text{ кДж/моль.}$$

8. Так как $U_1 > Q_f > U_2$, то

$$T_{взр} = 2500 + \frac{806 - 789,2}{860,2 - 789,2} \cdot (2700 - 2500) \approx 2524^\circ\text{C}$$

Задачи для самостоятельного решения

28. Определить, как изменяется адиабатическая температура горения в гомологическом ряду предельных углеводородов (на примере метана, пропана, пентана и гептана). Построить график зависимости температуры горения от молекулярной массы горючего вещества.

29. Определить, как изменяется адиабатическая температура горения древесины состава: С – 49 %, Н – 8 %, О – 43 %, если содержание влаги (сверх 100 %) составляет 0, 5, 15 %. Построить график зависимости температуры горения от влажности горючего.

Примечание. При решении задачи необходимо состав древесины пересчитать так, чтобы количество всех компонентов (в том числе и воды) составляло 100 %.

30. Определить, как изменится адиабатическая температура горения бензола в воздухе и окислительной среде, содержащей 25, 30, и 40 % кислорода. Построить график зависимости температуры горения от содержания кислорода.

31. Рассчитать действительную температуру горения газовой смеси, состоящей из 45 % H_2 , 30 % C_3H_8 , 15 % O_2 , 10 % N_2 , если потери тепла составили 30 % от Q_f , а коэффициент избытка воздуха при горении равен 1,8.

32. Определить количество сгоревшего антрацита (С = 100 %) в помещении объемом 180 м^3 , если среднеобъемная температура возросла с 305 до 625 К

33. Рассчитать действительную температуру горения бутано-

воздушной смеси стехиометрической концентрации на нижнем концентрационном пределе воспламенения (1,9 % бутана и 98,1 % воздуха), если потери тепла излучением составили 20 % от низшей теплоты сгорания.

34. Определить, как изменится температура горения ацетиленов при разбавлении его азотом в количестве 10, 20, 30 %, если потери тепла излучением составляют 25 % от низшей теплоты сгорания, коэффициент избытка воздуха 1,2. Построить график зависимости температуры от содержания азота в ацетилене.

35. Определить время горения толуола, при котором температура в помещении объемом 400 м³ повысится с 295 до 375 К, если скорость его выгорания 0,015 кг/(м²·с), а площадь пожара 50 м². При расчете пренебречь приращением объема продуктов горения над расходуемым воздухом.

36. Рассчитать температуру горения *i*-го вещества (табл. 1.9.)

Таблица 1.9

Данные для расчета температуры горения вещества

№ п/п	Горючее вещество	Химическая формула	Состав окислительной среды	Условия горения
1	2	3	4	5
1	Смесь газов	CO – 40 % C ₃ H ₈ – 50 % CO ₂ – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,25$
2	Вещество сложного состава	C – 80 % H – 5 % S – 6 % W – 9 %	Воздух	$\alpha = 1,6$ $\eta = 0,3$
3	Пропионовая кислота	C ₃ H ₆ O ₂	O ₂ – 25 % N ₂ – 75 %	$\alpha = 1,3$ $\eta = 0,4$
4	глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,35$
5	Уксусно-бутиловый эфир	C ₆ H ₁₂ O ₂	Воздух	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$
6	Этилбензол	C ₈ H ₁₀	Воздух	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,2$
7	Вещество сложного состава	C – 82 % H – 8 % O – 5 % W – 5 %	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,35$
8	Смесь газов	CO – 60 % H ₂ – 40 %	Воздух	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,4$

Окончание табл. 1.9

1	2	3	4	5
9	Аммиак	NH_3	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,2$
10	Гексан	C_6H_{14}	Воздух	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$
11	Нитроэтан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$	Воздух	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,2$
12	Гексиловый спирт	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	Воздух	$\alpha = 2,0$ $\eta = 0,1$
13	Вещество сложно- го состава	C – 75 % H – 8 % C – 12 % W – 5 %	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$
14	Смесь газов	CH_4 – 70 % NH_3 – 20 % O_2 – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,2$
15	Муравьиная кисло- та	CH_2O_2	O_2 – 25 % N_2 – 75 %	$\alpha = 2,2$ $\eta = 0,3$
16	Вещество сложно- го состава	C – 56 % H – 14 % O – 20 % W – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$
17	Вещество сложно- го состава	C – 78 % H – 12 % O – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,6$ $\eta = 0,15$
18	Смесь газов	CO – 75 % CH_4 – 25 %	Воздух	$\alpha = 1,9$ $\eta = 0,2$
19	Смесь газов	C_3H_8 – 70 % C_4H_{10} – 20 % O_2 – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,2$
20	Вещество сложно- го состава	C – 85 % H – 10 % O – 5 %	Воздух	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,3$
21	Смесь газов	C_2H_6 – 75 % CH_4 – 20 % O_2 – 5 %	Воздух	$\alpha = 1,7$ $\eta = 0,22$
22	Вещество сложно- го состава	C – 70 % H – 16 % O – 14 %	Воздух	$\alpha = 1,2$ $\eta = 0,35$
23	Смесь газов	CO – 50 % CH_4 – 30 % CO_2 – 20 %	Воздух	$\alpha = 1,9$ $\eta = 0,15$
24	Вещество сложно- го состава	C – 77 % H – 13 % N – 4 % O – 6 %	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,45$
25	Этилен	C_2H_4	O_2 – 25 % N_2 – 75 %	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$

2. КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ 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.

Нижний концентрационный предел воспламенения определяют по предельной теплоте горения. Установлено, что 1 м³ различных газоз воздушных смесей на НКПВ выделяет при горении постоянное среднее количество тепла – 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot 100}{Q_{\text{н}}} \quad (2.1)$$

если принять среднее значение $Q_{\text{пр}}$ равным 1830 кДж/м, то $\varphi_{\text{н}}$ будет равно

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{1830 \cdot 100}{Q_{\text{н}}}$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³.

Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{\text{н(в)}} = \frac{100}{an + b} \quad (2.2)$$

где n – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции; a и b – эмпирические константы, значения которых приведены в табл. 2.1.

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

$$\varphi_{\text{н(в)}} = \frac{P_{\text{н(в)}} \cdot 100}{P_{\theta}} \quad (2.3)$$

где $P_{H(B)}$ – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу воспламенения, Па; P_0 – давление окружающей среды, Па.

Таблица 2.1

Значение эмпирических констант

Концентрационные пределы воспламенения	Значения коэффициентов	
	a	b
Нижний	8,684	4,679
Верхний		
$n \leq 7,5$	1,550	0,560
$n > 7,5$	0,768	6,554

Давление насыщенного пара может быть определено по уравнению Антуана или по табл. 4 приложения

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \quad (2.4)$$

где A , B , C – константы Антуана (табл. 12 приложения); t – температура, °С (температурные пределы).

Для расчета концентрационных пределов воспламенения смесей горючих газов $\varphi_{H(B)}^{cm}$ используют правило Ле-Шателье:

$$\varphi_{H(B)}^{cm} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{H(B)i}}} \quad (2.5)$$

где $\varphi_{H(B)i}$ – нижний (верхний) предел воспламенения i -го горючего газа, % (об.); μ_i – мольная доля i -го горючего газа в смеси.

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

Если известны концентрационные пределы воспламенения при температуре T_1 , то при температуре T_2 они вычисляются по формулам:

$$\varphi_{нг_2} = \varphi_{нг_1} \left(1 - \frac{T_2 - T_l}{T_2 - T_l}\right); \quad (2.6)$$

$$\varphi_{вг_2} = \varphi_{вг_1} \left(1 - \frac{T_2 - T_l}{T_2 - T_l}\right); \quad (2.7)$$

где $\varphi_{нг_1}, \varphi_{нг_2}$ – нижний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах T_1 и T_2 ; $\varphi_{вг_1}$ и $\varphi_{вг_2}$ – верхний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах T_1 и T_2 ; T_2 – температура горения смеси.

Приближенно при определении НКПВ T_2 принимают 1550 К, при определении ВКПВ – 1100 К.

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

$$\varphi_\phi = \frac{h'_f \Delta H_f^o + h'_\phi + \sum h'_i m_i}{h''_\phi - 1 + \sum h''_i m_i} 100; \quad (2.8)$$

$$\varphi_{O_2} = \frac{100 - \varphi_\phi}{4,844}; \quad (2.9)$$

$$\varphi_{O_2, без} = 1,2 \varphi_{O_2} - 4,2, \quad (2.10)$$

где ΔH_f^o – стандартная теплота образования горючего, Дж/моль; h'_i , h''_i , h'_ϕ – константы, зависящие от вида химического элемента в молекуле горючего и вида флегматизатора (табл. 11 приложения); m_i – количество атомов i -го элемента (структурной группы) в молекуле горючего.

Расчет этих параметров может проводиться по другой физически более прозрачной методике – решением уравнения теплового баланса (1.36) при следующих двух условиях:

– в точке флегматизации горючая смесь имеет предельную температуру горения примерно 1500 К;

– смесь является стехиометрической при окислении углерода до CO, водорода – до H₂O.

Уравнение теплового баланса (1.36) в случае разбавления нейтральным газом представляем в виде:

$$Q_H = (T_s^* - T_o) [\sum C_{p_{iH}} + C_{p_{гФ}}] \quad (2.11)$$

где T_s^* – предельная температура горения примерно 1500 К; C_{p_i} , $C_{p_{гФ}}$ – соответственно теплоемкость i -го продукта горения и нейтрального газа (флегматизатора), кДж/(моль К); n_{iH} – количество молей i -го продукта горения стехиометрической смеси, моль/моль; $n_{гФ}$ – количество молей нейтрального газа в точке флегматизатора, моль/моль.

Из формулы (2.11)

$$n_{гФ} = \frac{Q_H - (T_s^* - T_o) \sum C_{p_i} n_{iH}}{C_{p_{гФ}} (T_s^* - T_o)}, \quad (2.12)$$

Приняв объем всех компонентов газовой смеси за 100 %, определяем концентрацию, % (об.), каждого из них:

$$\varphi_i = \frac{n_i}{n_{гФ} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{гФ}} \cdot 100. \quad (2.13)$$

Задача 2.1. Зная предельную теплоту сгорания определить нижний концентрационный предел воспламенения бутана в воздухе.

Решение. Для расчета по формуле (2.1) в табл. 3 приложения находим низшую теплоту сгорания вещества 2882,3 кДж/моль. Эту величину надо перевести в другую размерность – кДж/м³

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

По формуле (2.1) определим НКПВ

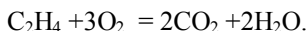
$$\phi_n = \frac{1830 \cdot 100}{128,710^3} = 1,42 \, \%$$

По табл. 4 приложения находим, что экспериментальное значение $\phi_n = 1,9 \, \%$. Относительная ошибка расчета, следовательно, составила

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

Задача 2.2. Определить концентрационные пределы воспламенения этилена в воздухе.

Решение. Расчет КПВ проводим по аппроксимационной формуле. Определяем значение стехиометрического коэффициента при кислороде



Таким образом, $n = 3$, тогда

$$\phi_n = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25 \, \%;$$

$$\phi_v = \frac{100}{1,55 \cdot 3 + 0,56} = 18,23 \, \%.$$

Определим относительную ошибку расчета. По табл.4 приложения экспериментальные значения пределов составляют 3,0–32,0:

$$\Delta_H = \frac{3,25 - 3,0}{3,0} \approx 8 \, \%; \quad \Delta_B = \frac{19,23 - 32,0}{32} \approx -40 \, \%$$

Следовательно, при расчете НКПВ этилена результат завышен на 8 %, а при расчете ВКПВ – занижен на 40 %.

Задача 2.3. Определить концентрационные пределы воспламенения насыщенных паров метанола в воздухе, если известно, что его температурные пределы составляют 280–312 К. Атмосферное давление нормальное.

Решение. Для расчета по формуле (2.3) необходимо определить давление насыщенных паров, соответствующее нижнему (7 °С) и верхнему (39 °С) пределам воспламенения.

По уравнению Антуана (2.4) находим давление насыщенного пара, воспользовавшись данными табл. 12 приложения:

$$\begin{aligned}\lg P_{\text{н}} &= 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 7} = 1,65999; P_{\text{н}} = 45,7 \text{ мм рт. ст.} = \\ &= 45,7 \cdot 133,2 = 6092,8 \text{ Па;} \\ \lg P_{\text{б}} &= 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 39} = 2,39789;\end{aligned}$$

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

По формуле (2.3) определим НКПВ

$$\phi_{\text{н}} = \frac{6092,8 \cdot 100}{101325} = 6\%; \phi_{\text{н}} = \frac{33300 \cdot 100}{101325} = 32,9\%.$$

Задача 2.4. Определить концентрационные пределы воспламенения газовой смеси, состоящей из 40 % пропана, 50 % бутана и 10 % пропилена.

Решение. Для расчета КПВ смеси газов по правилу Ле-Шателье (2.5) необходимо определить КПВ индивидуальных горючих веществ, методы расчета которых рассмотрены выше:

$$\begin{aligned}\phi_{\text{н}}(\text{C}_3\text{H}_8) &= 2,1\%; \phi_{\text{б}}(\text{C}_3\text{H}_8) = 9,5\%; \phi_{\text{н}}(\text{C}_3\text{H}_6) = 2,2\%; \\ \phi_{\text{б}}(\text{C}_3\text{H}_6) &= 10,3\%; \phi_{\text{н}}(\text{C}_4\text{H}_{10}) = 1,9\%; \phi_{\text{б}}(\text{C}_4\text{H}_{10}) = 9,1\%; \\ \phi_{\text{н}}^{\text{см}} &= \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,1}{2,2} + \frac{0,5}{1,9}} = 2,0\%; \phi_{\text{н}}^{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,4}{9,5} + \frac{0,1}{10,1} + \frac{0,5}{9,1}} = 9,38\%.\end{aligned}$$

Задача 2.5. Каково минимальное количество диэтилового эфира, кг, способное при испарении в емкости объемом 350 м³ создать взрывоопасную концентрацию?

Решение. Концентрация будет взрывоопасной, если $\phi_{\text{н}} = \phi_{\text{п.г}}$ ($\phi_{\text{п.г}}$ – концентрация паров горючего вещества). Расчетom (см. примеры 1–3) или по табл. 5 приложения находим НКПВ диэтилового эфира. Он равен 1,7 %.

Определим объем паров диэтилового эфира, необходимый для создания в объеме 350 м³ этой концентрации

$$V_{п.г} = \frac{1,7 \cdot 350}{100} = 5,95 \text{ м}^3.$$

Таким образом, для создания НКПВ диэтилового эфира в 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

$$m_r = \frac{74 \cdot 5,95}{22,4} = 19,7 \text{ м}^3.$$

Задача 2.6. Определить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации в объеме 50 м^3 при испарении 5 кг гексана, если температура окружающей среды 300 К.

Решение. Очевидно, паровоздушная смесь будет взрывоопасной, если $\varphi_n \leq \varphi_{п.г} \leq \varphi_v$. 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 $22,4 \text{ м}^3$

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

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

$$\phi_{п.г.} = \frac{1,43}{50} \cdot 100 = 2,86 \text{ \%}.$$

Определив концентрационные пределы воспламенения гексана в воздухе ($\varphi_n = 1,2$; $\varphi_v = 7,5 \text{ \%}$), по таблицам или расчетом устанавливаем, что образующаяся смесь является взрывоопасной.

Задача 2.7. 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 $\varphi_n^{CM} \leq \varphi_{п.п}^{CM} \leq \varphi_v^{CM}$ ($\varphi_{п.п}^{CM}$ – концентрация 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:

$$\mu_i^* = \frac{g_i/M_i}{\sum g_i/M_i},$$

где μ_i^* – мольная доля i -го вещества; g_i – весовая доля i -го вещества; M_i – молекулярная масса i -го вещества ($M_{дэ} = 74, M_{эс} = 46$).

$$\mu_{дэ}^* = \frac{\frac{0,6}{74}}{\frac{0,6}{74} + \frac{0,4}{46}} = 0,479; \quad \mu_{эс}^* = \frac{\frac{0,4}{46}}{\frac{0,6}{74} + \frac{0,4}{46}} = 0,521.$$

2. По уравнению (2.4), используя значения констант Антуана из табл. 12 приложения, находим давление насыщенных паров диэтилового эфира и этилового спирта при температуре 19 °С (245 К):

3.

$$\begin{aligned} \lg P_{дэ} &= 6,9979 - \frac{1098,945}{232,372 - 19} = 1,84753; \\ P_{дэ} &= 70,39 \text{ мм рт. ст.} = 382,6 \text{ Па.} \\ \lg P_{эс} &= 8,68665 - \frac{1918,508}{252,125 - 19} = 0,45713; \\ P_{эс} &= 2,87 \text{ мм рт. ст.} = 382,6 \text{ Па.} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P_{\text{пар(д)}} &= 9384,4 \cdot 0,479 = 4495,1 \text{ Па;} \\ P_{\text{пар(э)}} &= 382,6 \cdot 0,521 = 199,3 \text{ Па.} \end{aligned}$$

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

а) концентрацию паров в воздухе

$$\varphi_{\text{н.п}}^{\text{см}} = \frac{4495,1 + 199,3}{101325} \cdot 100 = 4,6 \%;$$

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

$$\mu_{\text{дэ(д)}} = \frac{4495,1}{4495,1 + 199,3} = 0,958; \mu_{\text{эс(п)}} = 1,00 - 0,960 = 0,958.$$

6. Определив расчетом или по справочным данным (табл. 5 приложения) КПВ индивидуальных веществ (диэтиловый эфир $\varphi_{\text{н}} = 1,7$; $\varphi_{\text{в}} = 59 \%$; этиловый спирт $\varphi_{\text{н}} = 3,6$; $\varphi_{\text{в}} = 19 \%$), по правилу Лешателье рассчитаем КПВ паровой фазы:

$$\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,958}{1,7} + \frac{0,042}{3,6}} = 1,7; \varphi_{\text{в}}^{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,958}{49} + \frac{0,042}{19}} = 46,1.$$

7. Сравнивая полученные в п. 4 а концентрацию паровоздушной смеси с концентрационными пределами распространения пламени ($\varphi_{\text{н}} = 1,7$; $\varphi_{\text{в}} = 46,1 \%$), делаем заключение, что при 245 К над данной жидкой фазой образуется взрывоопасная концентрация насыщенных паров в воздухе.

Задача 2.8. Рассчитать безопасную концентрацию кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе.

Решение. По табл. 3 приложения находим теплоту образования ацетона 248,1 103 Дж/моль. Из химической формулы ацетона ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) следует, что $m_{\text{C}} = 3$, $m_{\text{H}} = 6$, $m_{\text{O}} = 1$. Значения остальных параметров, необходимые для расчета по формуле (2.8), выбираем из табл. 11 приложения для двуокиси углерода

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

$$\phi_{\text{O}_2} = \frac{100 - 48,1}{4,844} = 10,7 \%; \quad \phi_{\text{O}_{26\text{сз}}} = 1,2 \cdot 10,7 - 4,2 = 8,6 \%.$$

Следовательно, при снижении концентрации кислорода в четырех-компонентной системе, состоящей из паров ацетона, двуокиси углеро-

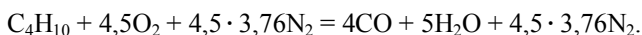
да, азота и кислорода, до 8,6 % смесь становится взрывобезопасной. При содержании же кислорода, равном 10,7 %, эта смесь будет предельной по взрываемости. Согласно справочным данным (справочник «Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности»), МВСК ацетоновоздушной смеси при разбавлении ее двуокисью углерода составляет 14,9 %. Определим относительную погрешность расчета:

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

Таким образом, результаты расчета МВСК занижены на 28 %.

Задача 2.9. Рассчитать параметры точки флегматизации (МФК, МВС, концентрацию горючего) при разбавлении бутановоздушной смеси диоксидом углерода.

Решение. Расчет проведем по уравнениям (2.11) – (2.13). Запишем уравнение химической реакции окисления бутана до СО и Н₂О



По формуле (1.30) рассчитаем низшую теплоту этой реакции.

Из табл. 3 приложения находим теплоты образования продуктов реакции и рассчитываем:

$$Q_{\text{н}} = 4 \cdot 112,7 + 5 \cdot 242,2 - 1 \cdot 132 = 1529,4 \text{ кДж/моль}.$$

По формуле (2.12), имея данные по теплоемкости продуктов горения и нейтрального газа при температуре 1500 К (см. табл. 1.8), рассчитываем количество молей диоксида углерода в точке флегматизации:

$$n_{\phi} = \frac{1529,4 - (1500 - 295) \cdot (33,73 \cdot 4 + 39,85 \cdot 5 + 31,81 \cdot 4,5 \cdot 3,76) \cdot 10^{-3}}{50,85 \cdot 10^{-3} (1500 - 295)} = 7,8 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}.$$

МФК диоксида углерода определим по формуле (2.13)

$$\phi_{\phi} = \frac{7,8 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 26 \text{ \%};$$

По формуле (2.13) рассчитывается и МВСК, и концентрация горючего в точке флегматизации

$$\phi_{\phi} = \frac{4,5 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 14,9 \%;$$

$$\phi_{\phi} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 3,3 \%.$$

Задачи для самостоятельного решения

37. По предельной теплоте сгорания определить, как изменится нижний концентрационный предел воспламенения в воздухе от положения предельных углеводородов (этан, пропан, бутан, гептан, гексан) в гомологическом ряду. Построить график зависимости НКПВ от молекулярной массы горючего.

38. По аппроксимационной формуле рассчитать, как изменяются концентрационные пределы жирных спиртов (метилового, этилового, гексилового, октилового) в воздухе. Построить график зависимости нижнего и верхнего пределов воспламенения от молекулярной массы горючего.

39. Определить концентрационные пределы воспламенения сероуглерода при атмосферном давлении, равном 99 000 Па, если его температурные пределы составляют 223 – 299 К.

40. Рассчитать концентрационные пределы воспламенения бензола, если его температурные пределы составляют 259–283 К. Определить ошибку расчета.

41. Определить концентрационные пределы воспламенения парогазовой смеси, состоящей из 20 % этана, 60 % этилена, 20 % паров этилового спирта.

42. Определить концентрационные пределы воспламенения в воздухе смеси паров, состоящей из 50 % бензола, 35 % толуола и 15 % фенола при увеличении температуры с 298 до 373 К.

44. Определить, образуется ли взрывоопасная концентрация при испарении в помещении объемом 220 м³ 15 кг деканола, если температура 310 К, давление 110 500 Па.

45. Определить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации при температуре 298 К над поверхностью жидкой фазы, состоящей из 25 % уксусно-метилового эфира, 40 % уксусного альдегида и 35 % амилового спирта.

46. Определить состав двухкомпонентной газовой смеси, состоящей из паров аммиака и сероводорода, если известно, что ее нижний концентрационный предел воспламенения в воздухе составляет 5,8 %.

47. Определить безопасную концентрацию кислорода при разбавлении паров уксусно-пропилового эфира ($\Delta_f = 513,7 \cdot 10^3$ кДж/моль) в воздухе двуокисью углерода, водяным паром и азотом. Объяснить причину различной флегматизирующей эффективности инертных газов.

48. Рассчитать концентрационные пределы воспламенения паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку. Данные для расчета представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Данные для расчета концентрационных пределов
воспламенения паров вещества в воздухе**

№ п/п	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи
1	2	3	4
1	Гептан	C_7H_{16}	По предельной теплоте сгорания
2	Смесь газов	$C_8H_{18} - 40 \%$, $C_6H_{14} - 60 \%$	По формуле Ле-Шателье
3	Ацетилен	C_2H_2	По аппроксимационной формуле
4	Уксусный альдегид	C_2H_4O	По предельной теплоте сгорания
5	Бензол	C_6H_6	По температурным пределам воспламенения
6	Ацетон	C_3H_6O	По температурным пределам воспламенения
7	Смесь газов	$CH_4 - 40 \%$ $CO - 50 \%$ $C_3H_8 - 10 \%$	По формуле Ле-Шателье
8	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	По температурным пределам воспламенения
9	Этан	C_2H_6	По предельной теплоте сгорания
10	Толуол	C_7H_8	По температурным пределам воспламенения
11	Смесь газов	$CO - 70 \%$ $CH_4 - 25 \%$ $C_2H_6 - 5 \%$	По формуле Ле-Шателье
12	Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	По аппроксимационной формуле
13	Уксусно – этиловый эфир	$C_4H_8O_2$	По температурным пределам воспламенения
14	Глицерин	$C_3H_8O_3$	По аппроксимационной формуле
15	Ацетон	C_3H_6O	По аппроксимационной формуле
16	Стирол	C_8H_8	По температурным пределам воспламенения
17	Фенол	C_6H_6O	По предельной теплоте сгорания

1	2	3	4
18	Гексиловый спирт	$C_3H_{14}O$	По аппроксимационной формуле
19	Смесь газов	$CO - 12 \%$ $C_2H_2 - 78 \%$ $CH_4 - 10 \%$	По формуле Ле-Шателье
20	Диэтиловый спирт	$(C_2H_5)_2O$	По температурным пределами воспламенения
21	Сероуглерод	CS_2	По температурным пределами воспламенения
22	Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	По аппроксимационной формуле
23	Бензиловый спирт	C_7H_8O	По температурным пределами воспламенения
24	Метилэтилкетон	C_4H_8O	По аппроксимационной формуле
25	Анилин	C_6H_7N	По предельной теплоте сгорания

3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

Для полной оценки пожарной опасности твердых веществ и материалов, а также жидкостей и газов необходимы температурные показатели. К ним относятся температурные пределы распространения пламени: нижний T_H и верхний T_B температура вспышки в закрытом T_{BC}^3 и открытом T_{BC}^o приборах, температура воспламенения $T_{ВП}$, температура самовоспламенения T_{BC} , температура зажигания T_3 , температура горения $T_{Г.}$ (п. 1.4). В порядке возрастания они могут быть расположены в виде ряда

$$T_H \leq T_{BC}^3 < T_{BC}^o < T_{ВП} < T_{CB} < T_3 < T_{Г.}$$

3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения)

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

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

Температурные пределы воспламенения (ТПВ) жидкостей рассчитывают по температуре кипения

$$t_{(H)B} = kt_{\text{кип}} - l, \quad (3.1)$$

где $t_{(H)B}$ – нижний (верхний) температурный предел воспламенения; $t_{\text{кип}}$ – температура кипения, °C; k, l – константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей (табл. 6 приложения).

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

$$P_{(H)B} = \frac{\varphi_{H(B)} P_0}{100}, \quad (3.2)$$

где $P_{(H)B}$ – давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения; $\varphi_{(H)B}$ – нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения; P_0 – атмосферное давление.

Из уравнения Антуана (2.4) или по табл. 7 приложения определяем температуру вещества, при которой достигается данное давление. Эта температура будет являться соответственно нижним (верхним) пределом воспламенения.

Задача 3.1. Определить ТПВ метилового спирта, если температура его кипения равна 65 °C.

Решение. Расчет проводим по формуле (3.1), значение констант определяем по табл. 6 приложения для нормальных жирных спиртов:

$$\begin{aligned} t_{(H)} &= 0,5746 \cdot 65 - 33,7 = 3,6^\circ \text{C} = 276,6 \text{ K}; \\ t_{(B)} &= 0,6928 \cdot 65 - 15,0 = 30^\circ \text{C} = 303 \text{ K}. \end{aligned}$$

Определим относительную ошибку расчета. По табл. 5 приложения находим, что ТПВ метилового спирта составляют 280 – 312 K:

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

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3 %.

Задача 3.2. Определить температурные пределы воспламенения ацетона, если его концентрационные пределы в воздухе равны 2,2 – 13,0 %. Атмосферное давление – нормальное.

Решение. По формуле (3.2) определим давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения:

$$P_H = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2230 \text{ Па}; \quad P_B = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13172 \text{ Па};$$

$$P_H = \frac{2230}{133,32} = 16,73 \text{ мм. рт. ст.}; \quad P_B = \frac{13172}{13332} = 98,8 \cdot 16,73 \text{ мм. рт. ст.}$$

Из уравнения Антуана (2.4) следует

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

Из табл. 12 приложение находим значения констант А, В и С для ацетона:

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

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

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

$$t_B = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,9994} - 237,088 = 7^\circ \text{C} = 280 \text{ K}.$$

Для решения этой же задачи можно воспользоваться данными табл. 7 приложения. Из табл. 7 следует, что НТПВ находится между температурами 241,9 – 252,2 °С, а ВТПВ – между 271,0 и 280,7 К.

Линейной интерполяцией определим ТПВ:

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

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

Задачи для самостоятельного решения

49. Определить температурные пределы воспламенения в гомологическом ряду жирных углеводов: бутана, пентана, гексана, октана, температуры кипения которых соответственно равны 273,5, 309, 341,7, 398,7 К. Построить график изменения ТПВ от положения горючего в гомологическом ряду.

50. Сравнить температурные пределы воспламенения *n*-бутиловых эфиров муравьиной и уксусной кислот. На основании полученных данных сделать вывод об их сравнительной пожарной опасности. Температура кипения бутилформиата равна 379,8 К, а бутилацетата 399 К.

51. Определить температурные пределы воспламенения бутилбензола по его концентрационным пределам. Значения последних рассчитать по аппроксимационной формуле.

52. По концентрационным пределам воспламенения, значения которых следует установить по аппроксимационной формуле, определить температурные пределы воспламенения ацетона и метилэтилкетона. По результатам расчета сделать вывод о сравнительной пожарной опасности этих веществ.

3.2. Расчет температур вспышки и воспламенения

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

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

Наиболее распространенным и достаточно точным является расчет температур вспышки и воспламенения по формуле В. И. Блинова

$$T_{\text{вс(вп)}} = \frac{A}{P_{\text{н.п}} D_0 n}, \quad (3.3)$$

где $T_{BC(BIT)}$ – температура вспышки (воспламенения); A – константа метода определения, табл. 3.1; $P_{н.п}$ – давление насыщенного пара при температуре вспышки (воспламенения); D_0 – 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.

Коэффициенты диффузии некоторых газов и паров в воздухе при нормальных условиях D_0 приведены в табл. 12 приложения. При их отсутствии последние определяют по формуле

$$D_o = \frac{10^{-4}}{\sqrt{\sum \Delta M_i m_i}}, \quad (3.4)$$

где D_0 – коэффициент диффузии, m^2/c ; m_i – количество i -го элемента в молекуле горючего вещества; ΔM_i – атомные (элементные) составляющие, табл. 3.2.

Таблица 3.1

Температура вспышки в закрытом, открытом тигле, температура воспламенения

Определяемый параметр	Значение параметра А, $\frac{m^2 \cdot K \cdot Pa}{c}$
Температура, К,	
вспышки в закрытом тигле	28,0
вспышки в открытом тигле	45,3
воспламенения	53,3

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

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n, \quad (3.4 a)$$

где n – показатель, значение которого приведено в табл. 12 приложения.

Таблица 3.2

Значение ΔM , зависящее от числа атомов углерода и их положения в молекуле горючего

Название i -го элемента	Значение ΔM *
Углерод (C)	25–50
Водород (H)	1
Кислород (O)	17
Азот (N)	16
Сера (S)	48
Хлор (Cl)	37
Бром (Br)	79
Йод (I)	104
Фтор (F)	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, если $C > 8$.

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

$$t_{ec} = t_{кин} - 18\sqrt{k}, \quad (3.5)$$

где t_{ec} – температура вспышки, ; $t_{кин}$ – температура кипения, °C; k – коэффициент, определяемый по формуле:

$$k = 4m_C + m_H + 4m_S + m_N - 2m_O - 2m_{CL} - 3m_F - 5m_{Br}, \quad (3.5a)$$

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:

$$t_{ec} = \frac{t_H + 2}{0,875}. \quad (3.6)$$

Эта формула применима, если $0 < t_{ac} < 160$.

Задача 3.3. По формуле В. И. Блинова определить температуру воспламенения бутилового спирта.

Решение. Определим значение стехиометрического коэффициента $C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$. Следовательно, $n = 6$.

Определим значение коэффициента диффузии по формуле (3.4). Для этого по табл. 3.2 устанавливаем, что $\Delta M = 25 + 3 \cdot 4 = 37$, тогда

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

1. По табл. 3.1 выберем значение $A = 53,3$ и по формуле (3.3) определим произведение

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

По табл. 7 приложения задаемся температурой 326,4 К, при которой давление насыщенного пара равно 5333 Па.

Произведение $T_1 P_1 = 326,4 \cdot 5333 = 1740 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}$.

Сравнивая полученное значение с вычисленным в п. 3, устанавливаем, что $T_{вп} P_{н.п} < T_1 P_1$.

2. Задаемся по табл. 7 приложения меньшей температурой 314,5 К. Давление насыщенного пара при этом равно 2666 Па.

$$T_2 P_2 = 314,5 \cdot 2666 = 840 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}.$$

Так как $T_2 P_2 > T_{вп} P_{н.п}$ 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 $\Delta = \frac{319 - 314}{314} 100 = 1,6 \%$.

Задача 3.4. По формуле Элея определить температуру вспышки бензола в закрытом тигле.

Решение. Для расчета по формуле (3.5) 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 (3.5а)

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

Определим искомую величину температуры вспышки

$$t_{\text{вс}} = 80 - 18\sqrt{30} = -18,6^\circ\text{C} \text{ или } 254,4 \text{ К}$$

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 %.

Задачи для самостоятельного решения

53. По формуле В. И. Блинова определить температуру вспышки в открытом сосуде уксусно-метилового эфира.

54. По формуле В. И. Блинова рассчитать температуру воспламенения бензола.

55. По формуле Элея рассчитать температуру вспышки 2-метилгексана $t_{\text{кин}} = 90,1^\circ\text{C}$).

56. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле стирола (C_8H_8) по формулам В. И. Блинова и Элея. Оценить точность расчета, если $T_{\text{вс}}$ стирола по справочным данным равна 303 К.

57. Определить температуру вспышки в закрытом тигле акриловой кислоты по формулам В. И. Блинова и Элея.

58. Рассчитать температуру вспышки (воспламенения) i -го вещества по формуле В. И. Блинова. Значение D_0 взять из справочной литературы или определить по формуле (3.4). Сравнить вычисленные значения температуры вспышки (воспламенения) с имеющимися справочными данными и оценить погрешность расчета. Данные для расчета приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

**Данные для расчета температуры вспышки (воспламенения)
вещества по формуле В. И. Блинова**

№ п/п	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи
1	Уксусный альдегид	C_2H_4O	Температура вспышки в закрытом тигле
2	Ацетон	C_3H_6O	Температура воспламенения
3	Пропилбензол	C_9H_{12}	Температура вспышки в открытом тигле
4	Окись этилена	C_2H_4O	Температура воспламенения
5	Сероуглерод	CS_2	Температура воспламенения
6	Метиловый спирт	CH_4O	Температура вспышки в закрытом тигле
7	Толуол	C_7H_8	Температура воспламенения
8	Этилбензол	C_8H_{10}	Температура воспламенения
9	Диэтиловый эфир	$(C_2H_5)_2O$	Температура вспышки в открытом тигле
10	Метилэтилкетон	C_4H_8O	Температура воспламенения
11	Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	Температура вспышки в открытом тигле
1	2	3	4
12	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в открытом тигле
13	Бутиловый спирт (третичный)	$C_4H_{10}O$	Температура воспламенения
14	2-метилбутан	C_5H_{12}	Температура вспышки в закрытом тигле
15	Октан	C_8H_{18}	Температура воспламенения
16	Этилциклопентан	C_7H_{14}	Температура воспламенения
17	Уксуснопропи- ловый эфир	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
18	Уксусно-этиловый эфир	$C_4H_{10}O$	Температура воспламенения
19	Пропиловый спирт (вторичный)	C_3H_8O	Температура воспламенения
20	Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	Температура вспышки в открытом тигле
21	Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
22	Бензиловый спирт	C_7H_8O	Температура воспламенения
23	Этиловый спирт	C_2H_6O	Температура вспышки в открытом тигле
24	Ацетон	C_3H_6O	Температура вспышки в закрытом тигле
25	Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	Температура воспламенения
26	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
27	Бромистый бензол	C_6H_5Br	Температура воспламенения

3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения

Самовоспламенением называется явление быстрого нарастания скорости химической реакции, приводящее при определенных внешних условиях к воспламенению горючей смеси. Температура самовоспламенения – минимальная температура порога воздушной смеси, при

которой происходит ее воспламенение без влияния высокоэнергетического источника зажигания.

Расчет температуры самовоспламенения проводят в следующей последовательности. Определяют количество углеродных цепей

$$m_u = \frac{M_p(M_p - 1)}{2}, \quad (3.7)$$

где m_u – общее число цепей; M_p – количество функциональных групп в молекуле горючего вещества –С, –ОН, фенил.

Фенильная группа может быть как концевой, так и в середине цепи.

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

$$I_{cp} = \frac{\sum m_i C_i}{m_u}, \quad (3.8)$$

где C_i – количество атомов углерода в i -й цепи.

При определении C_i надо иметь в виду, что группа –ОН удлиняет цепь, а фенильная группа уменьшает ее на один атом углерода.

По табл. 8–10 приложения по средней длине цепи определяют температуру самовоспламенения. Температуру самовоспламенения можно также рассчитать по формулам:

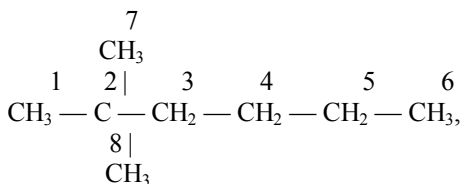
$$t_c = 300 + 116\sqrt{5 - I_{cp}} \text{ при } I_{cp} \leq 5; \quad (3.9)$$

$$t_c = 300 + 38\sqrt{I_{cp} - 5} \text{ при } I_{cp} > 5. \quad (3.10)$$

Задача 3.5. Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.

Решение.

1. Запишем структурную формулу горючего вещества и определим количество цепей:



$M_p = 4$, так как в молекуле содержится четыре группы $-\text{CH}_3$.

$$m_u = \frac{4(4-1)}{2} = 6.$$

2. Находим длину каждой из шести цепей 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

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

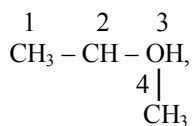
По табл. 8 приложения определяем, что температура самовоспламенения равна 643 К. По формуле (3.9)

$$t_c = 300 + 116\sqrt{5 - 4,5} = 382^\circ \text{C} \text{ или } 655 \text{ K}.$$

Задача 3.6. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

Решение.

1. Исходя из структурной формулы вещества, определим количество цепей



$M_p = 3$, так как в молекуле содержатся две группы $-\text{CH}_3$ и одна группа $-\text{OH}$.

$$M_u = \frac{3(3-1)}{2} = 3.$$

2. Находим длину каждой цепи и среднюю длину

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

В цепях 1–3 и 3–4 содержатся по два атома углерода и одна группа –ОН, которая удлиняет цепь на один атом углерода

$$I_{cp} = \frac{3 \cdot 3}{3} = 3.$$

3. По табл. 10 приложения находим температуру самовоспламенения изопропилового спирта (706 К); по формуле (3.9)

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

Согласно справочным данным, температура самовоспламенения равна 693 К. Относительная ошибка расчета с использованием таблицы составляет

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

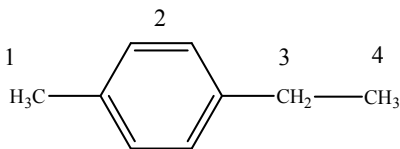
Если расчет вести по формуле (3.9), она возрастет

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

Задача 3.7. Определить температуру самовоспламенения вещества 1-метил-4-этилбензола.

Решение.

1. Структурная формула вещества



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

2. 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

$$I_{cp} = \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{3} = 1,0.$$

3. По табл. 9 приложения определяем, что температура самовоспламенения равна 712 К.

Таблица 3.4

**Данные для расчета температуры
самовоспламенения вещества**

№ п/п	Горючее вещество	Структурная формула
1	1,3-диметил-4-пропил-бензол	$(CH_3)_2C_6H_3(C_3H_7)$
2	2-метил-3-этил-гексан	$C_3H_7CH(C_2H_5)CH(CH_3)CH_3$
3	1-метилбутанол	$C_3H_7CH(CH_3)OH$
4	Дифенилметан	$CH_2(C_6H_5)_2$
5	Толуол	$CH_3C_6H_5$
6	3,3-диметилпентан	$C_2H_5C(CH_3)_2C_2H_5$
7	Октан	C_8H_{18}
8	1,3-диметилбутанол-1	$CH_3CH(CH_3)CH_2CH(CH_3)OH$
9	Дифенилэтан	$C_2H_4(C_6H_5)_2$
10	1-метил-2-этил-4-пропилбензол	$(CH_3)(C_2H_5)(C_3H_7)C_6H_3$
11	3,3-диметил-пентанол-1	$C_2H_5C(CH_3)_2C_2H_4OH$
12	2-этил-3-метил-пентанол-1	$C_2H_5CH(CH_3)CH(C_2H_5)CH_2OH$
13	2,2-диметил-гексан	$C_4H_9C(CH_3)_2CH_3$
14	1,2-диметил-4-этилбензол	$C_6H_3(CH_3)_2(C_2H_5)$
15	2,3-диметил-пентан	$CH_3CH(CH_3)CH(CH_3)C_2H_5$
16	Метилдифенил-метан	$(CH_3)CH(C_6H_5)_2$
17	2-метил-пропанол-2	$(CH_3)_3COH$
18	3-метил-пентанол-2	$CH_3CH(OH)CH(CH_3)C_2H_5$
19	2,2,3,3-тетра-метилбутан	$CH_3C(CH_3)_2C(CH_3)_2CH_3$
20	2,3-диметил-октан	$CH_3CH(CH_3)CH(CH_3)C_5H_{11}$
21	4-метил-4-этилгептан	$C_3H_7C(CH_3)(C_2H_5)C_3H_7$
22	3-метил-пентанол-2	$C_2H_5CH(CH_3)CH(OH)CH_3$
23	1,2,3-триметил-гексано-1	$C_3H_7CH(CH_3)CH(CH_3)CH(CH_3)OH$
24	1,2,3,4-тетра-метилбензол	$C_6H_2(CH_3)_4$
25	2,3,4-триметил-5-этилдекан	$CH_3CH(CH_3)CH(CH_3)CH(CH_3)CH(C_2H_5)C_5H_{11}$
26	3,3-диметил-4,4-диэтил-нонан	$C_2H_5C(CH_3)_2C(C_2H_5)_2C_5H_{11}$
27	3,3-диметил-гептанол-2	$CH_3CH(OH)C(CH_3)_2C_4H_9$
28	2,2,4-триметил-пентан	$CH_3C(CH_3)_2CH_2CH(CH_3)CH_3$
29	3-метил-пентанол-1	$C_2H_5CH(CH_3)CH_2CH_2OH$

Задачи для самостоятельного решения

59. Рассчитать температуру самовоспламенения нормального бутилового спирта, вторичного бутилового спирта и третичного бутилового спирта. Сделать вывод о влиянии разветвления углеродной цепи на температуру самовоспламенения.

60. Определить температуру самовоспламенения этана, бутана, гексана, декана. Построить график зависимости температуры самовоспламенения от их положения в гомологическом ряду.

61. Определить температуру самовоспламенения веществ: 2-метил-4-изопропилгептана и 2-метил-4-изопропилгептанола. Сделать вывод о сравнительной пожарной опасности предельных углеводородов и предельных одноатомных спиртов.

62. Рассчитать температуру самовоспламенения веществ: толуола и 1,4-диизопропилбензола и сделать вывод о влиянии длины боковой цепи на сравнительную пожарную опасность ароматических соединений.

63. Рассчитать температуру самовоспламенения октана, октанола-1 и этилбензола и сделать вывод о влиянии строения вещества на их сравнительную пожарную опасность.

64. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения i -го вещества. Сравнить расчетное значение с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку расчета. Данные для расчета приведены в таблице 3.4.

4. ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ ВЗРЫВА. ТРОТИЛОВЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ

К показателям взрывоопасности веществ относятся такие параметры взрыва, как максимальное давление взрыва, тротилловый эквивалент взрывчатой системы или вещества, тротилловый эквивалент взрыва (мощность взрыва).

4.1. Расчет максимального давления взрыва

Максимальное давление взрыва – это давление, которое возникает в результате горения или детонации парогазовых смесей при условии реализации изохорно-адиабатического процесса.

Максимальное давление взрыва для парогазовых смесей углеводородных топлив рассчитывается по формуле:

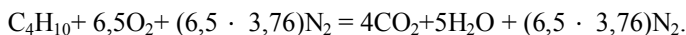
$$p_{\text{взр}}^{\text{max}} = \frac{P_o T_{\text{взр}} n_{\text{п.г.}}}{n_c T_o}, \quad (4.1)$$

где $p_{\text{взр}}^{\text{max}}$ – максимальное давление взрыва, Па; P_o, T_o, n_c – давление, температура, количество смеси до взрыва, соответственно, в Па, К, моль; $T_{\text{взр}}, n_{\text{п.г.}}$ – температура взрыва, количество продуктов горения, соответственно, в К, моль.

Задача 4.1. Рассчитать максимальное давление взрыва бутано-воздушной смеси стехиометрического состава. На момент взрыва давление и температура были близки к нормальным условиям ($P_o = 10^5$ Па, $T = 273$ К). Температура взрыва 2905 К.

Решение.

1. Определяем состав и объем исходной смеси и продуктов горения в соответствии с формулами п.п. 1 и 2. Запишем уравнение химической реакции:



Из уравнения реакции следует: количество исходной смеси стехиометрического состава равно 31,9 моль, количество продуктов сгорания 33,4 моль.

2. Рассчитываем максимальное давление взрыва бутано-воздушной смеси (формула (4.1)).

$$p_{\text{взр}}^{\text{max}} = \frac{P_o T_{\text{взр}} n_{\text{п.г.}}}{n_c T_o} = \frac{10^5 \cdot 2905 \cdot 33,4}{31,9 \cdot 273} = 11,14 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

3. Избыточное давление взрыва ΔP будет равно:

$$\Delta P = p_{\text{взр}}^{\text{max}} - 1 \cdot 10^5 \text{ Па} = 11,14 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5 = 10,14 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

4.2. Расчет тротилового эквивалента взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн

Тротиловый эквивалент вещества – это отношение теплоты взрыва 1 кг вещества (в смеси с окислителем) к теплоте взрыва 1 кг тротила (тринитротолуола).

Тротиловый эквивалент вещества рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{тит}} = \frac{Q_{\text{exp}}}{Q_{\text{тит}}}, \quad (4.2)$$

где η – тротиловый эквивалент парогазовой смеси Q_{exp} , $Q_{\text{тит}}$ – теплота взрыва вещества, кДж/кг; ($Q_{\text{тит}} = 4,187 \cdot 10^3$ кДж/кг – теплота взрыва тротила (тринитротолуола).

Тротиловый эквивалент взрыва (мощность взрыва) – это отношение энергии, выделившейся при взрыве, к теплоте взрыва 1 кг тротила.

Из определения тротилового эквивалента взрыва следует, что тротиловый эквивалент взрыва есть условное количество взорвавшегося тротила.

Тротиловый эквивалент взрыва (мощность взрыва) парогазовых смесей рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{тит}} = \frac{Q_{\text{exp}} \cdot m_y}{Q_{\text{тит}}}, \quad (4.3a)$$

или с учетом формулы (4.2):

$$M_{\text{тит}} = \eta \cdot m \cdot y, \quad (4.3б)$$

где $M_{\text{тит}}$ – масса условно взорвавшегося тротила; m – количество горючего вещества пожаровзрывоопасной смеси; y – доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию взрыва.

При взрыве парогазовой смеси углеводородных топлив в ограниченном объеме (помещении, оборудовании) коэффициент y принимается равным 1, при взрыве в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси) коэффициент y , как правило, принимают равным 0,4.

Размер безопасной зоны по действию давления воздушной ударной волны взрыва рассчитывают по формуле:

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{тит}}}, \quad (4.4)$$

где $R_{\text{без}}$ – безопасное расстояние по действию ударной волны взрыва, м; $M_{\text{тит}}$ – тротиловый эквивалент взрыва, кг.

Задача 4.2. Рассчитать тротиловый эквивалент взрыва бутана.

Решение.

1. Теплота взрыва бутана принимается равной его низшей теплоте сгорания. Значения $Q_{\text{н}}$ для бутана составляет $2,67 \cdot 10^3$ кДж/моль. При пересчете на 1 кг бутана теплота взрыва составит:

$$Q_{\text{взр}} = \frac{2,67 \cdot 10^3 \text{ кДж} / \text{моль}}{58 \cdot 10^{-3} \text{ кДж} / \text{моль}} = 46,10^3 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

2. Согласно соотношению (4.2), тротиловый эквивалент взрыва бутана в смеси стехиометрического состава будет равен:

$$\eta_{\text{тит}}^{C_4H_{10}} = \frac{46 \cdot 10^3}{4,187^3} = 10,9 \approx 11.$$

Задача 4.3. Рассчитать тротиловый эквивалент возможного аварийного взрыва 20 кг бутана с воздухом:

- а) в технологическом оборудовании;
- б) в облаке.

Решение.

1. Тротиловый эквивалент взрыва бутана в смеси стехиометрического состава равен 10,9 (задача 4.2).

2. Тротиловый эквивалент возможного аварийного взрыва при взрыве в технологическом оборудовании рассчитывается по формуле (4.3б) при условии $y = 1$:

$$M_{\text{тит}} = \eta \cdot m \cdot y = 10,9 \cdot 20 \cdot 1 = 220 \text{ кг (тротила)}.$$

3. Тротиловый эквивалент возможного аварийного взрыва при взрыве облака рассчитывается по формуле (4.3б) при условии $y = 0,4$.

$$M_{\text{тит}} = \eta \cdot m \cdot y = 10,9 \cdot 20 \cdot 0,4 = 90 \text{ кг (тротила)}.$$

Задача 4.4. Для случаев взрывов, рассмотренных в задаче 4.3, рассчитать безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны.

Решение.

1. Безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны при взрыве в технологическом оборудовании, согласно формуле (4.4), будет равно:

$$R_{\text{без}} = 15\sqrt[3]{M_{\text{шт}}} = 15\sqrt[3]{220} \approx 91 \text{ м.}$$

2. Безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны при взрыве облака, согласно формуле (4.4), будет равно:

$$R_{\text{без}} = 15\sqrt[3]{M_{\text{шт}}} = 15\sqrt[3]{90} \approx 67 \text{ м.}$$

Задачи для самостоятельного решения

65. Определить тротиловый эквивалент аварийного взрыва облака из смеси паров ацетона с воздухом и безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны взрыва. Концентрация паров горючего в смеси $0,2 \text{ кг/м}^3$. Объем облака 2500 м^3 .

66. Определить количество взорвавшихся паров бензола, если после аварии отмечены разрушения на расстоянии 100 м. от эпицентра взрыва. Взрыв произошел в помещении.

67. Рассчитать максимальное давление взрыва и безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны взрыва для парогазовоздушной смеси i -го вещества. При расчете максимальное давление взрыва принять давление и температуру до взрыва равным: $P_0 = 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 298 \text{ К}$.

68. Определить возможность разрушения металлического резервуара, рассчитанного на давление $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, при взрыве паров толуола.

69. Рассчитать максимальное давление взрыва и безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны взрыва для парогазовоздушной смеси i -го вещества. При расчете максимальное давление

взрыва принять давление и температуру до взрыва равным: $P_0 = 10^5$ Па, $T_0 = 298$ К.

70. Расчет безопасного расстояния выполнить как для условия взрыва в ограниченном объеме, так и для взрыва в открытом пространстве. Расчет выполнить для горючего вещества массой m_i (табл. 4.1)

Таблица 4.1

**Данные для расчета максимального давления взрыва
и безопасного расстояния по действию ударной воздушной
волны взрыва для парогазовоздушной смеси**

№ п/п	Горючее вещество	Химическая формула	Масса горючего, кг
1	Диметилвый эфир	C_2H_6O	10
2	Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	150
3	<i>n</i> -бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	15
4	Нитроэтан	$C_2H_5NO_2$	2
5	Оксид углерода	CO	3
6	<i>n</i> -пентан	C_5H_{12}	50
7	Пропан	C_3H_8	100
8	Сероводород	H_2S	20
9	Этилбензол	C_8H_{10}	15
10	Этилен	C_2H_2	120
11	Толуол	C_7H_8	80
12	Этиленгликоль	C_2H_6O	5
13	Этан	C_2H_6	60
14	Уксусно-бутиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	20
15	<i>n</i> -гексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	70
16	Уксусно-этиловый спирт	$C_4H_8O_2$	30
17	Метиловый спирт	CH_4O	130
18	Пропиловый спирт	C_4H_8O	30
19	Метан	CH_4	10
20	Глицерин	$C_3H_5(OH)_3$	25
21	Этиловый спирт	C_2H_5OH	75
22	Изобутан	C_4H_{10}	75
23	Аммиак	NH_3	200
24	<i>n</i> -гептан	C_7H_{16}	100
25	Анилин	C_6H_7N	250
26	<i>n</i> -гексан	C_6H_{14}	30

4.3. Определение взрывоопасности смеси горючих газов

Взрывы горючих газов на предприятиях относятся к наиболее опасным авариям и приводят, как правило, к групповому травматизму с тяжелыми последствиями. Наиболее распространенными горючими газами, которые могут выделяться на предприятиях в аварийных ситуациях и образовывать с воздухом взрывоопасные смеси, являются метан, оксид углерода, водород, этан, ацетилен. Пределы взрываемости в воздухе находятся: оксида углерода от 12,5 % до 75 %; водорода от 4,1 % до 74 %; этана от 3,2 % до 12,5 %; ацетилена от 3,0 % до 65 %. По мере снижения концентрации кислорода в газовой смеси (например, за счет добавки инертных газов) пределы взрываемости этих горючих газов уменьшаются.

Наиболее часто встречающаяся в шахтах метано-воздушная смесь взрывается при концентрации метана от 5 до 15 %. Смесь, содержащая до 5 % метана, не взрывчата, но может гореть при наличии источника высокой температуры. При концентрации метана более 15 % смесь не взрывчата и не поддерживает горения, а с притоком кислорода извне горит спокойным пламенем в зоне перемешивания этих газов. Наибольшей силы взрыв достигает при концентрации метана 9,5 %, так как в этом случае на его сжигание используется весь кислород воздуха. Температура взрыва метано-воздушной смеси может достигать 2650 °C, если взрыв произошел в замкнутом пространстве, и 1850 °C, если продукты взрыва могут свободно распространяться.

При перемешивании метана с воздухом концентрация кислорода в смеси снижается по линейной зависимости от 21 % (содержание кислорода в атмосферном воздухе) до 0 при 100 % содержании метана (рис. 4.1)

При концентрации метана от 5 % до 15 %, что соответствует содержанию кислорода в смеси от 18 % до 20 %, смесь горит и взрывается. Однако в реальных условиях шахты концентрация кислорода может быть существенно меньше обозначенных пределов из-за сорбции кислорода углем, поглощения при горении, а также образования и выделения инертных газов. Поэтому пределы взрываемости смесей метана с воздухом при различных концентрациях кислорода (C_k) можно определить по треугольнику взрываемости (рис. 4.1).

Треугольники взрываемости горючих газов строят по экспериментальным данным, полученным на лабораторной установке. Эксперименты, проведенные со смесями газов, показали, что взрывоопасные концентрации расположены в области, имеющей форму треугольника (область 2).

Из рис. 4.1 видно, что наблюдается постепенное сужение нижнего и верхнего концентрационного предела взрываемости смеси метана с воздухом вплоть до выхода в точку при объемной доле кислорода, равной 12,2 %. Это связано в цепным механизмом передачи теплового импульса зажигания. В области 3 для осуществления цепной реакции окисления недостаточно молекул метана, в области 4 – молекул кислорода.

Треугольник взрываемости» для других горючих газов имеет тот же вид, что и для метана, но различные размеры. Взрываемость смеси горючих газов при подземных пожарах также определяется с помощью «треугольника взрываемости». Нижний концентрационный предел взрываемости смеси горючих газов (в об. %) определяется по формуле, предложенной Ле Шателье:

$$N = \frac{100}{\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i}} \quad (4.5)$$

где n_1, n_2, \dots, n_i – объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов, %; N_1, N_2, \dots, N_i – нижние концентрационные пределы взрываемости каждого из этих компонентов, %.

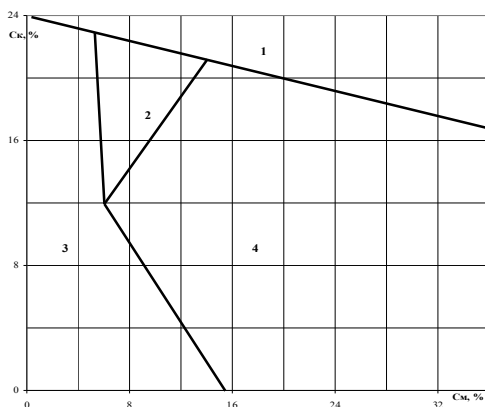


Рис. 4.1. Объемные пределы взрываемости метано-воздушных смесей:
1 – несуществующая смесь; 2 – взрывчатая смесь; 3 – невзрывчатая смесь; 4 – смесь, способная стать взрывчатой при добавлении воздуха

Объемное содержание каждого горючего компонента в смеси го-

рючих газов определяют по формуле

$$n_i = \frac{100C_i}{\sum_i^n C_i} \quad (4.6)$$

где C_i – концентрация соответствующего горючего газа в смеси с воздухом, %.

Формула Ле Шателье верна для большинства углеводородов. Однако для смесей, состоящих из сильно различающихся по структуре органических компонентов, применимость этой формулы ухудшается.

Для оценки взрываемости смеси горючих газов вначале определяется общее суммарное содержание горючих газов (%). Для наиболее распространенных в угольных шахтах горючих газов используется формула

$$C_z = C_m + C_o + C_g \quad (4.7)$$

где C_m, C_o, C_g – концентрация соответственно метана, оксида углерода и водорода, %.

Затем рассчитывают долю каждого горючего газа в смеси по выражениям:

$$P_m = C_m / C_z; P_o = C_o / C_z; P_g = C_g / C_z. \quad (4.8)$$

Правильность расчета проверяется по соотношению

$$P_m + P_o + P_g = 1 \quad (4.9)$$

По полученным данным выбирают соответствующий треугольник взрываемости. Затем концентрацию кислорода в смеси наносят на ось ординат, а сумму концентраций горючих газов на ось абсцисс на соответствующем графике (рис. 4.2–4.7) и в точке их пересечения определяют местонахождение данной смеси. В случае, если найденная точка находится внутри «треугольника взрываемости», то газовая смесь может взорваться при появлении источника огня или повышении температуры газа.

Так, произведенный отбор проб газа из атмосферы пожарного участка показал, что газовая смесь содержит кислорода (C_k) 15 %, оксида

углерода (C_o) 0 %, метана (C_m) 2,1 % и водорода (C_g).

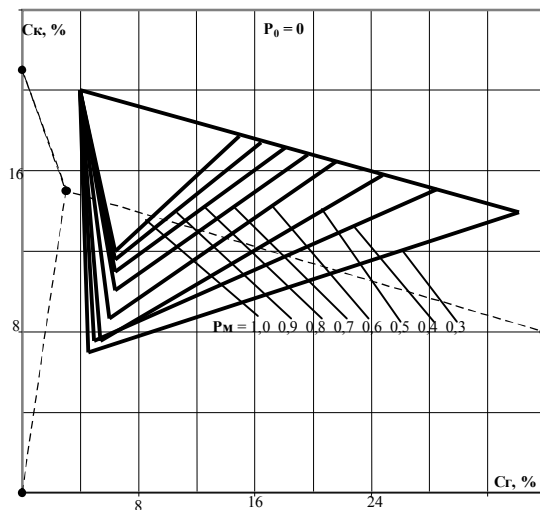


Рис. 4.2. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при отсутствии оксида углерода

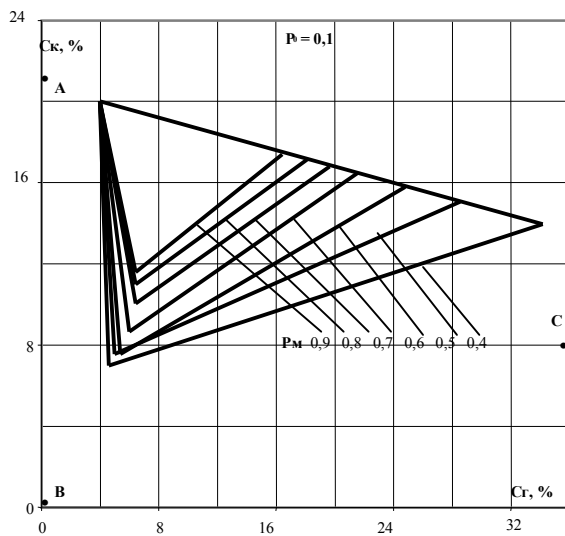


Рис. 4.3. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,1

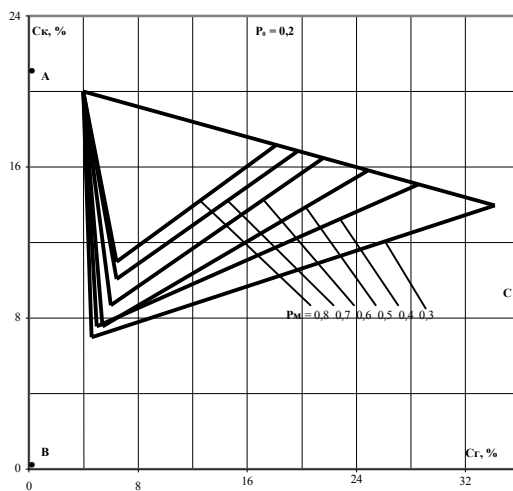


Рис. 4.4. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,2

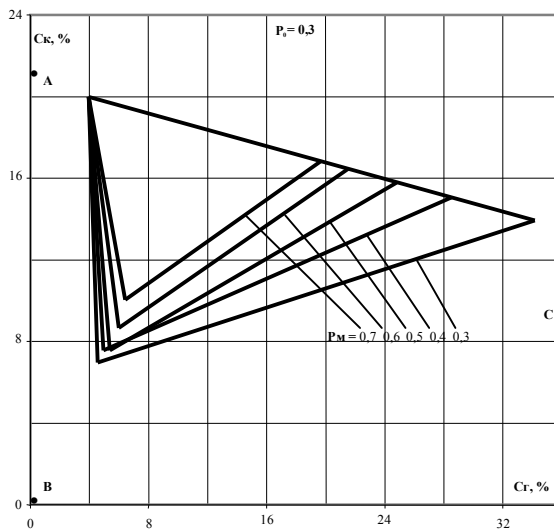


Рис. 4.5. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,3

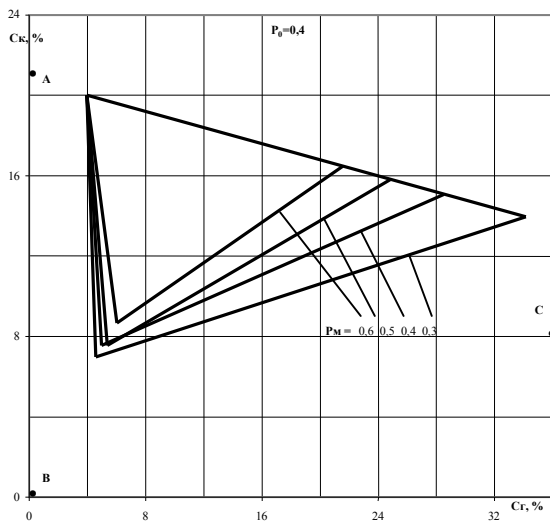


Рис. 4.6. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4

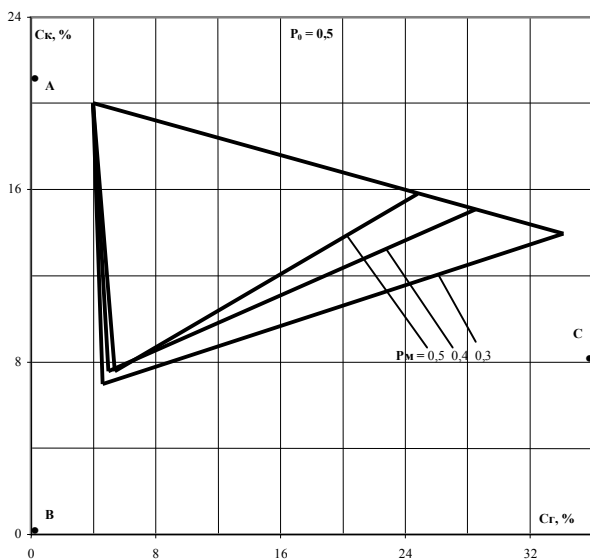


Рис. 4.7. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4

Затем по формуле (4.7) подсчитываем, что концентрация суммы горючих газов (C_g) равна 3,5 %. Доля оксида углерода в смеси горючих газов (P_o) равна 0, а доля метана P_m – составляет 0,6.

Исходя из расчетных данных, выбираем соответствующий треугольник взрываемости (рис. 4.2). Затем на оси графика рис. 4.2 наносим значения концентраций кислорода и суммы горючих газов и находим точку **X**, соответствующую состоянию атмосферы пожарного участка.

Из графика видно, что точка **X** расположена вне «треугольника взрываемости», поэтому на данный момент смесь горючих газов не может взорваться. Однако найденная точка находится вблизи нижнего концентрационного предела взрываемости смеси и незначительное изменение, способствующее увеличению концентрации горючих компонентов в рудничной атмосфере, может переместить точку **X** в зону взрываемости.

По графику расположения зоны взрываемости горючих газов можно определить, куда будет смещаться точка, отображающая соответствующую газовую смесь, в случае изменения концентрации составляющих ее компонентов (кислорода, горючих газов и инертных газов). Так, линия, соединяющая полученную точку **X** с точкой **A**, покажет, куда будет смещаться смесь в случае увеличения подачи свежего воздуха и, соответственно, роста в ней концентрации кислорода. Из рис. 7.2 видно, что добавление свежего воздуха приведет к снижению концентрации горючих газов и удалению смеси от треугольника взрываемости.

Перемещение точки **X** по линии, соединяющей ее с точкой **B**, происходит в случае, если в смесь газов будут добавляться инертные газы. С этой целью в опасную зону могут нагнетать азот, углекислый газ, аргон и другие газы, не поддерживающие горения в снижающие концентрации в смеси кислорода и горючих газов. Согласно рис. 4.2 такое воздействие также удаляет смесь от треугольника взрываемости, что уменьшает опасность взрыва смеси.

В случае дополнительного выделения горючих газов, приводящего к увеличению их концентрации в смеси, точка **X** отображающая состояние смеси газов, начнет перемещаться к точке **C**. Для приведенного на рис. 4.2 примера это означает входение в треугольник взрываемости и образование взрывчатой смеси. Увеличение концентрации горючих газов в рудничной атмосфере может происходить при изоляционных работах, снижении притока свежего воздуха при сохраняющейся интенсивности выделения горючих газов.

Таким образом, использование «треугольников взрываемости» в

шахтах при тушении пожаров позволяет не только оценить возможность взрыва образующейся смеси газов, но и проанализировать, как будет изменяться ситуация в пожарном участке в случае увеличения выделения горючих газов, повышения или снижения количества подаваемого свежего воздуха или при подаче инертных газов. Соответственно появляется возможность выбора наиболее эффективного способа предотвращения взрыва горючих газов.

Задача для самостоятельного решения

1. Из предложенных в табл. 4.2 вариантов выбирают заданный состав смеси газов, возникший в атмосфере пожарного участка.

По формулам (4.5) и (4.6) определяют нижний концентрационный предел взрываемости смеси этих горючих газов.

Затем по формуле (4.7) рассчитывают общее содержание горючих газов, а по формуле (4.8) долю каждого горючего газа в смеси. По формуле (4.9) проверяют правильность расчета.

2. По рассчитанным данным на рисунках 4.2–4.7 выбирают соответствующий доли оксида углерода треугольник взрываемости горючих газов и перечерчивают его в тетрадь.

3. Наносят на выбранный график заданную точку и определяют возможность взрыва смеси горючих газов.

4. Анализируют опасность взрыва в случае увеличения интенсивности выделения горючих газов, усиления проветривания свежим воздухом и при подаче инертных газов.

5. Выбирают оптимальный путь предотвращения взрыва смеси горючих газов.

Таблица 4.2

Исходные данные для оценки взрываемости смеси горючих газов при пожаре в шахте

№ п/п	Состав атмосферы пожарного участка, %			
	Кислород	Метан	Оксид углерода	Водород
1	2	3	4	5
1	17	4	0	0
2	8	6	2	12
3	10	7,2	1,8	9
4	16	1,9	0	1,9
5	12	8	1,6	6,4

Окончание табл.4.2

1	2	3	4	5
6	14	7	1	2
7	18	3,2	0	4,8
8	16	6,4	0,8	0,8
9	15	3	2	5
10	16	12	0	0
11	13	3,6	1,8	4,6
12	12	4	1,6	2,4
13	14	8	0	2
14	11	4,2	1,4	1,4
15	16	4,8	1,2	0
16	17	1,5	1,5	12
17	18	1,6	1,2	1,2
18	16	4	2,4	1,6
19	15	7,2	3,6	1,2
20	14	10,5	4,5	0
21	14	4,8	6,4	4,8
22	13	7,2	7,2	3,6
23	12	10	8	2
24	10	14,4	9,6	0
25	13	7,2	12	4,8
26	11	8	10	2
27	9	8	8	0
28	14	5	1	2
29	7	7	3	4
30	12	4	4	3

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1 а

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, °C	Теплосодержание, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
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	72,8
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	71,7	120,8	98,8	110,5
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	141,6
2700	97,9	92,6	93,1	101,5	124,8	147,3
2800	101,8	96,4	96,8	107,6	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

**Энтальпия (теплосодержание) газов
при постоянном давлении**

Температура, °C	Теплосодержание, кДж/ м ³ · 10 ⁻²					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
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	49,4	46,3	46,5	75,9	64,3	76,6
2500	40,0	38,0	38,3	62,1	51,4	61,7
2600	41,8	39,5	40,0	64,9	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

Внутренняя энергия

Температура, °C	Теплосодержание, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
100	2,2	2,1	2,1	2,9	2,5	3,3
200	4,1	4,1	4,1	6,3	5,1	6,8
300	6,6	6,3	6,4	10,0	7,0	10,7
400	9,1	8,5	8,6	14,6	10,7	14,9
500	11,5	10,7	10,9	18,1	13,6	19,1
600	14,1	13,1	13,3	22,5	16,7	23,5
700	16,7	15,5	15,7	27,0	20	28,1
800	19,4	18	18,1	31,6	23,3	32,7
900	22,1	20,5	20,7	36,3	27,7	37,3
1000	24,8	23	23,3	41,1	30,3	42
1100	27,7	25,7	26,0	46,0	34,1	46,8
1200	30,4	28,2	28,6	50,9	37,8	51,5
1300	33,2	30,9	31,3	56	41,8	56,4
1400	35,1	33,7	34,0	61,1	45,8	61,2
1500	39,0	36,3	36,7	66,1	49,8	65,9
1600	41,9	39,1	39,5	71,3	54,0	70,8
1700	44,9	41,8	42,3	76,4	58,3	75,7
1800	47,8	44,5	45,0	81,6	62,6	80,6
1900	50,8	47,3	47,8	86,8	67,0	85,4
2000	53,8	50,2	50,7	92,0	71,5	90,5
2100	56,7	52,9	53,5	97,2	75,9	95,2
2200	59,8	55,8	56,4	102,5	80,5	100,2
2300	62,9	58,7	59,3	107,8	85,1	105,1
2400	65,9	61,6	62,2	113,0	89,7	110,1
2500	69,1	64,3	65,1	118,3	94,3	115
2600	72,4	67,4	67,7	123,7	97,8	120,0
2700	75,5	70,2	70,7	128,9	102,4	124,9
2800	78,5	73,1	73,5	134,2	107,0	130,0
2900	81,0	76,4	76,9	139,7	111,7	134,7
3000	85,2	78,9	79,3	145,0	116,3	139,8

Продолжение прил.

Таблица 3

Теплота образования веществ

Вещество	Теплота образования, кДж/моль
Альдегид:	
муравьиный (ж)	121,1
уксусный (ж)	166,3
Аммиак (газ)	46,1
Анилин (ж)	29,7
Антрацен (тв)	–101,4
Ацетилен (газ)	–224,6
Ацетон (ж)	248,1
Бензол (ж)	–34,8
Бутадиен-1,3 (ж)	–104,3
<i>n</i> -бутан (газ)	132,4
<i>n</i> -бутан (ж)	153,8
Бутен-1 (газ)	6,3
Винилхлорид (газ)	–37,7
Винилхлорид (ж)	–17,2
Вода (ж)	286,6
Вода (газ)	242,2
<i>n</i> -гексан	167,2
<i>n</i> -гептан	239,7
Глицерин	675,4
Двуокись:	
серы	297,5
углерода	396,6
Диоксон (ж)	375,4
Дифенил (тв)	–80,4
Изобутан (ж)	159,2
Кислота:	
бензойная (ж)	394,3
масляная	525,0
муравьиная (ж)	419,0
олеиновая	625,1
пропионовая (ж)	458,4
стеариновая (тв)	937,7
уксусная (ж)	485,6
Метан	75,0
Мочевина	–
Нафталин	–62,8
Нитроэтан (ж)	144,1
Окись углерода	112,7
<i>n</i> -пентан (ж)	184,4
Пропан (газ)	109,4

Продолжение прил.
Окончание табл.3

1	2
Пропан (ж)	125,3
Сероводород	201,1
Серовуглерод (ж)	-88,0
Спирт:	
<i>n</i> -амиловый	359,1
<i>n</i> -бутиловый	341,5
<i>n</i> -гексиловый	385,1
метиловый (ж)	239,0
пропиловый (ж)	307,1
этиловый (ж)	278,2
Теофен	-81,7
Тетралин	81,7
Толуол (ж)	4,19
Фенол (тв)	171,4
Этан (газ)	88,4
Этилбензол (ж)	33,1
Этилен	-48,6
Этиленгликоль (ж)	455,4

Таблица 4

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Газы	Плотность по воздуху	Температура самовос- пламенения, К	Пределы воспламене- ния, %	
			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
Оксись углерода	0,967	883	12,5	74,0
Оксись этилена	1,5	702	3,0	80,0
Оксись пропилена	2,0	673	2,0	22,0
Пропан	1,56	739	2,1	9,5
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

Продолжение прил.

Таблица 5

Показатели пожарной опасности некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/	Температу- ра самовос- пламенения К	Температурные пределы воспламе- нения, К		Концентрацион- ные пределы воспламенения, К	
			нижний (темпера- тура вспышки)	верх- ний	нижний	верх- ний
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
Спирт:						
изоамиловый	816	628	310	335	1,07	5,0
бензиловый	1050	673	360	418	1,0	15,5
<i>n</i> -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
<i>n</i> -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
Стирол	902	803	299	332	1,08	6,2
Толуол	866	809	273	303	1,3	6,7
Этиленгликоль	1114	653	385	397	3,8	6,35
Эфир диэтиловый	713	437	228	386	1,7	49
Эфир уксусно- изоамиловый	870	703	276	330	0,2	4,35
Эфир уксусно-этиловый	881	673				

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

Гомологический ряд	Формулы $n=1, 2, 3, 4, \dots$	Параметры	
		k	l
Нормальные алканы	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6957}{0,7874}$	$\frac{73,8}{50,3}$
2-метилалканы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6885}{0,7900}$	$\frac{74,9}{52,2}$
Нормальные 1-алканы	$(\text{CH}_3)=\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6867}{0,7976}$	$\frac{74,5}{49,5}$
Нормальные жирные спирты	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	$\frac{0,5746}{0,6928}$	$\frac{33,7}{15,0}$
2-метилкарбинолы	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	$\frac{0,6582}{0,7278}$	$\frac{44,1}{21,5}$
n -алкилформиаты	$\text{HCOO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5359}{0,6050}$	$\frac{47,6}{25,0}$
n -алкилацетаты	$\text{CH}_3\text{COO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5940}{0,7761}$	$\frac{50,9}{40,8}$

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

Таблица 7

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								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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	263,6	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

Продолжение прил.

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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
ЭФИРЫ									
Стирол	266,0	303,8	317,6	332,8	342,5	355,0	374,3	395,5	418,2
Сероуглерод	199,2	228,3	238,7	250,5	257,7	267,9	283,4	301,0	319,5
Толуол	246,3	279,4	291,4	304,8	313,3	324,9	342,5	362,5	383,6
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- пропиловый	246,3	278,4	289,0	301,8	310,0	320,8	337,0	—	374,8
Уксусно- этиловый	229,6	259,5	270,0	282,1	289,6	300,0	315,0	332,3	350,1

Таблица 8

Температура самовоспламенения предельных углеводородов в зависимости от средней длины углеводородной цепи

ℓ_{cp}	$T_{св}, K$	ℓ_{cp}	$T_{св}, K$	ℓ_{cp}	$T_{св}, K$	ℓ_{cp}	$T_{св}, K$
1	2	1	2	1	2	1	2
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

Продолжение прил.
Окончание табл.8

1	2	3	4	5	6	7	8
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
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 9

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

$\ell_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}, K$	$\ell_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}, K$	$\ell_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}, K$
1	2	3	4	5	6
—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

Окончание табл.9

1	2	3	4	5	6
-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

Таблица 10

**Температура самовоспламенения некоторых предельных одно-
атомных спиртов в зависимости от средней
длины углеродной цепи**

$\ell_{\text{сп}}$	$T_{\text{св}}, K$	$\ell_{\text{сп}}$	$T_{\text{св}}, K$	$\ell_{\text{сп}}$	$T_{\text{св}}, K$	$\ell_{\text{сп}}$	$T_{\text{св}}, K$
1	2	3	4	5	6	7	8
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
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

Продолжение прил.

Таблица 11

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, $\times 10^{-5}$
1	2	3	4
h'_f	0,864	0,800	0,735
$h'\Phi$	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
$h''\Phi$	2,800	2,236	2,020
$h''C$	5,946	5,000	4,642
l	2	3	4
$h''H$	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

Таблица 12

Значения констант уравнения Антуана

Вещество	Хими- ческая формула	Моле- куляр- ная масса	Константы уравнения Антуана			Кoeffи- циент диффу- зии, см ² /с	Показа- тель «n» в уравнении (3.4 а)
			A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>n</i> -амилацетат	C ₇ H ₁₄ O ₂	130	7,17	1579,5	221,4	0,0520	1,87
Амилен	C ₅ H ₁₀	70,1	6,79	1014,3	229,8	0,0690	1,84
<i>n</i> -амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	88,2	7,18	1287,6	161,3	0,0661	1,87
Аммиак	NH ₃	17	—	—	—	0,198	1,88
Анилин	C ₆ H ₇ N	93,1	6,9	1457,0 2	176,2	0,0622	1,87
Ацетальдегид	C ₂ H ₄ O	44,1	7,19	1093,6	233,4	0,11	1,83
Ацетилен	C ₂ H ₂	26	—	—	—	0,18	1,79
Ацетон	C ₃ H ₆ O	58,1	7,25	1281,7	237,1	0,109	1,90
Бензол	C ₆ H ₆	78,1	6,49 6,98	902,28 1252,8	178,1 225,2	0,0775	1,86

*Продолжение прил.
Продолжение табл. 12*

1	2	3	4	5	6	7	8
Бутадиен 1,3	C ₆ H ₆	54,1	—	—	—	0,0806	1,82
<i>n</i> -бутан	C ₄ H ₁₀	58,1	—	—	—	0,0605	1,87
Бутен-1	C ₄ H ₈	56,1	—	—	—	0,0801	1,83
транс-Бутен-2	C ₄ H ₈	56,1	—	—	—	0,0801	1,82
<i>n</i> -бутилацета	C ₆ H ₁₂ O ₂	116	7,01	1340,8	199,8	0,06	1,87
<i>n</i> -бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	74,1	9,6	2664,7	279,7	0,068	1,86
Водород	H ₂	2,02	—	—	—	0,66	1,70
Винилхлорид	C ₂ H ₃ Cl	62,5	—	—	—	0,104	1,82
<i>n</i> -гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	227	6,79	1656,4	136,87	0,034	1,86
<i>n</i> -гексан	C ₆ H ₁₄	86,2	6,87	1166,3	223,66	0,066	1,55
<i>n</i> -гексиловый спирт	C ₆ H ₁₄ O	102	7,28	1420,2 7	165,47	0,059	1,87
<i>n</i> -гептан	C ₇ H ₁₆	100	6,95	1295,4	219,82	0,061	1,54
Гидразин	N ₂ H ₄	32,1	8,87	2266,5	266,32	0,17	1,86
Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	92,1	9,05	3074,2	214,71	0,08	1,9
<i>n</i> -декан	C ₁₀ H ₂₂	142	7,39	1809,9	227,7	0,05	1,45
Дивиниловый эфир	C ₄ H ₆ O	70,1	6,98	1055,3	228,6	0,077	1,84
Диметиловый эфир	C ₄ H ₆ O	46,1	—	—	—	0,108	1,85
Диметилформамид	C ₃ H ₇ NO	73,1	7,03	1482,9	204,34	0,089	1,87
Диоксан-1,4	C ₄ H ₈ O ₂	88,1	7,52	1632,4	250,73	0,076	1,85
Дифтордихлорметан	CF ₂ Cl ₂	121	—	—	—	0,081	1,81
1,2-дихлорэтан	C ₂ H ₄ Cl ₂	98,9	7,66	1640,2	259,72	0,08	1,86
Диэтиламин	C ₄ H ₁₁ N	73,1	7,22	1267,6	236,33	0,076	1,85
Диэтиловый эфир	C ₄ H ₁₀ O	74,1	6,99	1098,9	232,37	0,077	2,14
<i>n</i> -додекан	C ₁₂ H ₂₆	170	8,17	2463,7	253,88	0,04	1,88
Изобутан	C ₄ H ₁₀	58,1	—	—	—	0,082	1,87
Изобутилен	C ₄ H ₈	56,1	—	—	—	0,08	1,82
Изобутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	74,1	8,71	2058,4	245,64	0,08	1,87
Изопентан	C ₅ H ₁₂	72,2	6,79	1022,6	233,49	0,07	1,76
Изопропилбензол	C ₉ H ₁₂	120	6,94	1460,7	207,65	0,06	1,87
Изопропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	60,1	8,38	1733	232,38	0,083	1,9
<i>m</i> -ксилол	C ₈ H ₁₀	106	7,01	1461,9	215,07	0,067	1,87
<i>o</i> -ксилол	C ₈ H ₁₀	106	6,99	1474,7	213,69	0,07	1,88
<i>p</i> -ксилол	C ₈ H ₁₀	106	6,99	1454,3	215,41	0,07	1,87
Метан	CH ₄	16	—	—	—	0,196	1,76

Продолжение прил.
Продолжение табл. 12

1	2	3	4	5	6	7	8
Метиловый спирт	CH ₄ O	32	8,23	1660,5	245,82	0,129	1,08
Метилпропил-кетон	C ₅ H ₁₀ O	86,1	7,86	1870,4	273,2	0,07	1,86
Метилэтилкетон	C ₄ H ₈ O	72,1	7,02	1292,8	232,34	0,0760	1,86
Нафталин	C ₁₀ H ₈	128	10,5 6 7,68	3123,3 2206,7	243,57 245,13	0,0622	1,89
n-нонан	C ₉ H ₂₀	128	7,05	1510,7	211,5	0,05	1,57
Окись углерода	CO	28	—	—	—	0,15	1,72
Окись этилена	C ₂ H ₄ O	44,1	—	—	—	0,11	1,83
n-октан	C ₈ H ₁₈	114	1379 ,6	1379,6	211,89	0,05	1,77
n-гептадекан	C ₁₅ H ₃₂	212	1739 ,1	1739,1	157,55	0,04	1,90
n-Пентан	C ₅ H ₁₂	72,2	6,85	1062,6	231,81	0,07	1,83
*Пиколин	C ₆ H ₇ N	93,1	7,3	1632,3	224,79	0,08	1,88
*Пиридин	C ₆ H ₅ N	79,1	6,79	1217,7	196,34	0,08	1,87
Пропан	C ₃ H ₈	44,1	—	—	—	0,09	1,80
Пропилен	C ₃ H ₆	42,1	—	—	—	0,09	1,82
n-пропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	60,1	8,31	1751,9	225,13	0,08	1,88
Сероводород	C ₂ S	34,1	—	—	—	0,14	1,82
Сероуглерод	CS ₂	76,1	7	1202,5	245,62	0,09	1,69
Стирол	C ₈ H ₈	104	7,94	2113,1	272,99	0,07	1,88
Тетрагидрофуран	C ₄ H ₈ O	72	5,99	753,81	175,79	0,06	1,84
n-тетрадекан	H ₃₀	198	7,27	1950,5	190,51	0,04	1,89
Голуол	C ₇ H ₈	92,1	6,95	1345,1	219,52	0,08	1,65
n-тридекан	C ₁₃ H ₂₈	184	7,96	2468,9	250,31	0,04	1,89
2,2,4-триметилпентан	C ₈ H ₁₈	114	6,81	1259,2	221,09	0,04	1,86
Уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	60,1	—	—	—	—	2
Идеальный газ							
Уксусная кислота	C _{3,7} H _{7,4} O _{3,7}	111	7,79	1789,8	245,91	0,11	1,90
n-ундекан	C ₁₁ H ₂₄	153	7,68	2102,9	242,57	0,04	1,88
Формальдегид	CH ₂ O	30	6,28	607,4	197,63	0,15	1,81
Фталевый ангидрид	C ₈ H ₄ O ₃	148	7,99	2879,1	277,5	0,06	1,9
Фтортрихлор-метан	CCl ₃ F	137	—	—	—	0,06	1,83
Хлорбензол	C ₆ H ₅ CL	113	7,26	1607,3	235,35	0,06	2,09
Хлорэтан	C ₂ H ₅ CL	64,5	6,82	954,12	229,55	0,09	1,82
Циклогексан	C ₆ H ₁₂	84,2	6,65	1095,5	210,06	0,06	1,89

Продолжение приложения.

Продолжение табл. 12

1	2	3	4	5	6	7	8
Этан	C_2H_6	30,1	—	—	—	0,12	1,78
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	88,1	6,99	1200,1	214,26	0,07	1,89
Этилбензол	C_8H_{10}	106	6,96	1425,5	213,35	0,07	1,87
Этилен	C_2H_4	28,1	—	—	—	0,11	1,80
Этиленгликоль	$C_2H_5O_2$	62,1	9,01	2753,2	252,01	0,09	1,87
Этиловый спирт	C_2H_6O	46,1	8,68	1918,5	252,13	0,11	1,51
Этилцеллозоль	$C_4H_{10}O_2$	90,1	8,74	2392,6	273,15	0,07	1,86
Бензин А-72 (зимний) ГОСТ 2084-67	$C_{6,991}H_{13,108}$	97,2	5,07	682,88	222,07	–60-85	2
Бензин АИ-93 (летний) ГОСТ 2084-67	$C_{7,024}H_{13,706}$	98,2	4,99	664,98	221,7	–60-95	2
Бензин АИ-93 (зимний) ГОСТ 2084-67	$C_{6,911}H_{12,168}$	95,3	5,14	695,02	223,22	–60-90	2
Бензин авиационный Б-70 ГОСТ 1012-72	$C_{7,267}H_{14,796}$	102	8,42	2629,7	384,2	–40-110	2
Дизельное топливо «З» ГОСТ 305-73	$C_{12,343}H_{23,88}$	172	5,95	1255,7	199,52	40-210	2
Дизельное топливо «Л» ГОСТ 305-73	$C_{14,511}H_{29,12}$	204	5,88	1314,04	192,47	60-240	2
Керосин осветительный КО-20 ГОСТ 4753-68	$C_{13,595}H_{26,86}$	192	5,69	1211,7	194,68	40-240	2
Керосин осветительный КО-22 ГОСТ 4753-68	$C_{10,914}H_{21,832}$	153	6,47	1394,7	204,26	40-190	2
Керосин осветительный КО-25 ГОСТ 4753-68	$C_{11,054}H_{21,752}$	155	6	1223,9	203,34	40-190	2
Ксилол (смесь изомеров) ГОСТ-9410-71	$C_{7,99}H_{9,98}$	106	7,05	1478,2	220,54	0-50	2
Уайт-спирит ГОСТ 3134-52	$C_{10,5}H_{21,0}$	147	8,01	2218,3	273,15	20-80	2

*Окончание прил.
Окончание табл. 12*

1	2	3	4	5	6	7	8
Масло АМТ-300 ТУ 38-1Г-1-68	$C_{21,74}H_{42,28}$ $S_{0,04}$	313	6,99	2240	167,85	170-376	2
Масло АМТ-300Т ТУ 38 10142-72	$C_{19,04}H_{24,58}$ $S_{0,196}N_{0,07}$	260	6,49	2023,8	164,09	171-396	2
Растворитель М (<i>n</i> -бутилацетат-30; этилацетат-5; этиловый спирт-60; изобутиловый спирт-5)	$C_{2,761}H_{7,147}$ $O_{1,187}$	59,4	8,93	2083,6	267,74	0-50	2
Растворитель РМЛ ТУКУ 467-56 (толуол-10; этиловый спирт-64; <i>n</i> -бутиловый спирт-10; этилцеллозольв-16)	$C_{2,645}H_{5,910}$ $O_{1,038}$	55,2	9,57	2487,7	290,92	0-50	2
Растворитель РМЛ-218 МРТУ6-10-729-68 (<i>n</i> -бутилацетат-9; этилацетат-16; ксилол -21,5; толуол-21,5; этиловый спирт-16; <i>n</i> -бутиловый спирт-3; этилцеллозольв-13)	$C_{4,791}H_{8,318}$ $O_{0,971}$	81,5	8,08	1761	251,55	0-50	2
Растворитель РМЛ-215 ТУ6-10-1013-70 (<i>n</i> -бутилацетат-18; ксилол -25; толуол-25; <i>n</i> -бутиловый спирт-15; этилцеллозольв-17)	$C_{5,962}H_{9,779}$ $O_{0,845}$	95,0	7,71	1699,7	241	0-50	2
Растворитель Р-4 (<i>n</i> -бутилацетат-12; толуол-62; ацетон-26)	$C_{5,452}H_{7,606}$ $O_{0,535}$	81,7	7,17	1373,7	242,83	-15-100	2
Растворитель Р-4 (ксилол -15; толуол-70; ацетон-15)	$C_{6,231}H_{7,798}$ $O_{0,223}$	86,3	7,15	1415,2	244,75	-15-100	2

Библиографический список

1. Лопанов, А.Н. Физико-химические основы теории горения и взрыва: учебное пособие / А.Н. Лопанов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 149 с.
2. Кумагаи С. Горение. Перевод с японского С.К. Орджоникидзе, Б.С. Ермолаева. – 1979. – 256 с.
3. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир. – Изд. 2. – 1968. – С. 263–267.
4. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука.–1980.–478 с.
5. Эммануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. Изд. 2. М.: Высш. Школа. – 1969. – 432 с.
6. Андросов А.С., Салеев В.П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва»: Учеб. Пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 80 с.
7. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения. – М.: ВИПТШ, 1984. – 268 с.
8. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Химия, 1973. – 272 с.
9. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М.: Химия. – 1975. – 584 с.
10. Лопанов, А. Н. Взрывы и взрывчатые вещества: монография / А. Н. Лопанов; БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. – 516 с.
11. Марков В. Ф., Маскаева Л. И., Миронов М. П., Пазникова С. Н. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Учебное пособие для курсантов, студентов и слушателей образовательных учреждений МЧС России /под Ред. В.Ф. Маркова. Екатеринбург: УрО РАН. – 2009. – 274 с.
12. Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян; Юргинский технологический институт.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.-108 с.

Учебное издание

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Методические указания к проведению практических занятий
для студентов направления бакалавриата 280700 – Техносферная
безопасность

Составители: **Лопанов** Александр Николаевич
Фанина Евгения Александровна
Прушковский Игорь Валентинович

Подписано в печать 28.10.13. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 6,1.
Тираж 130 экз. Заказ Цена
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46