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

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	
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	
Библиографический список	

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 двуокиси 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:

$$\frac{\phi_{N_2}}{\phi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3,76,\tag{1.1}$$

где ${\phi_{N_2}}, {\phi_{O_2}}$ — соответственно объемное, % (об.), содержание азота и кислорода в окислительной среде.

Следовательно, на $1 \, \text{m}^3$ (кмоль) кислорода в воздухе приходится 3,76 $\, \text{m}^3$ азота. Массовое соотношение азота и кислорода в воздухе составляет 23,3 $\, \text{WO}_2$ и 76,7 $\, \text{W}$ N₂. Его можно определить, исходя из выражения:

$$\frac{\varphi_{N_2} M_{N_2}}{\varphi_{O_2} M_{O_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3,29,$$
(1.2)

 $M_{
m N_2}, M_{
m O_2}$ – молекулярные массы соответственно азота и кислорода.

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.).

Tаблица 1.1 Типы горючих веществ и формулы для расчета объема воздуха при их горении

Тип горючего вещества	Расчетные формулы		Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{ m B}^{\ 0} = rac{n_{ m O_2} + n_{ m N_2}}{n_{ m r}}$	(1.3 a)	<u>кмоль</u> ; кмоль
	$V_{_{\mathrm{B}}}^{^{\mathrm{o}}} = \frac{\left(n_{_{\mathrm{o}_{2}}} + n_{_{_{\mathrm{N}_{2}}}}\right) \cdot V_{_{0}}}{n_{_{\mathrm{f}}} M_{_{\mathrm{f}}}}$	(1.3 б)	$\frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$
Вещество сложного состава	$V_{\rm B}^{0} = 0.269 \cdot (\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8})$	(1.4)	<u>кмоль</u> кмоль
Смесь газов	$V_{_{\rm s}}^{^{0}} = \frac{\sum \varphi_{\rm r_i} n_{_{\rm O_{2_i}}} - \varphi_{_{\rm O_2}}}{21}$	(1.5)	$\frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$

Примечание. Здесь $V_{_{\rm B}}^{0}$ — теоретическое количество воздуха $n_{_{\rm T}}$, $n_{_{O_2}}$, $n_{_{V_2}}$ — количество горючего, кислорода и азота, получаемого из уравнения химической реакции горения, кмоль; $M_{_{\rm T}}$ — молекулярная масса горючего; $V_{_{0}}$ — объем 1 кмоль газа при нормальных условиях (22,4 $^{\rm M}3$); С. Н. S. О —массовое содержание соответствующих элементов в составе горючего, %; $^{\Phi_{\Gamma_i}}$ — концентрация i-го горючего компонента, % (об.); $^{\Phi_{O_2}}$ — концентрация кислорода в составе горючего газа, % (об.); $^{n_{O_2}}$ — 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

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \tag{1.6}$$

где $P_{\scriptscriptstyle 0}$ — нормальное давление, Па; $T_{\scriptscriptstyle 0}$ — нормальная температура, К; $V_{\scriptscriptstyle 0}$ — объем воздуха при нормальных условиях; $P_{\scriptscriptstyle 1}V_{\scriptscriptstyle 1}T_{\scriptscriptstyle 1}$ — соответственно давление, объем и температура воздуха, характеризующие заданные условия горения.

Практическое количество воздуха $V_{\rm B}$ – объем воздуха, фактически поступивший в зону горения. Отношение практического объема воздуха к теоретическому называется коэффициентом избытка воздуха α

$$\alpha = \frac{V_{\text{\tiny B}}}{V_{\text{\tiny B}}^{\circ}} \tag{1.7}$$

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется избытком воздуха $\Delta V_{\scriptscriptstyle R}$:

$$\Delta V_{\scriptscriptstyle \rm B} = V_{\scriptscriptstyle \rm B} - V_{\scriptscriptstyle \rm B^0} \tag{1.8}$$

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

$$\Delta V_{\scriptscriptstyle B} = V_{\scriptscriptstyle B}^{\scriptscriptstyle 0} (\alpha - 1) \tag{1.9}$$

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

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{o_2} V_{\Pi,\Gamma}^0}{V_B^0 \left(21 - \varphi_{o_2} \right)}$$
 (1.10)

где $^{\phi_{o_2}}$ — концентрация кислорода в продуктах горения, % (об.); $V_{\text{п.г}}^{\circ}$ — теоретический объем продуктов горения.

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

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{o_2}} \tag{1.11}$$

В случае образования продуктов неполного сгорания (СО, Н₂, СН₄ и др.) формула (1.11) приобретает вид:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \phi_{o_2} + 0.5\phi_{co} + 0.5\phi_{H_2} + 2\phi_{CH_4}}$$
(1.11 a)

где ϕ_{o_2} , ϕ_{co} , $\phi_{e_{H_2}}$, $\phi_{ce_{H_4}}$ — 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:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{o_2} V_{\Pi,\Gamma}^0}{V_{B}^0 (\varphi_{o_2}^0 - \varphi_{o_2})}$$
 (1.12)

и соответственно формулу (1.11)

$$\alpha = 1 + \frac{\phi_{o_2}^0}{\phi_{o_2}^0 - \phi_{o_2}}$$
 (1.13)

где $\phi^{_0}_{_{0_2}}$ — исходное содержание кислорода в окислительной среде, % (об.); $V^{_0}_{_{\Pi,\Gamma}}$ — объем окислительной среды.

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

$$m_{_{\rm B}} = V_{_{\rm B}} \rho_{_{\rm B}} \tag{1.14}$$

где $\rho_{\rm B}$ – плотность воздуха, $\kappa \mathcal{E}/M^3$.

Тогда

$$\rho_{\rm B} = \frac{\varphi_{\rm N_2} M_{\rm N_2} + \varphi_{\rm O_2} M_{\rm O_2}}{V_{\rm o}} \cdot \frac{P T_{\rm o}}{P_{\rm o} T_{\rm i}}$$
(1.15)

После подстановки постоянных значений в формулу (1.15) получим

$$\rho_{\rm B} = 3{,}47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} \tag{1.16}$$

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

Задача 1.1. Определить теоретические массу и объем воздуха, необходимого 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

$$CH_4 + 2O_2 + 2 \cdot 3,76N_2 = CO_2 + 2H_2O + 2 \cdot 3,76N_2$$

Из уравнения находим $n_{_{\mathrm{O}_{2}}}=2; n_{_{\mathrm{N}_{2}}}=2\cdot3,76=7,52; \ n_{_{\mathrm{CH}_{4}}}=1,$ тогда $V_{_{B}}^{^{0}}=\frac{2+7,52}{1}=9,52\ {_{\mathrm{M}_{_{3}}}^{^{3}}}/_{_{\mathrm{M}_{1}}}\ {_{\mathrm{KMOЛЬ}}}/_{\mathrm{KMOЛЬ}}$

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

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

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

$$C_6H_6 + 7,5O_2 + 7,5 \cdot 3,76N_2 = 6CO_2 + 3H_2O + 7,5 \cdot 3,76N_2$$

найдем
$$n = 1; n_{O_2} = 7,5; n_{N_2} = 7,5 \cdot 3,76 = 28,2.$$

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

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

$$V_B^0 = \frac{(7,5+28,2)22,4}{1.78} = 10,3 \text{ M}_{K\Gamma}^3$$

Задача 1.3. Определить объем и массу воздуха, необходимого для горения 1 кг органической массы состава: C-60%, H-5%, O-25%, N-5%, W-5% (влажность), если коэффициент избытка воздуха $\alpha=2,5$; температура воздуха 305 K, давление 99 500 Па.

Решение. Так как горючее вещество сложного состава, то теоретическое количество воздуха при нормальных условиях определим по формуле (1.4):

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

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

$$V_B = \alpha V_B^o = 2,5 \cdot 5,9 = 14,75 \,\text{M}^3 / \text{K}\Gamma$$

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

$$\begin{split} V_{{\scriptscriptstyle B(PT)}} = & \frac{14,75 \cdot 101325 \cdot 305}{99500 \cdot 273} = 16,8 \text{ M}^3 / \text{kg} \,, \\ m_{{\scriptscriptstyle B(PT)}} = & V_{{\scriptscriptstyle B}} \rho_{{\scriptscriptstyle B}} = 16,8 \cdot 1,28 \cdot \frac{99500 \cdot 273}{305 \cdot 101325} = 18,9 \text{ kg} / \text{kg} \,. \end{split}$$

Задача 1.4. Определить объем воздуха, необходимого для горения 5 м³ 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:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O;$$

 $C_2H_2 + 2.5O_2 = 2CO_2 + H_2O;$
 $CO + 0.5O_2 = CO_2,$

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

Для горения 5 м 3 газовой смеси необходимый теоретический объем воздуха составит $V_B^0=5\cdot 5, 7=28,5$ м 3 . Практическое количество воз-

духа:
$$V_B^0 = 1,8 \cdot 32,5 \text{ м}^3$$
.

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.

CH₃COOH + 2O₂ + 2·3,76N₂ = 2CO₂ + 2H₂O + 2·3,76N₂;

$$V_B^0 = \frac{(2+2\cdot3,76)\cdot22,4}{1\cdot60} = 3,6 \text{ M}^3/_{K\Gamma}$$

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 $1 \, \mathrm{m}^3$ аммиака, если в продуктах горения содержание кислорода составило $18 \, \%$.

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

$$NH_3 + 0.75O_2 + 0.75 \cdot 3.76N_2 = 0.5N_2 + 1.5H_2O + 0.75 \cdot 3.76N_2$$

Тогда

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

Для определения коэффициента избытка воздуха по формуле (1.10) необходимо рассчитать теоретическое количество продуктов горения 1 м^3 аммиака, (1.14):

$$V_{\Pi.\Gamma}^0 = \frac{1,5+0,5+0,75\cdot 3,76}{1} = 4,8 \text{ M}_{\text{M}^3}^3.$$

Коэффициент избытка воздуха

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

Объем воздуха, участвующего в процессе горения 1 м^3 аммиака, определим по формуле (1.7)

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

Задача 1.7. Определить объем окислительной среды, состоящей из 60 % O_2 и 40 % N_2 , необходимый для горения 1 кг изопропилового спирта, если ее температура равна 295 K, 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

$$C_3H_7OH + 4.5O_2 + 4.5 \cdot 0.67N_2 = 3CO_2 + 4H_2O + 4.5 \cdot 0.67N_2$$

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

$$V_{o.c}^0 = \frac{(4,5+4,5\cdot0,67)22,4}{1\cdot60} = 2.8 \text{ M}^3/\text{K}\Gamma.$$

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

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

Задача 1.8. Определить массу динитротолуола ${\rm C_7H_6(NO_2)_2}$, 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).

$$C_7H_6(NO_2)_2 + 6.5O_2 + 6.5 \cdot 3.76N_2 = 7CO_2 + 3H_2O + N_2 + 6.5 \cdot 3.76N_2$$

Молекулярная масса горючего 182. Теоретический объем воздуха

$$V_B^0 = \frac{(6.5 + 6.5 \cdot 3.76)22.4}{1.182} = 3.8 \text{ M}_{K\Gamma}^3$$

Теоретический объем продуктов горения (формула (1.14)):

$$V_{\Pi.\Gamma}^{0} = \frac{(7+3+1+6,5\cdot3,76)22,4}{1\cdot182} = 4,4 \text{ M}^{3}/_{\text{K}\Gamma};$$

$$\alpha = 1 + \frac{12\cdot4,4}{3,8(21-12)} = 2,55.$$

Практический объем воздуха, пошедшего на горение

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

Тогда массу сгоревшего динитротолуола $m_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ определим из соотношения

$$m_{\Gamma} = \frac{V_{\Pi}}{V_{R}} = \frac{100}{9,7} = 10,3$$
 кг.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить массу и объем (теоретический) воздуха, необходимого для горения 1 кг метилового, этилового, пропилового и амилово-

го 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 %, H 8 %, O 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 м 3 генераторного газа состава: CO 29 %, H $_2$ 14 %, CH $_4$ 3 %, CO $_2$ 6,5 %, N $_2$ 45 %, O $_2$ 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 %, $C_4H_{10}-45$ % O_2-30 %, N_2-10 %, 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 K, давление 10^5 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 $180 \,\mathrm{m}^3$.
- 12. Сколько антрацита (принять, что содержание углерода равно 100~%) сгорело в помещении объемом $150~\text{m}^3$, 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

Таблица 1.2 Данные для расчета объема и массы окислительной среды, необходимые для горения 1-го горючего вещества

№	Горючее веще-	Химическая	Кол-во	Состав окис-	Условия горе-
п/п	ство	формула	горючего	лительной	ния
1	2	3	4	среды 5	6
1	Метиловый спирт	CH ₃ OH	2 кг	Воздух	T = 300 K P = 101325 Па
2	Анилин	C ₆ H ₇ N	5 кг	02-70 %	$\alpha = 3$ $T = 290 \text{ K}$
				Продолже	ние табл. 1.2
1	2	3	4	5	6
3	Смесь газов	$CO - 45 \%$ $N_2 - 15 \%$ $C_4H_8 - 10 \%$ $O_2 - 30 \%$	3 m ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 1.8$
4	Нитробензол	C ₆ H ₅ NO ₂	30 кг	Воздух	T = 280 K $P = 98000\Pi a$ $\alpha = 2.5$
5	Сложное вещество	C - 65 % O - 20 % H - 5 % S - 10 %	200 г	Воздух	Нормальные $\alpha = 1.4$
6	Этилен	C_2H_4	5 м ³	O ₂ - 25 % N ₂ - 75 %	Нормальные $\alpha = 2,5$
7	Сера	S	2 кг	$\begin{array}{c} N_2 - 75 \% \\ O_2 - 60 \% \\ N_2 - 40 \% \end{array}$	$T = 350 \text{ K}$ $P = 120000 \text{ Πa}$ $\alpha = 1.8$
8	Сложное вещество	C – 90 % H – 3 % N – 5 % O – 2 %	1 кг	Воздух	$T = 300 \text{ K}$ $P = 95000 \text{ Ha}$ $\alpha = 1.5$
9	Смесь газов	$CH_4 - 15\%$ $C_3H_8 - 70\%$ $O_2 - 10\%$ $H_2 - 5\%$	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 K $P = 92000 \text{ \Pi a}$ $\alpha = 1.5$
12	Муравьиная кислота	CH_2O_2	5 кг	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,2$
13	Диметиловый	$(CH_3)_2O$	10 кг	Воздух	T=282 K

	эфир				Р=101600 Па
	эфпр				$\alpha = 4.2$
14	Смесь	H ₂ S – 25 %	15 м ³	Воздух	Нормальные
	газов	$SO_2 - 15 \%$			$\alpha = 1.4$
		$CO_2^2 - 15 \%$,
		$H_2 - 30 \%$			
		$0_2 - 15 \%$			
15	Сложное	C – 82 %	0,7 кг	Воздух	T = 260 K
	вещество	H – 8 %			P = 110000 Πa
		W – 10 %			$\alpha = 1.4$
16	Глицерин	$C_3H_8O_3$	1 кг	Воздух	T = 305 K
					P = 101300 Πa
17		6.11	150	Gl 10.0/	$\alpha = 1.9$
17	Ацетилен	C_2H_2	150 л	Cl ₂ – 18 %	Нормальные
20	M	CHO	<i>5</i>	$N_2 - 82 \%$	$\alpha = 1.8$
20	Метилэтил кетон	C ₄ H ₈ O	5 кг	Окончан	ше табл. 1.2
1	2	3	4	5	6
18	Смесь	$CH_4 - 30 \%;$	3 m ³	Воздух	Нормальные
	газов	$0_2 - 8\%$;			$\alpha = 3.2$
		$N_2 - 15\%$;			
19	D	H ₂ – 47 %	<i>5</i>	D	T = 270 K
19	Этиловый	$C_4H_8O_2$	5 кг	Воздух	P = 85000 Ha
	эфируксусной кислоты				$\alpha = 1.5$
21	Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	7 кг	Воздух	$\alpha = 1.5$ T = 305 K
21	илоросизол	C6115C1	/ Ki	Воздух	P = 1000 Па
					$\alpha = 2.8$
22	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	1 кг	02 - 25 %	T = 280 K
	1 ,	- / / - 2		$N_2^2 - 75 \%$	Р = 98000 Па
				-	$\alpha = 1.4$
23	Смесь	NH ₃ – 25 %	200 л	Воздух	Нормальные
	газов	$C_4H_{10} - 25 \%$			$\alpha = 1.8$
		$C_4H_8 - 15 \%$			
		$CO_2 - 30 \%$			
		$0_2 - 5 \%$			
24	Бутиловый	$C_4H_{10}O$	4 кг	Воздух	T=265 K
	спирт				P=120000 Па
25	П	C II D	2	0 (5.0)	$\alpha = 1.8$
25	Дибром-	$C_6H_{12}Br_2$	3кг	O ₂ - 65 %	T = 280 K P = 98000 Па
	гексан			$N_2 - 35 \%$	$\alpha = 1.7$
26	Сложное	C – 70 %;	15кг	Воздух	$\alpha = 1,7$ T = 285 K
20	вещество	S - 5%;	1311	Воздух	P = 100000 Па
		H – 5 %			$\alpha = 2.8$
		O – 20 %			
27	Смесь	$C_3H_8 - 10 \%$	10 м ³	Воздух	Нормальные
	газов	CO – 79 %			$\alpha = 3.5$
		$H_2 - 5 \%$			
1		$0_{2} - 5 \%$		I	I

	$N_2 - 10 \%$		

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

$$V_{\scriptscriptstyle \Pi,\Gamma} = V_{\scriptscriptstyle \Pi,\Gamma}^{\scriptscriptstyle 0} + \Delta V_{\scriptscriptstyle B} \tag{1.24}$$

$$V_{IJIM} V_{IJJ} = V_{IJJ}^{O} + V_{B}^{O} (\alpha - 1)$$
 (1.25)

Таблица 1.3 Расчетные формулы для определения объема продуктов горения

Тип горючего	Расчетные формулы	Размерность
вещества		
Индивидуальное	$V_{n.r} = \frac{\sum n_{n.r}}{n_{r}}$ $V_{n.r}^{0} = \frac{V_{0} \sum n_{n.r_{l}}}{n_{r} M}$ (1.17)	$\frac{M^3}{M^3}$; $\frac{KMOЛЬ}{KMOЛЬ}$
Вещество сложного состава	$V_{co_2} = 1,86 \frac{c}{100} $ $V_{H_2o} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} $ $V_{So_2} = 0,7 \frac{s}{100} $ $V_{N_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{0}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] $ (1.21)	$\frac{M^3}{K\Gamma}$; $\frac{KMOЛЬ}{K\Gamma}$
Смесь газов	$V_{n,r}^{0} = \sum V_{n,r_{I}} $ $V_{n,r_{I}} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{n,r_{I}} \varphi_{r_{I}}}{n_{r_{I}}} + \sum \varphi_{n,r_{I}} \right] $ (1.23)	$\frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}$; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

Примечание. Здесь $V^{_0}_{_{\!I\!I\!I}}$ – теоретический объем продуктов горения; $n_{_{\!I\!I\!I\!I}}$ – количество i-го продукта горения в уравнении реакции, кмоль; n_r – количество горючего,

 V_{0} — объем одного кмоля газа; М — молекулярная масса горючего; $V_{n.r_{I}}$ — объем i-го продукта реакции; С, H, S, O, N, W — содержание соответствующих элементов (углерода, водорода, серы, кислорода, азота) и влаги в горючем веществе, % (вес); φ_{ij} — содержание горючего компонента в газовой смеси, % (об.); $\varphi_{n.r_{i}}$ — содержание негорючего компонента в составе газовой смеси, % (об.).

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

$$\phi_{\Pi.\Gamma_{i}} = \frac{V_{\Pi.\Gamma_{i}}}{\sum V_{\Pi.\Gamma_{i}}} \cdot 100, \tag{1.26}$$

где ϕ_{Π,Γ_i} — содержание i-го компонента в продуктах горения, об. %; V_{Π,Γ_i} — объем i-го компонента, M^3 , кмоль; $\sum V_{\Pi,\Gamma_i}$ — полный объем продуктов горения, M^3 , кмоль.

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

$$V_{o_2} = 0.21 \Delta V_{\scriptscriptstyle B} \tag{1.27}$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0.79 \Delta V_B \tag{1.28}$$

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

$$V_{N_2}^0 = 0.79 V_B^0 \tag{1.29}$$

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

$$C_2H_2 + 2.5O_2 + 2.5\cdot3.76N_2 = 2CO_2 + H_2O + 2.5\cdot3.76N_2.$$

Объем продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{\Pi.\Gamma}^0 = \frac{2+1+2,5\cdot3,76}{1} = 12,4 \text{ M/M}^3.$$

Объем продуктов горения при 1450 К

$$V_{\Pi.\Gamma(PT)}^0 = \frac{12,4\cdot1450}{273} = 65,9 \text{ M}^3/\text{M}^3.$$

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

$$C_6H_5OH + 7O_2 + 7 \cdot 3,76N_2 = 6CO_2 + 3H_2O + 7 \cdot 3,76N_2$$
.

Молекулярная масса горючего 98.

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{II.\Gamma}^0 = \frac{\left(6+3+7\cdot3,76\right)22,4}{1\cdot98} = 8,1 \text{ M}^3/\text{K}\Gamma.$$

Практический объем воздуха при нормальных условиях (1.25)

$$V_{\Pi,\Gamma}^{0} = 8,1 + \frac{(7+7\cdot3,76)\cdot(1,5-1)}{1\cdot98}22,4 = 11,9 \text{ M}^{3}/\text{K}\Gamma.$$

Объем продуктов горения при заданных условиях

$$V_{\Pi.\Gamma(P.T)}^0 = \frac{11,9 \cdot 101325 \cdot 1200}{95000 \cdot 273} = 55,9 \text{ M}^3/_{\text{K}\Gamma}.$$

Задача 1.11. Определить объем продуктов горения при сгорании 1 кг органической массы состава: C-55%, O-13%, H-5%, S-7%, N-3%, W-17%, если температура горения 1170 K, коэффициент избытка воздуха -1,3.

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

$$V_{\text{CO}_2} = 1.86 \frac{55}{100} = 1.0 \,\text{M}^3 / \text{KT};$$

$$V_{\text{H,0}} = 11.2 \frac{5}{100} + 1.24 \frac{17}{100} = 0.6 + 0.2 = 0.8 \,\text{M}^3 / \text{K}\Gamma;$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0.7 \frac{7}{100} = 0.05 \,\text{M}^3 / \text{K}\Gamma;$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[7.55 + 21(5 - \frac{17}{8}) + 2.63.7 + 0.8.3 \right] = 4.7 \,\text{M}^3 / \text{K}\Gamma.$$

Полный теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{\Pi,\Gamma}^0 = 1 + 0.8 + 0.05 + 4.7 = 6.55 \text{ M}^3 / \text{K}\Gamma$$

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{\Pi.\Gamma} = 6,55 + 0,269 \cdot (\frac{55}{3} + 5 + \frac{7 - 13}{8}) \cdot (1,3 - 1) = 6,55 + 1,8 = 8,35 \text{ M}^{3}/\text{K}\Gamma.$$

Практический объем продуктов горения при температуре горения:

$$V_{\Pi.\Gamma(pm)} = \frac{8,35 \cdot 1170}{273} = 35,8 \text{ M}^3/\text{KG}.$$

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 K, коэффициент избытка воздуха 2,8. Температура окружающей среды 298 K.

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

$$C_3H_6 + 4,5O_2 + 4,5 \cdot 3,76N_2 = 3 CO_2 + 3H_2O + 4,5 \cdot 3,76N_2;$$

 $C_3H_8 + 5O_2 + 5 \cdot 3,76N_2 = 3CO_2 + 4H_2O + 5 \cdot 3,76N_2;$

Объем продуктов горения определим по формуле (1.23):

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

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):

$$V_{\text{N}_2}^{\text{O}} = 0.79 \frac{4.5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} = 13.2 \,\text{M}^{3} / \text{M}^{3}.$$

Теоретический объем продуктов горения

$$V_{\Pi.\Gamma}^{O} = 2,45+2,4+13,2=18,05$$
 $M_{M^3}^{3}$

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

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

Объем продуктов горения при температуре 1300 К

$$V_{\Pi.\Gamma(pm)} = \frac{42,05 \cdot 1300}{298} = 183,4 \text{ M}^3 / \text{M}^3.$$

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:

$$\mathrm{CH_3COC_2H_5} + 5,5\mathrm{O_2} + 5,5\cdot 3,76\mathrm{N_2} = 4\mathrm{CO_2} + 4\mathrm{H_2O} + 5,5\cdot 3,76\mathrm{N_2},$$
 $V_{\mathrm{CO_2}} = 4$ кмоль; $V_{\mathrm{H_2O}} = 4$ кмоль; $V_{\mathrm{N_2}} = 20,7$ кмоль; $\Sigma V_{^{\mathit{\Pi}.\mathit{Fi}}} = 28,7$ кмоль.

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: C-85 %, H-15 %, если температура горения 1450 K, коэффициент избытка воздуха 1,9.

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

$$\begin{split} V_{_{\mathrm{N}_{2}}} = &1,\!86\frac{85}{100} = 1,\!6\,\mathrm{M}^{^{3}}\!\!/_{\mathrm{K}\Gamma};\; V_{_{\mathrm{H}_{2}\mathrm{O}}} = \!11,\!2\frac{15}{100} = \!1,\!7\,\mathrm{M}^{^{3}}\!\!/_{\mathrm{K}\Gamma};\\ V_{_{\mathrm{N}_{2}}} = &\frac{1}{100}(7\cdot85 + 21\cdot15) = 9,\!1\,\mathrm{M}^{^{3}}\!\!/_{\mathrm{K}\Gamma}. \end{split}$$

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

$$V_{II.\Gamma}^{O} = 1,6+1,7+9,1=12,4 \text{ M}^{3}/_{K\Gamma}$$

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

$$V_{II.\Gamma} = 12,4+0,269 \cdot (\frac{85}{3}+15) \cdot (1,9-1) = 12,4+10,5 = 22,9 \text{ M}^3/\text{K}\Gamma$$

Объем продуктов горения при температуре 1450 К

$$V_{\Pi.\Gamma(pm)} = \frac{22,9 \cdot 1450}{273} = 121,7 \text{ M}^3/_{\text{K}\Gamma}.$$

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

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

Задача 1.15. Определить количество сгоревшего ацетона, кг, если объем выделившейся двуокиси углерода, приведенный к нормальным условиям, составил 50 m^3 .

Решение. Запишем уравнение реакции горения ацетона в воздухе

$$CH_3COCH_3 + 4O_2 + 4\cdot3,76N_2 = 3CO_2 + 3H_2O + 4\cdot3,76N_2.$$

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:

$$m_{r} = \frac{50.58}{3.22,4} = 43,2$$

Задача 1.16. Определить количество сгоревшей органической массы состава: $C-58\,\%,\,O-22\,\%,\,H-8\,\%,\,N-2\,\%,\,W-1\,0\,\%$ в помещении объемом 350 м³, если содержание двуокиси углерода составило 5 %.

Решение. Определим объем выделившейся двуокиси углерода

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{BLUZ}} = 350 \cdot 0.05 = 17.5_{\text{M}^3}$$

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

$$V_{\text{co}_2} = 1,86 \cdot \frac{58}{100} = 1,1 \,\text{M}^3 / \text{K}\Gamma.$$

Определим количество сгоревшего вещества

$$m_{r} = \frac{17,5}{1,1} = 15,9$$
 Kr.

Задача 1.17. Определить время, когда содержание двуокиси углерода в помещении объемом 480 м 3 в результате горения древесины (С – 45 %, H–50 %, O – 42 %, W – 8 %) составило 8 %, если удельная массовая скорость выгорания древесины 0,008 кг/(м 2 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:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{8.480}{100} = 38.4_{\text{M}^3};$$

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

$$m_{r} = \frac{38,4}{1,86 \cdot 0,45} = 46$$
 Kr.

Время горения определим, исходя из соотношения

$$\tau = \frac{m_{\Gamma}}{U_{M}F},$$

где τ — время горения; $m_{\scriptscriptstyle T}$ — масса выгоревшей древесины, кг; $U_{\scriptscriptstyle M}$ — массовая скорость выгорания древесины, кг/(м 2 с); F— поверхность горения, м 2 ;

$$\tau = \frac{46}{0,008 \cdot 38} = 151 \ c = 2,5$$
 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 т молекулярной массы горючего.
- 16. Определить объем и состав продуктов горения 10 кг древесины состава С 49 %, H 6 %, O 44 %, N 1 %, если температура горения 1250 K, коэффициент избытка воздуха 1,6.
- 17. Сколько продуктов горения, приведенных к нормальным условиям, образуется в результате сгорания 25 м 3 газовой смеси состава H_2

- -45 %, $C_4H_{10}-20$ %, CO-5 %, NH_3-15 %, O_2-15 %, если горение протекало при коэффициенте избытка воздуха, равном 3,2?
- 18. Определить, сколько сырой нефти состава: $C-85\,\%$, $H-10\,\%$, $S-5\,\%$ 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 CO_2 в помещении объемом 300 м³ в результате горения гексанола с поверхности 8 м² составит 7 %? Массовая скорость выгорания гексана 0,06 кг/(м² ·c).
- 20. Определить содержание SO_2 , % (об.), в помещении объемом 1200 м³ при горение нефти состава: С 82 %, H -8 %, S 10 % со скоростью выгорания 0,4 кг/(м² ·c) с площади 5 м² на 4-й минуте пожара.
- 21. Определить объем выделившихся на 5-й минуте после воспламенения продуктов горения газовой смеси состава: C_2H_2-30 %, H_2-22 %, 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 м³/с, температура газа 295 К.
- 22. Рассчитать объем образующихся продуктов, $м^3$, и содержание в них азота, % (об.), при горении і-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

$N_{\underline{0}}$	Горючее	Химическая	Кол-во	Состав окис-	Условия горе-
п/п	вещество	формула	горючего	лительной	кин
				среды	
1	2	3	4	5	6
1	Диэтиловый	$(C_2H_5)_2O$	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1500 \text{ K}$
	спирт				$P = 101400\Pi a$
					$\alpha = 2.5$
2	Уксусная кисло-	$C_2H_4O_2$	5 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1200 \text{ K}$
	та				P = 98000Πa
					$\alpha = 2.6$
3	Сплав	Mg – 20 %	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 2800 \text{ K}$
		Al – 80 %			P = 95000Πa
					$\alpha = 1.6$
4	Смесь	CH ₄ -20 %	1 м ³	Воздух	$T_{\Gamma} = 1480 \text{ K}$
	газов	$C_3H_8 - 65 \%$			$P = 101300\Pi a$
		O ₂ -15 %			$\alpha = 2,4$

5	Октиловый	$C_8H_{18}O$	10 кг	Воздух	T _Γ =1320 K
	спирт				Р=102000 Па
					$\alpha = 2.5$
6	Сложное	C – 90 %	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1320 \text{ K}$
	вещество	H – 5 %			Р = 97000 Па
		O – 5 %			$\alpha = 1.6$
7	Смесь	NH ₃ -10 %	1 м ³	Воздух	T _г = 1600 K
	газов	$C_4H_{10}-80 \%$			$P = 101300 \; \Pi a$
		$N_2 - 7 \%$			$\alpha = 1,2$
		$O_2 - 3 \%$			
8	Анилин	C_6H_7N	1 кг	Воздух	T _Γ =1550 K
					Р=94000 Па
					$\alpha = 1.7$

Окончание табл.1.4

1	2	3	4		6
1		-		5	_
9	Диэтиловый	$(C_2H_5)_2O$	25 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1600 \text{ K}$
	эфир				P = 101300Πa
					$\alpha = 1.4$
10	Смесь	CO -70 %	1 м ³	O ₂ -42 %	$T_{\Gamma} = 1400 \text{ K}$
	газов	$C_3H_8 - 25\%$		$N_2 - 58 \%$	P = 101300 Πa
		$O_2 - 5 \%$			$\alpha = 2.5$
11	Сложное	C – 70 %	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1300 \text{ K}$
	вещество	H – 6 %			P = 97000Πa
		O – 14 %			$\alpha = 1,3$
		W – 10 %		_	
12	Смесь	CH ₄ – 60 %	1 м ³	Воздух	$T_{\Gamma} = 1500 \text{ K}$
	газов	CO ₂ – 30 %			P = 101300 Πa
		H ₂ -10 %			$\alpha = 1,2$
13	Диметиловый	$(CH_3)_2O$	10 кг	O ₂ -30 %	$T_{\Gamma} = 1800 \text{ K}$
	эфир			N ₂ -70 %	Р = 87000 Па
L					$\alpha = 1.8$
14	Глицерин	$C_3H_8O_3$	1 кг	O ₂ -27 %	$T_{\Gamma} = 1600 \text{ K}$
				$N_2 - 73 \%$	P = 101300Πa
					$\alpha = 2.1$
15	Сложное	C – 80 %	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1350 \text{ K}$
	вещество	H – 12 %			P = 99000Πa
		O – 8 %			$\alpha = 1.8$
16	Смесь	$C_2H_6 - 60 \%$	1 <i>m</i> ³	Воздух	$T_{\Gamma} = 165 \text{ K}$
	газов	$C_3H_8 - 30 \%$			P = 101300 Πa
		$H_2 - 5 \%$			$\alpha = 2.6$
1.7		O ₂ -5 %			T 1400 **
17	Метилэтил	C ₄ H ₈ O	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1480 \text{ K}$
	кетон				P = 91000 Па
10		0	4		$\alpha = 1.7$
18	Сложное	C – 60 %	4 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1210 \text{ K}$
	вещество	H – 7 %			P = 101300Πa
		O – 21 %			$\alpha = 1.4$
10	***	W – 12 %	2	D	T 1240 10
19	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	2кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1340 \text{ K}$
					$P = 100000\Pi a$
20	C	NIII 40.0/	1 2	D	$\alpha = 2.6$
20	Смесь	NH ₃ – 40 %	1 м ³	Воздух	$T_{\Gamma} = 1800 \text{ K}$
	газов	$C_3H_8 - 40\%$			P = 101300 Πa
		$H_2 - 10\%$			$\alpha = 1,7$
21	П	O ₂ -10 %	1	0 50.04	T 1400 T
21	Дибром-	$C_6H_{12}Br_2$	1 кг	O ₂ – 50 %	$T_{\Gamma} = 1400 \text{ K}$
	гексан			$N_2 - 50 \%$	Р = 92000 Па
22	π	CH (NO.)	1	D	$\alpha = 2.3$
22	Динитро-	$C_6H_4(NO_2)_2$	1 кг	Воздух	$T_{\Gamma} = 1650 \text{ K}$
	бензол				P = 81000 Πa
					$\alpha = 1,1$

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

$$Q_{\alpha} - Q_{\alpha} = Q_{\alpha}$$

где $Q_{\text{--}}$ – высшая теплота сгорания; $Q_{\text{--}}$ – низшая теплота сгорания; $Q_{\text{---}}$ – теплота испарения воды, образующейся при сгорании вещества.

Таблица 1.5 Расчетные формулы для определения низшей теплоты сгорания веществ

Тип горючего	Расчетные формулы	Размер-
вещества		ность
Индивидуальные вещества	$Q_{ij} = \sum (n_i \Delta H_i - n_j \Delta H_j) $ (1.30)	кДж/моль
Вещества сложного состава	$Q_{*=339,4\text{C}+1257\text{H}-108,9(\text{O}-\text{S})-25,1(9\text{H}+\text{W})}$ (1.31)	кДж/кг
Смесь газов	$Q_{\scriptscriptstyle H} = \frac{1}{100} \sum_{i} Q_{\scriptscriptstyle H_i} \varphi_{\Gamma_i} \tag{1.32}$	кДж/моль; кДж/м ³

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; О — сумма кислорода и азота, % (вес); Q_{ii} — низшая теплота сгорания i-го горючего компонента газовой смеси, кДж/кмоль; ϕ_{Γ_i} — содержание i-го горючего компонента в газовой смеси, % (об.)

Расчет теплоты сгорания газовоздушных смесей проводят по формуле:

$$Q_{\scriptscriptstyle H}^{\scriptscriptstyle CM} = \frac{1}{100} Q_{\scriptscriptstyle H} \phi_{\scriptscriptstyle \Gamma} \tag{1.33}$$

где $Q_{_H}^{^{cw}}$ — теплота сгорания газовоздушной смеси, кДж/м³, кДж/кмоль; $Q_{_H}$ — низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³, кДж/кмоль; $\phi_{_{\Gamma}}$ — концентрация горючего в смеси с окислителем, % (об.).

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении равна

$$q = Q_{\scriptscriptstyle H} U_{\scriptscriptstyle M} \tag{1.34}$$

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

$$q_{\scriptscriptstyle \Pi} = Q_{\scriptscriptstyle H} U_{\scriptscriptstyle M} F \tag{1.35}$$

где q_{π} – интенсивность тепловыделения, кВт; F – площадь горения, м 2 .

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

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

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

$$Q_H = \frac{792, 6 \cdot 10^3}{60} = 13210 \text{ K/J/K/K}$$

Задача 1.19. Рассчитать низшую теплоту сгорания органической массы состава: C - 62 %, H - 8 %, O - 28 %, S - 2 %.

Решение. $Q_{^{_{\mathit{H}}}}=339,462+1257\cdot 8-108,9(28-2)-25,1\cdot 9\cdot 8=26460$ 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
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	75	$Q_{H} = 1.396,9 + 2.242,2 - 75 = 806,3$
$C_4H_{10} + 6,5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	132,4	$Q_{H} = 4 \cdot 396,9 + 5 \cdot 242,2 - 132 = 2666,1$
$H_2S + 1,5O_2 = H_2O + SO_2$	201,1	$Q_{\rm H} = 242,2 + 297,5 - 201,1 = 338,6$
NH ₃ +0,75O ₂ =1,5H ₂ O+0,5N ₂	46,1	$Q_{H} = 1.5 \cdot 242.2 - 46.1 = 317.2$

По формуле (1.32) определим теплоту сгорания газовой смеси

$$Q_{H} = \frac{1}{100} (806, 3.40 + 2666, 1.20 + 338, 6.5 + 317, 2.10)10^{3} = 1278, 5.10^{3} \text{ K/J/k/kmojib}.$$

Для определения теплоты сгорания 1 м^3 газовой смеси необходимо полученное значение разделить на объем, занимаемый 1 кмоль газа при стандартных условиях ($24,4 \text{ м}^3$):

$$Q_H = \frac{1278, 5 \cdot 10^3}{24.4} = 57076 \text{ K/J/m/}_{M^3}.$$

Задача 1.21. Рассчитать теплоту сгорания 1 м^3 стехиометрической гексановоздушной смеси.

Решение. Находим стехиометрический состав горючей смеси по уравнению реакции горения

$$C_6H_{14} + 9,5O_2 + 9,5\cdot 3,76N_2 = 6CO_2 + 7H_2O + 9,5\cdot 3,76N_2.$$

Весь объем вступивших в реакцию компонентов $(1+9,5+9,5\cdot3,76)$ принимаем за 100 %, а количество горючего (1 кмоль) будет соответствовать стехиометрической концентрации:

$$\phi_{\Gamma} = \frac{1.100}{1 + 9.5 + 9.5 \cdot 3.76} = 2,2\%.$$

Теплоту сгорания 1 м³ гексана определим по формуле (1.30)

$$Q_{_H}$$
 =6 · 396,9+7 · 242,2 - 167,2 = 3909,6 кДж/моль;
$$Q_{_H} = \frac{3909,6}{24,4} 10^3 = 160,2 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Объем одного кмоль газа при стандартных условиях равен 24,4 м³. Теплоту сгорания 1 м³ стехиометрической гексановоздушной смеси определим по формуле (1.33):

$$Q = \frac{160, 2 \cdot 10^3 \cdot 2, 2}{100} = 3525 \text{ K/J/K/}_{\text{M}^3}.$$

Задача 1.22. Определить интенсивность тепловыделения на пожаре органической массы (состав в примере 2), если скорость выгорания $0.015~{\rm kr/(m^2 c)}$, а площадь пожара $150~{\rm m^2}$.

Решение. Согласно формуле (1.35)

$$q_{\pi} = 26460 \cdot 0.015 \cdot 150 = 59.5 \cdot 10^3 \text{ kBt} = 59.5 \text{ MBt}$$

Задачи для самостоятельного решения

- 23. Определить низшую теплоту сгорания 1 м³ этана, пропана, бутана, пентана и гексана. Построить зависимость $Q_{^H}$ 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 так-

же 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~%, H-8~%, O-43~%. Какова удельная интенсивность тепловыделения на пожаре, если массовая скорость выгорания составляет $0.01~\text{кг/(м}^2\cdot\text{c})$?
- 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/(м 2 ·c). Построить график зависимости $Q_{^{_{\it H}}}$ 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: CO - 15 %, C₄H₈ - 40 %, O₂ - 20 %, H₂ -14 %, CO₂ 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

$$Q_{H} = \sum_{i=1}^{n} C_{p(V)i} V_{H.T_{i}} (T_{r} - T_{o})$$
(1.36)

При этом адиабатическая температура горения

$$T_{r}^{*} = T_{o} + \frac{Q_{H}}{\sum C_{p(V)i} V_{\Pi, F_{i}}^{o}}, \qquad (1.37)$$

а действительная температура горения

$$T_{r} = T_{o} + \frac{Q_{n.r}}{\sum C_{p_{i}} V_{n.r_{i}}}, \qquad (1.38)$$

где T_r^* и T_r — соответственно адиабатическая и действительная температуры горения; T_o — начальная температура; V_{n,r_i} — практический объем i-го продукта горения; V_{n,r_i}^o — теоретический объем i-го продукта горения; Q_n — низшая теплота горения вещества; $Q_{n,r}$ — теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения; C_{v_i} — теплоемкость i-го продукта горения при постоянном объеме; C_n — теплоемкость i-го продукта горения при постоянном давлении.

При этом

$$Q_{\pi \Gamma} = Q_{H}(1 - \eta), \qquad (1.39)$$

где $^{\eta}$ — доля теплопотерь 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.

Tаблица 1.7 Определение температуры горения

№ п/п	Определяемые параметры	Примечание
1	2	3
1	Объем и состав продуктов горения	$V_{_{\it{\Pi}.\it{\Gamma}}}$ (п.1.2) кмоль/кмоль, м 3 /кг
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплопотерь)	$Q_{_{\Pi.\Gamma}}{}_{_{\mathbf{H.H.H}}}Q_{_{\Pi.\Gamma}}{}_{(\Pi.1.3)}$ кДж/кмоль, кДж/кг

3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{cp} = \frac{Q_{H(B,T)}}{\sum V_{B,T_l}} $ (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)	– Окончание табл. 1.7
1	2	3
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 1 а или 1 б приложения)	$Q_{n.r} = \sum H_i V_{n.r_i} $ (1.41)
6	E сли $Q_{\Pi,\Gamma}$, $Q_{H(\Pi,\Gamma)}$, T_0 T_2 , T_1 (в том случае, если $Q_{\Pi,\Gamma}$, $Q_{H(\Pi,\Gamma)}$, T_0 T_2 , T_1	H_{i} – энтальпия $\emph{i-}$ го продукта горения; \emph{V}_{i} – объем $\emph{i-}$ го продукта горения
7	$Q_{\scriptscriptstyle \Pi.\Gamma}^{}$ по формуле (1.41)	_
8	Расчет проводим до получения $Q_{_{\Pi,\Gamma}}, Q_{_{H(\Pi,\Gamma)}}, Q_{_{\Pi,\Gamma}}$ неравенства	-
9	Температура горения	$T_{r} = T_{1} + \frac{(Q_{H(\Pi,\Gamma)} - Q_{\Pi,\Gamma}^{*})(T_{2} - T_{1})}{Q_{\Pi,\Gamma}^{*} - Q_{\Pi,\Gamma}^{*}}$

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/(м 3 К).

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 K

$$T_{r} = T_{o} + \frac{Q_{H}}{\sum C_{P_{i}}^{*} V_{\Pi.F_{i}}}, \qquad (1.43)$$

где $C_{r_i}^*$ – теплоемкость і
–го продукта горения при 1500 К, табл. 1.8.

Tаблица 1.8 Теплоемкость некоторых продуктов горения

Вещество	Теплоемкость		
Вещество	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(πap)	1,78	$39,87 \cdot 10^{-3}$	
N_2	1,42	$31,81 \cdot 10^{-3}$	
Воздух	1,44	$32,26 \cdot 10^{-3}$	

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

$$C_2H_5OH + 3O_2 + 3 \cdot 3,76N_2 = 2CO_2 + 3H_2O + 3 \cdot 3,76N_2.$$

Следовательно, продукты горения состоят из:

$$V_{{
m CO}_2}$$
 = 2 моль, $V_{{
m H}_2{
m O}}$ = 3 моль, $V_{{
m N}_2}$ = 11,28 моль, $V_{{
m \it H},{\it T}}$ = 16,28 моль.

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

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

$$Q_{\text{H}} = 2 \cdot 396.9 + 3 \cdot 242.2 - 278.2 = 1242.2 \text{ кДж/моль.}$$

3. Средняя энтальпия продуктов горения

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

- 4. Так как величина $H_{_{^{op}}}$ выражена в кДж/моль, по табл. 1 а приложения выбираем, ориентируясь на азот, первую приближенную температуру горения $T_{_{1}}$ = 2100 °C.
- 5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2100 °C по формуле (1.41):

$$Q_{\Pi,\Gamma} = 114, 7 \cdot 2 + 93, 4 \cdot 3 + 70, 4 \cdot 11, 28 = 1303, 7$$
 K/JK/MOJIB

- 6. Сравниваем $Q_{_{H}}$ и $Q_{_{\Pi,\Gamma}}$ так как $Q_{_{\Pi,\Gamma}}$ \rangle $Q_{_{H}}$, выбираем температуру горения, равную 2000 °С.
 - 7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2000 °C:

$$Q_{\scriptscriptstyle B.F}^{\cdot} = 108,6 \cdot 2 + 88,1,6 \cdot 3 + 66,8 \cdot 11,28 = 1235$$
кДж/моль.

8. Так как $Q_{_{\!H,\Gamma}}$ < $Q_{_{\!H}}$ < $Q_{_{\!H,\Gamma}}$, определим температуру горения по формуле (1.42):

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

Задача 1.24. Определить адиабатическую температуру горения органической массы, состоящей из C-60%, H-7%, O-25%, W-8%.

Решение.

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

$$V_{\text{CO}_2} = 1.86 \frac{60}{100} = 1.12 \,\text{M}^3 / \text{K}_{\Gamma};$$

$$V_{\text{H,0}} = 11.2 \frac{7}{100} + 1.24 \frac{8}{100} = 0.88 \,\text{M}^3 / \text{K}_{\Gamma};$$

$$V_{\rm N_2} = \frac{1}{100} 7.60 + 2(7 - \frac{25}{8}) = 5.01 \,\text{M}^3/\text{K}\Gamma.$$

Общий объем продуктов горения равен $V_{II.T}^0 = 7,01 \text{ M}^3 / \text{кг}$.

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

$$Q_H = 339, 4.60 + 1157.7 - 108, 9.25 - 25, 1(9.7 + 8) = 23958, 4 \frac{\kappa \text{M/k}}{\text{K}\text{T}}$$

3. Определим среднюю энтальпию продуктов горения

$$H_{CP} = \frac{23958, 4}{7.01} = 3417, 7 \text{ K/Jac/M}^3.$$

- 4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м³, первую приближенную температуру выбираем по табл. 1б приложения, ориентируясь на азот. Принимаем $T_{\rm I} = 2100~{\rm ^{\circ}C}$.
- 5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2100 °C по формуле (1.41):

$$Q_{II.I} = 5118, 2 \cdot 1, 12 + 4166, 1 \cdot 0, 88 + 3142, 9 \cdot 5, 01 = 25144, 5$$

- 6. Из сравнения $Q_{n,r}(Q_{n,r}(Q_{n,r}))$ выбираем вторую приближенную температуру, равную 1900 °C.
 - 7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1900 °C:

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

8. Так как $Q_{_{\Pi,\Gamma}}^{^{*}} < Q_{_{\Pi,\Gamma}}$ определим температуру горения:

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

Задача 1.25. Рассчитать действительную температуру горения фенола ($^{\Delta H}_{_{ofp}}$ = 4,2 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:

$$\begin{split} &C_6 \text{H}_5 \text{OH} + 7 \text{O}_2 + 7 \cdot \ 3,76 \text{N}_2 = 6 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \text{O} + 7 \cdot \ 3,76 \text{N}_2, \\ &V_{\text{CO}_2} = 6 \text{ моль}, \ V_{\text{H,0}} = 3 \text{ моль}, \ V_{\text{N}_2} = 26,32 \text{ моль}, \\ &\Delta V_{\text{B}} = (7 + 7 \cdot 3,76)(2,2 - 1) = 39,98 \text{ моль}, \ V_{\text{B},T} = 75,3 \text{ моль}. \end{split}$$

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

$$Q_H = 6.3969 + 3.242,2 - 1.4,2 = 3102,7$$
 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)):

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

По формуле (1.43) определим действительную температуру горения

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

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

$$CH_{4+} 2O_{2+2} \cdot 3.76 N_{2} = CO_{2+} 2H_{2}O_{+2} \cdot 3.76 N_{2}$$

Продукты горения:

$$V_{_{{\rm CO}_2}}=1$$
 кмоль/кмоль, $V_{_{{\rm H}_2{\rm O}}}=2$ моль/моль,

$$V_{N} = 2.3,76=7,5$$
кмоль/кмоль.

2. Низшая теплота сгорания:

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

3. Средняя внутренняя энергия продуктов горения

$$U_{\rm\scriptscriptstyle CP} = {Q_{\scriptscriptstyle H} \over V_{\scriptscriptstyle B.F.}} = {806 \over 10.5} = 76.8$$
 кДж/моль.

- 4. По табл. 2 приложения принимаем первую приближенную температуру взрыва (по азоту) $T_{_1} = 2700~^{\circ}\mathrm{C}$.
 - 5. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов горения при $^{T_{\rm I}}$:

$$U_{\scriptscriptstyle 1} = \sum V_{\scriptscriptstyle B.F.} U_{\scriptscriptstyle i} = \frac{1.128,9 + 2.1024 + 7.5.702 = 860,2}{1.128,9 + 2.1024 + 7.5.702 = 860,2}$$
 кДж/моль.

- 6. Сравнение значение Q_{f} и U_{1} показывает, что T_{1} завышена.
- 7. Выбираем $T_2 = 2500$ °C.

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

8. Так как $U_{{}_{^{1}}}$ \downarrow $Q_{{}_{^{H}}}$ \downarrow $U_{{}_{^{2}}}$, то

$$T_{B3P} = 2500 + \frac{806 - 789.2}{860.2 - 789.2} \cdot (2700 - 2500) \approx 2524 \,^{\circ}\text{C}$$

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: C-49%, H-8%, O-43%, если содержание влаги (сверх 100%) составляет 0, 5, 15%. Построить график зависимо-

сти 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 % $\rm H_2$, 30 % $\rm C_3H_8$, 15 % $\rm O_2$, 10 % $\rm N_2$, если потери тепла составили 30 % от Q_f , а коэффициент избытка воздуха при горении равен 1,8.
- 32. Определить количество сгоревшего антрацита (C = 100 %) в помещении объемом $180~{\rm m}^3$, если среднеобъемная температура возросла с $305~{\rm дo}~625{\rm K}$
- 33. Рассчитать действительную температуру горения бутановоздушной 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 ацетилена 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 м 3 повысится с 295 до 375 K, если скорость его выгорания 0,015 кг/(м 2 ·с), а площадь пожара 50 м 2 . При расчете пренебречь приращением объема продуктов горения над расходуемым воздухом.
 - 36. Рассчитать температуру горения *і*-го вещества (табл. 1.9.)

 $\it Tаблица~1.9$ Данные для расчета температуры горения вещества

No	Горючее вещество	Химическая фор-	Состав окисли-	Условия горе-
Π/Π		мула	тельной среды	ния
1	2	3	4	5
1	Смесь газов	CO – 40 %		$\alpha = 1,4$
		$C_3H_8 - 50 \%$	Воздух	$\eta = 0.25$

		CO ₂ -10 %		
2	Вещество сложно- го состава	C - 80 % H - 5 % S - 6 % W - 9 %	Воздух	= 1,6 η = 0,3
3	Пропионовая кис- лота	$C_3H_6O_2$	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	$C_6H_{12}O_2$	Воздух	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$
6	Этилбензол	C_8H_{10}	Воздух	$\alpha = 1.5$ $\eta = 0.2$
7	Вещество сложно- го 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	$C_2H_5NO_2$	Воздух	$\alpha = 1,5$
				$\eta = 0.2$
12	Гексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	Воздух	$\alpha = 2.0$
				$\eta = 0,1$
13	Вещество сложно-	C – 75 %	Воздух	$\alpha = 1.0$
	го состава	H-8%		$\eta = 0,4$
		C – 12 %		
		W-5%		
14	Смесь газов	CH ₄ – 70 %	Воздух	$\alpha = 1.8$
		$NH_3 - 20 \%$		$\eta = 0.2$
		$O_2 - 10 \%$		
15	Муравьиная кисло-	CH_2O_2	O ₂ -25 %	$\alpha = 2,2$
	та		$N_2 - 75 \%$	$\eta = 0.3$
16	Вещество сложно-	C – 56 %	Воздух	$\alpha = 1,0$
	го состава	H - 14 %		$\eta = 0.4$
		O - 20 %		
		W - 10 %		
17	Вещество сложно-	C – 78 %	Воздух	$\alpha = 1,6$
	го состава	H – 12 %		$\eta = 0.15$
		O – 10 %		
18	Смесь газов	CO -75 %	Воздух	$\alpha = 1,9$
		CH ₄ -25 %	-	$\eta = 0.2$

19	Смесь газов	$C_3H_8 - 70 \%$	Воздух	$\alpha = 1.8$
		C ₄ H ₁₀ - 20 %		$\eta = 0.2$
		O ₂ - 10 %		
20	Вещество сложно-	C – 85 %	Воздух	$\alpha = 1,4$
	го состава	H - 10 %		$\eta = 0.3$
		O – 5 %		
21	Смесь газов	$C_2H_6-75\%$	Воздух	$\alpha = 1,7$
		CH ₄ - 20 %		$\eta = 0.22$
		O ₂ -5 %		
22	Вещество сложно-	C - 70 %	Воздух	= 1,2
	го состава	H – 16 %		$\eta = 0.35$
		O – 14 %		-
23	Смесь газов	CO -50 %	Воздух	$\alpha = 1,9$
		$CH_4 - 30 \%$		$\eta = 0.15$
		CO ₂ -20 %		
24	Вещество сложно-	C – 77 %	Воздух	$\alpha = 1.0$
	го состава	H – 13 %		$\eta = 0.45$
		N-4%		
		O – 6 %		
25	Этилен	C_2H_4	O ₂ – 25 %	$\alpha = 1,0$
			N ₂ – 75 %	$\eta = 0,4$

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 м 3 различных газовоздушных смесей на НКПВ выделяет при горении постоянное среднее количество тепла — 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно

$$\varphi_{\rm H} = \frac{Q_{\rm IIP} \cdot 100}{Q_{\rm H}} \tag{2.1}$$

если принять среднее значение $\,Q_{\it ПP}\,$ равным 1830 кДж/м, то $\,\varphi_{\it H}\,$ будет равно

$$\varphi_{H} = \frac{1830 \cdot 100}{Q_{II}}$$

где Q_H – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³.

Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{an+b} \tag{2.2}$$

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

$$\phi_{H(B)} = \frac{P_{H(B)} \cdot 100}{P_0}$$
 (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 воспламене-	Значения коэффициентов	
ния	a	b
Нижний	8,684	4,679
Верхний		
n ≤ 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

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \tag{2.4}$$

где A, B, C — константы Антуана (табл. 12 приложения); t — температура, $^{\circ}$ С (температурные пределы).

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

$$\phi_{H(n)}^{\text{cat}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_{i}}{\phi_{H(n)i}}}, \qquad (2.5)$$

где $^{\phi_{\mathrm{H}(\mathrm{B})_{i}}}$ — нижний (верхний) предел воспламенения i-го горючего газа, % (об.); $^{\mu_{i}}$ — 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 $T_{_{2}}$ они вычисляются по формулам:

$$\phi_{_{\text{HF}_{2}}} = \phi_{_{\text{HF}_{1}}} (1 - \frac{T_{_{2}} - T_{_{I}}}{T_{_{2}} - T_{_{I}}}); \tag{2.6}$$

$$\phi_{\text{BF}_{2}} = \phi_{\text{BF}_{1}} (1 - \frac{T_{2} - T_{I}}{T_{2} - T_{I}}); \tag{2.7}$$

где $^{\varphi_{\mathrm{H\Gamma_{i}}},\,\varphi_{\mathrm{H\Gamma_{2}}}}$ – нижний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах T_{1} и T_{2} ; $^{\varphi_{\mathrm{B\Gamma_{i}}}}$ И $^{\varphi_{\mathrm{B\Gamma_{2}}}}$ — верхний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах T_{1} и T_{2} ; T_{2} — температура горения смеси.

Приближенно при определении НКПВ $T_{\rm e}$ принимают 1550 К, при определении ВКПВ — 1100 К.

При разбавлении газовоздушной 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 (MBCK) ϕ_{σ_2} . Некоторое содержание кислорода ниже MBCK называют безопасным $\phi_{O_26e_3}$. Расчет указанных параметров проводят по формулам:

$$\varphi_{\phi} = \frac{h_{f}^{'} \Delta H_{f}^{o} + h_{\phi}^{'} + \sum_{i} h_{i}^{'} m_{i}}{h_{\phi}^{''} - 1 + \sum_{i} h_{i}^{''} m_{i}} 100$$
(2.8)

$$\phi_{O_2} = \frac{100 - \phi_{\phi}}{4,844} \tag{2.9}$$

$$\phi_{O_2 \delta e_3} = 1,2\phi_{O_2} - 4,2$$
(2.10)

где ΔH_f^o — стандартная теплота образования горючего, Дж/моль; h_i^o , h_i^o — константы, зависящие от вида химического элемента в молекуле горючего и вида флегматизатора (табл. 11 приложения); \mathbf{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 H_2O .

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

$$Q_{H} = (T_{c}^{*} - T_{o}) \left[\sum_{\rho_{in\Pi,\Gamma_{i}}} + C_{\rho_{0n\Phi}} \right]$$
(2.11)

где T^{\cdot}_{\cdot} — предельная температура горения примерно 1500 K; $C_{_{p_i}}$, $C_{_{p_i}}$, $C_{_{p_i}}$, — соответственно теплоемкость i-го продукта горения и нейтрального газа (флегматизатора), кДж/(моль K); $n_{_{H.F_i}}$ — количество молей i-го продукта горения стехиометрической смеси, моль/моль; $n_{_{\phi}}$ — количество молей нейтрального газа в точке флегматизатора, моль/моль.

Из формулы (2.11)

$$n_{o} = \frac{Q_{H} - (T_{z}^{*} - T_{o}) \sum C_{\eta} n_{\eta, I_{1}}}{C_{\eta_{0}} (T_{z}^{*} - T_{o})}, \qquad (2.12)$$

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

$$\varphi_{i} = \frac{n_{i}}{n_{\Gamma} + n_{O_{i}} + n_{N_{i}} + n_{\phi}} \cdot 100.$$
 (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/м 3

$$Q_H = \frac{2882,3\cdot1000}{22.4} = 128,7\cdot10^3 \text{ K/J/m/}_{\text{M}^3}$$

По формуле (2.1) определим НКПВ

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

По табл. 4 приложения находим, что экспериментальное значение $\phi_{\rm H} = 1.9$ %. 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

$$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$$
.

Таким образом, n = 3, тогда

$$\phi_{\text{\tiny H}} = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25 \text{ \%};$$

$$\phi_{\text{\tiny B}} = \frac{100}{1.55 \cdot 3 + 0.56} = 18,23 \text{ \%}.$$

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

$$\Delta_H = \frac{3,25-3,0}{3,0} \approx 8 \%$$

$$\Delta_B = \frac{19,23-32,0}{32} \approx -40 \%$$

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 °C) и верхнему (39 °C) пределам воспламенения.

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

$$\lg P_{_{\mathit{H}}} = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818+7} = 1,65999$$
; $P_{_{\mathit{H}}} = 45,7$ μμ pt. ct. = $45,7 \cdot 133,2 = 6092,8$ Πα; $\lg P_{_{\mathit{B}}} = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818+39} = 2,39789$;

 P_r = 250 мм рт.ст. = 250 133,2 = 33300 Па. По формуле (2.3) определим НКПВ

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

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:

$$\begin{split} & \phi_{^{_{\rm H}}}\left(C_3H_8\right) = 2,1~\%; ~\phi_{^{_{\rm B}}}\left(C_3H_8\right) = 9,5~\%; ~\phi_{^{_{\it H}}}\left(C_3H_6\right) = 2,2~\%; \\ & \phi_{^{_{\it B}}}\left(C_3H_6\right) = 10,3~\%; ~\phi_{^{_{\it H}}}\left(C_4H_{10}\right) = 1,9~\%; ~\phi_{^{_{\it B}}}\left(C_4H_{10}\right) = 9,1~\%; \\ & \phi_{^{_{\it CM}}}^{^{_{\it CM}}} = \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,1}{2,2} + \frac{0,5}{1,9}} = 2,0~\%; ~\phi_{^{_{\it H}}}^{^{_{\it CM}}} = \frac{1}{\frac{0,4}{9,5} + \frac{0,1}{10,1} + \frac{0,5}{9,1}} = 9,38~\%. \end{split}$$

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 $\phi_{_{\rm H}} = \phi_{_{\Pi,\Gamma}} \Big(\phi_{_{\Pi,\Gamma}} -$ концентрация паров горючего вещества). Расчетом

(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 $350~{\rm m}^3$ этой концентрации

$$V_{\text{\tiny H.F}} = \frac{1,7 \cdot 350}{100} = 5,95$$

Таким образом, для создания НКПВ диэтилового эфира в объеме 350 м^3 необходимо ввести 5.95 м^3 его паров. Принимая во внимание, что 1 кмоль (74 кг) пара, приведенный к нормальным условиям, занимает объем, равный 22.4 м^3 , находим количество диэтилового эфира

$$m_r = \frac{74 \cdot 5,95}{22,4} = 19,7$$

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

Решение. Очевидно, паровоздушная смесь будет взрывоопасной, если $\phi_{_{\! H}} \le \phi_{_{\! B.\Gamma}} \le \phi_{_{\! B.\Gamma}}$. 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 м 3

$$V_{\text{\tiny H.F}} = \frac{5 \cdot 22, 4 \cdot 300}{86 \cdot 273} = 1,43$$

Концентрация паров гексана в помещении объемом 50 м 3 будет равна

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

Определив концентрационные пределы воспламенения гексана в воздухе ($\varphi_{\rm H}=1,2;\;\varphi_{\rm g}=7,5\;\%$), 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 $\varphi_{_{\!H}}^{^{\scriptscriptstyle CM}} \leq \varphi_{_{\!\!H,\Pi}}^{^{\scriptscriptstyle CM}} \leq \varphi_{_{\!\!H,\Pi}}^{^{\scriptscriptstyle CM}} = \kappa$ 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 $(M_{\mathcal{A}^{\ni}}=74, M_{\ni\mathcal{C}}=46)$.

$$\mu_{_{\mathcal{A}^{3}}}^{\cdot} = \frac{\frac{0.6}{74}}{\frac{0.6}{74} + \frac{0.4}{46}} = 0.479 \qquad \mu_{_{\mathcal{C}}}^{*} = \frac{\frac{0.4}{46}}{\frac{0.6}{74} + \frac{0.4}{46}} = 0.521.$$

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 °C (245 K):

3.

$$\begin{split} \lg P_{_{\mathcal{H}^{3}}} &= 6,9979 - \frac{1098,945}{232,372 - 19} = 1,84753 \\ P_{_{\mathcal{H}^{2}}} &= 70,39 \text{ mm pt. ct.} = 382,6 \text{ }\Pi a. \\ \lg P_{_{\mathcal{H}^{2}}} &= 8,68665 - \frac{1918,508}{252,125 - 19} = 0,45713 \\ P_{_{\mathcal{H}^{2}}} &= 2.87 \text{ mm pt. ct.} = 382,6 \text{ }\Pi a. \end{split}$$

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.

$$P_{\text{пар(x)}}$$
= 9384,4· 0,479 = 4495,1 Па; $P_{\text{пар(x)}}$ = 382,6· 0,521 = 199,3 Па.

- 5. Приняв сумму парциальных давлений насыщенных паров диэтилового эфира и этилового спирта, равной 100 %, определим:
 - а) концентрацию паров в воздухе

$$\phi_{\rm H.II}^{\rm CM} = \frac{4495,1+199,3}{101325} \cdot 100 = 4,6$$

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

$$\mu_{_{\mathcal{I}^{3}(\mathcal{I})}} = \frac{4495,1}{4495,1+199,3} = 0,958; \mu_{_{\mathcal{I}^{C}(\mathcal{I})}} = 1,00-0,960 = 0,958.$$

6. Определив расчетом или по справочным данным (табл. 5 приложения) КПВ индивидуальных веществ (диэтиловый эфир $\phi_{\pi}=1,7;$ $\phi_{\pi}=59$ %; этиловый спирт $\phi_{\pi}=3,6;$ $\phi_{\pi}=19$ %), по правилу Ле-Шателье рассчитаем КПВ паровой фазы:

$$\phi_{\rm H}^{\rm CM} = \frac{1}{\frac{0.958}{1.7} + \frac{0.042}{3.6}} = 1.7 \quad \phi_{\rm B}^{\rm CM} = \frac{1}{\frac{0.958}{49} + \frac{0.042}{19}} = 46.1$$

- 7. Сравнивая полученные в п. 4 а концентрацию паровоздушной смеси с концентрационными пределами распространения пламени ($\phi_{\text{в}} = 1.7$; $\phi_{\text{в}} = 46.1$ %), 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 (C_3H_6O) следует, что $m_C = 3$, $m_H = 6$, $m_O = 1$. Значения остальных параметров,

необходимые для расчета по формуле (2.8), выбираем из табл. 11 приложения для двуокиси углерода

$$\begin{split} \phi_{\phi} &= \frac{0,735 \cdot 10^{-5} \cdot 248 \cdot 10^{3} + 0,579 + 1,251 \cdot 3 + 0,418 \cdot 6 + 0,542 \cdot 1}{2,020 - 1 + 4,642 \cdot 3 + 1,160 \cdot 6 - 2,321 \cdot 1} \cdot 100 = 48,1 \text{ %}; \\ \phi_{o_{2}} &= \frac{100 - 48,1}{4,844} = 10,7 \text{ %}; \\ \phi_{o_{26es}} &= 1,2 \cdot 10,7 - 4,2 = 8,6 \text{ %}. \end{split}$$

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

$$\Delta = \frac{10,7-14,9}{14.9} = -28 \%.$$

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 CO и H_2O

$$C_4H_{10} + 4.5O_2 + 4.5 \cdot 3.76N_2 = 4CO + 5H_2O + 4.5 \cdot 3.76N_2.$$

По формуле (1.30) рассчитаем низшую теплоту этой реакции.

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

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

По формуле (2.12), имея данные по теплоемкости продуктов горения и нейтрального газа при температуре 1500 К (см. табл. 1.8), рас-

считываем количество молей диоксида углерода в точке флегматизации:

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

МФК диоксида углерода определим по формуле (2.13)

$$\phi_{\phi} = \frac{7.8 \cdot 100}{1 + 4.5 + 4.5 \cdot 3.76 + 7.8} = 26\%;$$

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 $\rm m^3$ 15 кг деканола, если температура 310 K, 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 %.
- 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 ₈ H ₁₈ -40 %, C ₆ H ₁₄ -60 %	По формуле Ле-Шателье	
3	Ацетилен	C_2H_2	По аппроксимационной формуле	
4	Уксусный альдегид	C ₂ H ₄ O	По предельной теплоте сгорания	
5	Бензол	C_6H_6	По температурным пределам воспламе- нения	
6	Ацетон	C ₃ H ₆ O	По температурным пределам воспламенения	
7	Смесь газов	CH ₄ – 40 % CO – 50 % C ₃ H – 10 %	По формуле Ле-Шателье	
8	Амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	По температурным пределам воспламе нения	
9	Этан	C_2H_6	По предельной теплоте сгорания	
10	Толуол	C ₇ H ₈	По температурным пределам воспламенения	

11	Смесь газов	CO - 70 % CH ₄ - 25 % C ₂ H 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 ₃ H ₆ O	По аппроксимационной формуле	
16	Стирол	C_8H_8	По температурным пределам воспламе	
			нения	
17	Фенол	C ₆ H ₆ O	По предельной теплоте сгорания	

Окончание табл.2.2

1	2	3	4	
18	Гексиловый спирт	$C_3H_{14}O$	По аппроксимационной формуле	
19	Смесь газов	CO – 12 %	По формуле Ле-Шателье	
		$C_2H_2 - 78 \%$		
		CH ₄ -10 %		
20	Диэтиловый спирт	$(C_2H_5)_2O$	По температурным пределам воспламе-	
			нения	
21	Сероуглерод	CS_2	По температурным пределам воспламе-	
			нения	
22	Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	По аппроксимационной формуле	
23	Бензиловый спирт	C ₇ H ₈ O	По температурным пределам воспламе-	
			нения	
24	Метилэтилкетон	C_4H_8O	По аппроксимационной формуле	
25	Анилин	C ₆ H ₇ N	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 $T_{^{_{\mathit{H}}}}$ и верхний $T_{^{_{\mathit{B}}}}$ температура вспышки в закрытом и открытом $T_{^{_{\mathit{BC}}}}$ приборах, температура воспламенения $T_{^{_{\mathit{BI}}}}$, температура самовоспламенения $T_{^{_{\mathit{BC}}}}$, температура зажигания $T_{^{_{\mathit{J}}}}$, температура горения $T_{^{_{\mathit{T}}}}$, (п. 1.4). В порядке возрастания они могут быть расположены в виде ряда

$$T_{\mu} \le T_{\mu\nu}^3 < T_{\mu\nu}^0 < T_{\mu\nu} < T_{\nu\rho} < T_{\nu} < T_{\nu}$$

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

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

где $t_{_{(H)B}}$ — нижний (верхний) температурный предел воспламенения; $t_{_{_{\rm KMM}}}$ — температура кипения, $^{\circ}$ С; $k,\ l$ — константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей (табл. 6 приложения).

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

$$P_{(HB)} = \frac{\Phi_{H(B)} P_o}{100} \,, \tag{3.2}$$

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 $65\ ^{\circ}\mathrm{C}$.

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

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

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

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

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:

$$P_{_{\it H}} = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2230 \qquad P_{_{\it B}} = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13172 \qquad \Pi \text{a;}$$

$$P_{_{\it H}} = \frac{2230}{133,32} = 16,73 \qquad \text{MM. pt. ct.;} \quad P_{_{\it B}} = \frac{13172}{13332} = 98,8 \cdot 16,73 \qquad \text{MM. pt. ct.}$$

Из уравнения Антуана (2.4) следует

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

Из табл. 12 приложение находим значения констант A, B и C для ацетона:

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

$$\lg P_{H} = 1,2235; \lg P_{B} = 1,9994;$$

$$t_{H} = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,2235} - 237,088 = -25^{\circ}C = 248$$

$$K$$

$$t_{B} = \frac{1281,721}{7,25058 - 1,9994} - 237,088 = 7^{\circ}C = 280$$

$$K$$

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

Линейной интерполяцией определим ТПВ:

$$T_{II} = 2417.9 + \frac{(22.3 - 13.33) \cdot (252.2 - 241.9)}{26.66 - 13.33} = 248.8$$
 K:

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

Задачи для самостоятельного решения

- 49. Определить температурные пределы воспламенения в гомологическом ряду жирных углеводородов: 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 *п*-бутиловых эфиров муравьиной и уксусной кислот. На основании полученных данных сделать вывод от их сравнительной пожарной опасности. Температура кипения бутилформиата равна 379,8 K, а бутилацетата 399 K.
- 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

$$T_{BC(B\Pi)} = \frac{A}{P_{H.\Pi} \mathcal{A}_O n},\tag{3.3}$$

Коэффициенты диффузии некоторых газов и паров в воздухе при нормальных условиях \mathcal{I}_0 приведены в табл. 12 приложения. При их отсутствии последние определяют по формуле

$$\mathcal{A}_{o} = \frac{10^{-4}}{\sqrt{\sum \Delta M_{i} m_{i}}}, \tag{3.4}$$

где \mathcal{L}_0 – коэффициент диффузии, м²/с; — 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 A, $\frac{{{{\bf M}}^2} \cdot {\bf K} \cdot \Pi {\bf a}}{{\bf c}}$
Температура, К,	
вспышки в закрытом тигле	28,0
вспышки в открытом тигле	45,3
воспламенения	53,3

При температуре, отличающейся от нормальной, коэффициент диффузии \mathcal{I} может быть рассчитан по соотношению

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n, \tag{3.4 a}$$

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

 $\begin{tabular}{ll} $\it Taблицa~3.2$ \\ \begin{tabular}{ll} \it Shaчehue~ΔM, зависящее от числа атомов углерода и их положения в молекуле горючего \\ \end{tabular}$

Название і-го элемента	Значение Δ_{M} *
Углерод (С)	25–50
Водород (Н)	1
Кислород (О)	17
Азот (N)	16
Cepa (S)	48
Хлор (Cl)	37
Бром (Вг)	79
Йод (I)	104
Фтор (F)	16

^{*} Значение $^{\Delta}$ М зависит от числа атомов углерода и их положения в молекуле гоночего:

- 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) $\Delta M = 50 для атомов углерода в открытой цепи при <math>C > 8$,
- 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:

$$t_{ec} = t_{\kappa un} - 18\sqrt{k} \tag{3.5}$$

где $t_{\text{\tiny ec}}$ — температура вспышки, ; $t_{\text{\tiny sum}}$ — температура кипения, °C; k — коэффициент, определяемый по формуле:

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

где $m_c, m_{_{\! H}}, m_{_{\! S}}, m_{_{\! N}}, m_{_{\! O}}, m_{_{\! CL}}, m_{_{\! F}}, m_{_{\! B^-}}$ 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:

$$t_{ec} = \frac{t_{H} + 2}{0,875} \tag{3.6}$$

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

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

$$A_O = \frac{10^{-4}}{\sqrt{37 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 17 \cdot 1}} = 75,8 \cdot 10^{-7} \,\mathrm{M}^2 / \mathrm{c}$$

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

$$T_{\text{\tiny BH}}P_{\text{\tiny H.II}} = \frac{53.3}{75.8 \cdot 10^{-7} \cdot 6} = 1172 \cdot 10^3 \, \text{K} \cdot \Pi a.$$

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

Произведение $T_1P_1 = 326,4 \cdot 5333 = 1740 \cdot 10^3 \text{K} \cdot \Pi \text{ a}$.

Сравнивая полученное значение с вычисленным в п. 3, устанавливаем, что $T_{_{BI}}P_{_{H.II}} < T_{_{_{I}}}P_{_{_{I}}}$.

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

$$T_2 P_2 = 314.5 \cdot 2666 = 5840 \cdot 10^3 \text{K} \cdot \Pi \text{ a}.$$

Так как $T_{2}P_{2} > T_{MI}P_{H.II}$ линейной интерполяцией находим значение температуры воспламенения:

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

Справочное значение температуры воспламенения составляет 314 K.

$$\Delta = \frac{319 - 314}{314}100 = 1,6 \%.$$
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 (3.5a)

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

Определим искомую величину температуры вспышки

$$t_{sc} = 80 - 18\sqrt{30} = -18,6^{\circ} C$$
 или 254,4 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 2метилгексана $t_{\text{кип}} = 90.1 \, ^{\circ}\text{C}$).
- 56. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле стирола (С₈Н₈) по формулам В. И. Блинова и Элея. Оценить точность расчета, если $T_{\rm sc}$ 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 \mathcal{A}_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 ₂ H ₄ O	Температура вспышки в закрытом тигле	
2	Ацетон	C ₃ H ₆ O	Температура воспламенения	
3	Пропилбензол	C_9H_{12}	Температура вспышки в открытом тигле	
4	Окись этилена	C ₂ H ₄ O	Температура воспламенения	
5	Сероуглерод	CS_2	Температура воспламенения	
6	Метиловый спирт	CH ₄ O	Температура вспышки в закрытом тигле	
7	Толуол	C ₇ H 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 ₄ H ₈ O	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 ₄ H 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 ₄ H ₁₀ O	Температура вспышки в закрытом тигле	
22	Бензиловый спирт	C ₇ H ₈ O	Температура воспламенения	
23	Этиловый спирт	C ₂ H ₆ O	Температура вспышки в открытом тигле	
24	Ацетон	C ₃ H ₆ O	Температура вспышки в закрытом тигле	
25	Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	Температура воспламенения	
26	Амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	Температура вспышки в закрытом тигле	
27	Бромистый бензол	$C_6H_5B\Gamma$	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

$$m_{_{q}} = \frac{M_{_{p}}(M_{_{p}} - 1)}{2} \tag{3.7}$$

Фенильная группа может быть как концевой, так и в середине цепи. Определяют длину каждой цепи (количество атомов углерода) и среднюю длину цепи

$$I_{cp} = \frac{\sum m_i C_i}{m_{_q}} \tag{3.8}$$

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

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

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

$$t_c = 300 + 116\sqrt{5 - I_{CP}}$$
 при $I_{CP} \le 5$; (3.9)

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

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

Решение.

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

$$\begin{array}{c} & 7 \\ CH_3 \\ 1 & 2 \mid & 3 & 4 & 5 & 6 \\ CH_3 - C - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3, \\ & 8 \mid \\ CH_3 \end{array}$$

 $M_P = 4$, так как в молекуле содержится четыре группы – CH_3 .

$$m_{_{_{4}}}=\frac{4(4-1)}{2}=6$$

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

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

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

$$t_c = 300 + 116\sqrt{5 - 4.5} = 382$$
 °С или 655 К.

Задача 3.6. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

Решение.

1. Исходя из структурной формулы вещества, определим количество пелей

$$\begin{array}{cccc}
1 & 2 & 3 \\
CH_3 - CH - OH, \\
4 & \\
CH_3
\end{array}$$

 $M_{P}=3$, так как в молекуле содержатся две группы – CH_{3} и одна группа –OH.

$$M_{_{ij}} = \frac{3(3-1)}{2} = 3.$$

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 K); по формуле (3.9)

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

$$\begin{array}{c} 2 \\ 1 \\ H_3C \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} 2 \\ CH_2 \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} CH_2 \end{array}$$

 $M_P = 3$, 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 самовос-пламенения равна 712 К.

Таблица 3.4 Данные для расчета температуры самовоспламенения вещества

№	Горючее вещество	Структурная формула	
п/п	гори нее вещеетво		
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 ₃ H ₇ CH(CH ₃)OH	
4	Дифенилметан	$CH_2(C_6H_5)_2$	
5	Толуол	CH ₃ C ₆ H ₅	
6	3,3-диметилпентан	$C_2H_5C(CH_3)_2C_2H_5$	
7	Октан	C_8H_{18}	
8	1,3-диметилбутанол-1	CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ CH(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 ₃ CH(CH ₃)CH(CH ₃)C ₂ H ₅	
16	Метилдифенил-метан	$(CH_3)CH(C_6H_5)_2$	
17	2-метил-пропанол-2	(CH ₃) ₃ COH	

18	3-метил-пентанол-2	CH ₃ CH(OH)CH(CH ₃)C ₂ H ₅
19	2,2,3,3-тетра-метилбутан	CH ₃ C(CH ₃) ₂ C(CH ₃) ₂ CH ₃
20	2,3-диметил-октан	CH ₃ CH(CH ₃)CH CH ₃ C ₅ H ₁₁
21	4-метил-4-этилгептан	$C_3H_7C(CH_3)(C_2H_5)C_3H_7$
22	3-метил-пентанол-2	C ₂ H ₅ CH(CH ₃)CH(OH)CH ₃
23	1,2,3-триметил-гексано-1	C ₃ H ₇ CH(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 ₃ CH(CH ₃)CH(CH ₃)CH(CH ₃)CH(C ₂ H ₅)C ₅ H 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 ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₂ CH(CH ₃)CH ₃
29	3-метил-пентанол-1	C ₂ H ₅ CH(CH ₃)CH ₂ CH ₂ OH

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, тротиловый эквивалент взрывчатой системы или вещества, тротиловый 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:

$$p_{esp}^{\max} = \frac{P_o T_{esp} n_{n.r}}{n_c T_o}, \tag{4.1}$$

где $P_{\it esp}^{\it max}$ — максимальное давление взрыва, $\Pi a; P_{\it o}, T_{\it o}, n_{\it c}$ — давление, температура, количество смеси до взрыва, соответственно, в $\Pi a, K, Mons; T_{\it esp}, n_{\it fl.f}$ — температура взрыва, количество продуктов горения, соответственно, в K, Mons.

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

Решение.

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

$$C_4H_{10} + 6.5O_2 + (6.5 \cdot 3.76)N_2 = 4CO_2 + 5H_2O + (6.5 \cdot 3.76)N_2.$$

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)).

$$p_{\text{exp}}^{\text{max}} = \frac{P_o T_{\text{exp}} n_{\text{II.F}}}{n_{\text{I}} T_o} = \frac{10^{\text{s}} \cdot 2905 \cdot 33.4}{31.9 \cdot 273} = 11.14 \cdot 10^{\text{s}} \, \Pi a.$$

3. Избыточное давление взрыва ΔP будет равно:

$$\Delta P = p_{sp}^{max} - 1 \cdot 10^{5} \Pi a = 11,14 \cdot 10^{5} - 1 \cdot 10^{5} = 10,14 \cdot 10^{5} \Pi a.$$

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:

$$\eta_{\text{mum}} = \frac{Q_{\text{asp}}}{Q_{\text{mum}}}, \tag{4.2}$$

где η_- тротиловый эквивалент парогазовой смеси $Q_{\text{взр}}$, Q_{H}_- теплота взрыва вещества, кДж/кг; ($Q_{\text{пиш}}=4,187\cdot10^3$ 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:

$$M_{min} = \frac{Q_{sip}my}{Q_{min}}, (4.3a)$$

или с учетом формулы (4.2):

$$M_{mum} = \eta \cdot m \cdot y \tag{4.36}$$

где M_{mm} — 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 у принимается равным 1, при взрыве в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси) коэффициент у, как правило, принимают равным 0.4.

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

$$R_{\text{\tiny GES}} = 15\sqrt[3]{M_{\text{\tiny minin}}}, \tag{4.4}$$

где $R_{_{\delta es}}^{}$ – безопасное расстояние по действию ударной волны взрыва, м; $M_{_{mum}}$ – тротиловый эквивалент взрыва, кг.

Задача 4.2. Рассчитать тротиловый эквивалент взрыва бутана. Решение.

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

$$Q_{\rm esp} = \frac{2.67 \cdot 10^3}{58 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{кДж/}}{\text{кДж/}} = 46,10^3 \text{ кДж/}_{\rm K\Gamma}.$$

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

$$\eta_{mnm}^{c_4 H_{10}} = \frac{46 \cdot 10^3}{4,187^3} = 10.9 \approx 11.$$

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 (4.36) при условии y=1:

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

3. Тротиловый эквивалент возможного аварийного взрыва при взрыве облака рассчитывается по формуле (4.36) при условии y = 0,4.

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

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:

$$R_{6m} = 15\sqrt[3]{M}_{mum} = 15\sqrt[3]{220} \approx 91 \text{ M}.$$

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

$$R_{\text{figs}} = 15\sqrt[3]{M}_{\text{mum}} = 15\sqrt[3]{90} \approx 67 \text{ M}.$$

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 кг/m^3 . Объем облака 2500 m^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: $P_o = 10^{\circ}$ Па, $T_0 = 298$ К.
- 68. Определить возможность разрушения металлического резервуара, рассчитанного на давление $5 \cdot 10^5 \, \Pi \, a$, 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: $P_o = 10^{\circ}$ Па, $T_o = 298$ 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

$N_{\underline{0}}$	Горючее вещество	Химическая фор-	Масса горючего, кг
Π/Π	-	мула	
1	Диметиловый эфир	C ₂ H ₆ O	10
2	Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	150
3	<i>п-</i> бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	15
4	Нитроэтан	$C_2H_5NO_2$	2
5	Окись углерода	CO	3
6	п-пентан	C_5H_{12}	50
7	Пропан	C_3H_8	100
8	Сероводород	H ₂ S	20
9	Этилбензол	C_8H_{10}	15
10	Этилен	C_2H_2	120
11	Толуол	C_7H_8	80
12	Этиленгликоль	C ₂ H ₆ O	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 ₄ O	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 ₂ H ₅ OH	75
22	Изобутан	C_4H_{10}	75
23	Аммиак	NH_3	200
24	<i>n</i> -гептан	C ₂ H ₁₆	100
25	Анилин	C ₆ H ₇ N	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 °С, если взрыв произошел в замкнутом пространстве, и 1850 °С, 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 образованна и выделения инертных газов. Поэтому пределы взрываемости смесей метана с воздухом при различных концентрациях кислорода (C_{κ}) 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:

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

где $n_{1,}n_{2,...}n_{i}$ — объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов, %; $N_{I},N_{2,...}N_{i}$ — нижние концентрационные пределы взрываемости каждого из этих компонентов, %.

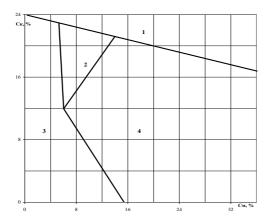


Рис. 4.1. Объемные пределы взрываемости метано-воздушных смесей: 1 – несуществующая смесь; 2 – взрывчатая смесь; 3 – невзрывчатая смесь; 4 – смесь, способная стать взрывчатой при добавлении воздуха

Объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов определяют по формуле

$$n_i = \frac{100C_i}{\sum_{i=1}^{n} C_i}$$
 (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, применяемость 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

$$C_{2} = C_{M} + C_{0} + C_{0} \tag{4.7}$$

где $C_{_{M}}, C_{_{o}}, C_{_{g}}$ – концентрация соответственно метана, оксида углерода и водорода, %.

Затем рассчитывают долю каждого горючего газа в смеси по выра-

жениям:

$$P_{M} = C_{M}/C_{2}; P_{Q} = C_{Q}/C_{2}; P_{B} = C_{B}/C_{2}.$$
 (4.8)

Правильность расчета проверяется по соотношению

$$P_{M} + P_{O} + P_{E} = 1 (4.9)$$

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 внугри «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_{κ}) 15 %, оксида углерода (C_{κ}) 0 %, метана (C_{κ}) 2,1 % и водорода (C_{κ}).

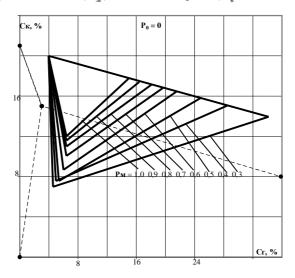


Рис. 4.2. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при отсутствии оксида углерода

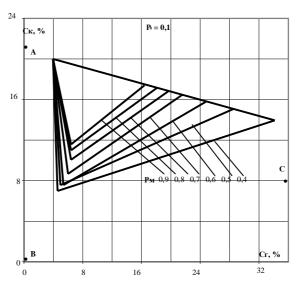


Рис. 4.3. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,1

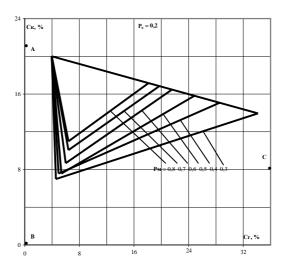


Рис. 4.4. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,2

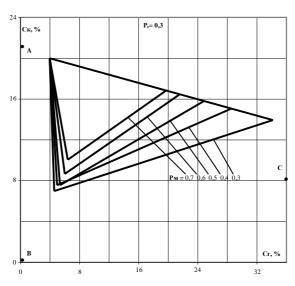


Рис. 4.5. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,3

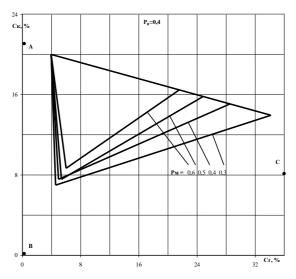


Рис. 4.6. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4

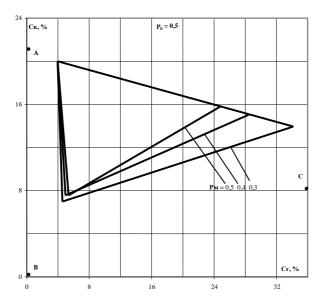


Рис. 4.7. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4

Затем по формуле (4.7) подсчитываем, что концентрация суммы горючих газов (C_z) равна 3,5 %. Даля оксида углерода в смеси горючих газов (P_a) равна 0, а доля метана P_u – 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 \mathbf{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 \mathbf{X} в зону взрываемости.

По графику расположения зовы взрываемости горючих газов можно определить, куда будет смешаться точка, отображающая соответственную газовую смесь, в случае изменения концентрации составляющих ее компонентов (кислорода, горючих газов и инертных газов). Так, линия,

соединяющая полученную точку \mathbf{X} с точкой \mathbf{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 ${\bf X}$ отображающая состояние смеси газов, начнет перемешаться к точке ${\bf C}$. Для приведенного на рис. 4.2 примера это означает вхождение 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, ${}^{\circ}C$	Теплосодержание, кДж/моль						
reepurjpu, C	O_2	N_2	Воздух	CO_2	H_2O	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

Продолжение прил. Таблица 1 б

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура,	Теплосодержание, кДж/ м³ ·10 ⁻²						
$^{\circ}C$	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	22,4	

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

Продолжение прил. Таблица 2

Внутренняя энергия

Температура, $^{\circ}C$	Теплосодержание, кДж/моль						
1 31 7	O_2	N_2	Воздух	CO ₂	H_2O	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

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
п-бутан (газ)	132,4
п-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
п-гексан	167,2
п-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
п-пентан (ж)	184,4
Пропан (газ)	109,4

Продолжение прил. Окончание табл.3

	Okon tanta maon.5
1	2
Пропан (ж)	125,3
Сероводород	201,1
Сероуглерод (ж)	-88,0
Спирт:	
п-амиловый	359,1
n-бутиловый	341,5
<i>n</i> -гексиловый	385,1
метиловый (ж)	239,0
пропиловый (ж)	307,1
(ж) йыволите	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

 $\it Taблица~4$ Показатели пожарной опасности некоторых газов

Газы	Плотность	Температура самовос-		оспламене-
	по воздуху	пламенения, К	нижний	верхний
Аммиак	0,59	903	15,0	28,0
Ацетилен	0,9	608	2,0	81,0
Бутан	2,0	678	1,9	9,1
Бутилен	1,93	657	1,6	9,4
Водород	0,069	783	4,0	75,0
Метан	0,55	810	5,0	15,0
Окись углерода	0,967	883	12,5	74,0
Окись этилена	1,5	702	3,0	80,0
Окись пропилена	2,0	673	2,0	22,0
Пропан	1,56	739	2,1	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. $\ T$ аблица 5 Показатели пожарной опасности некоторых жидкостей

	Плотность,	Температу- ра самовос-	Температу пределы вос нения,	спламе-	Концентрацион- ные пределы воспламенения, К	
Жидкость	кг/	пламенения 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	1049					
(ледяная)		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>п</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>п</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	Параметры		
т омологический ряд	n= 1, 2, 3, 4,	k	l	
Нормальные алканы	CH ₃ -(CH ₂) _n -CH ₃	0,6957 0,7874	73,8 50,3	
2-метилалканы	(CH ₃) ₂ -CH(CH ₂) _n -CH ₃	0,6885 0,7900	74,9 52,2	
Нормальные 1-алканы	(CH ₃) ₂ =CH-(CH ₂) _n -CH ₃	0,6867 0,7976	74,5	
Нормальные жирные спирты	CH ₃ -(CH ₂) _n -OH	0,5746 0,6928	33,7 15,0	
2-метилкарбинолы	(CH ₃) ₂ CH-(CH ₂) _n -OH	$\frac{0,6582}{0,7278}$	44,1 21,5	
<i>п</i> -алкилформиаты	HCOO-(CH ₂) _n -CH ₃	0,5359 0,6050	<u>47,6</u> 25,0	
<i>п</i> -алкилацетаты	CH ₃ COO-(CH ₂) _n -CH ₃	0,5940 0,7761	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
Бещество				1	емператур	oa, K			
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	163,6	271,0	280,7	295,7	312,5	329,5
Бензол	236,3	261,5	270,4	280,6	288,4	299,1	315,2	333,6	353,1
Бромистый этил	198,7	225,5	235,2	246,3	253,5	263,2	287,5	294,0	311,4
Бутилбензол	295,7	335,0	349,3	365,4	375,6	389,2	409,9	432,2	456,1
Бутилформиат	246,6	271,1	291,0	304,6	312,8	324,0	340,9	359,2	379,0
Метилэтил- кетон	224,2	255,3	266,5	279,0	287,0	298,0	314,6	333,0	352,6

Продолжение прил. Окончание табл.7

							OKUH	чание п	шол. /
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
	•	•		СПИ	ТЫ		•		•
Аллиловый	253,0	283,5	294,7	306,4	313,3	323,0	337,5	353,2	369,6
Амиловый	286,6	317,9	328,8	341,0	348,5	358,8	375,0	392,8	410,8
Бензиловый	331,0	365,6	378,8	392,8	402,3	414,7	433,0	456,0	477,7
Бутиловый	271,8	303,2	314,5	326,4	333,3	343,1	357,3	373,8	390,5
Бутиловый (вторичный)	270,8	389,9	300,3	311,1	318,2	327,1	340,9	356,9	372,5
Изобутиловый	264,0	287,3	294,7	317,1	324,7	334,58	348,9	364,4	381,0
Метиловый	229,0	256,8	267,0	278,8	285,1	294,2	307,8	322,9	337,7
н-пропиловый	258,0	287,7	298,3	309,4	316,5	325,8	339,8	365,0	370,8
Пропиловый (вторичный)	249,1	275,4	285,7	296,8	303,5	312,5	326,0	340,8	355,5
Этиловый	241,7	270,7	231,0	292,0	299,0	309,9	321,4	336,8	351,4
Стирол	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
				ЭФИ	РЫ				
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

$\ell_{ m cp}$	T_{ce} , K	$\ell_{ m cp}$	T_{ce} , K	$\ell_{ m cp}$	$T_{\rm cb}$, K	$\ell_{ m cp}$	$T_{\rm cв}$, К
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

						THOIT TOUTH	
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	78	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

$\ell_{ m cp}$	T_c , K	$\ell_{ m cp}$	T_c , K	$\ell_{ m cp}$	T _c , 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 одноатомных спиртов в зависимости от средней длины углеродной цепи

$\ell_{ m cp}$	T_{ce} , K	$\ell_{ m cp}$	T_{ce} , K	$\ell_{ m cp}$	$T_{\rm cb}$, K	$\ell_{ m cp}$	T_{ce} , 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,	Значен	ие параметров при разб	бавлении смеси
параметры, моль/Дж	азотом, ×10 ⁻⁵	водяным паром, ×10 ⁻⁵	двуокисью углерода, ×10 ⁻⁵
1	2	3	4
h'_f	0,864	0,800	0,735
h'Φ	1,256	0,780	0,579
h'C	2,5277	1,651	1,251
h'H	0,7592	0,527	0,418
h'o	0,197	1,446	0,542
h'N	-0,151	-0,147	-0,135
h'C=C	1,500	1,500	1,500
$h''\Phi$	2,800	2,236	2,020
h"C	5,946	5,000	4,642
1	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	Конс	танты ура Антуана	Коэффи-	Показа-	
			A	В	С	циент диффу- зии, см ² /с	тель « <i>n</i> » в уравнении (3.4 a)
1	2	3	4	5	6	7	8
п-амилацетат	$C_7H_{14}O_2$	130	7,17	1579,5	221,4	0,0520	1,87
Амилен	C_5H_{10}	70,1	6,79	1014,3	229,8	0,0690	1,84
n-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_2H_4O	44,1	7,19	1093,6	233,4	0,11	1,83
Ацетилен	C_2H_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

	Продолжение табл.12						
1	2	3	4	5	6	7	8
Бутадиен 1,3	C_6H_6	54,1	_	ı	-	0,0806	1,82
п-бутан	C_4H_{10}	58,1	_	-	-	0,0605	1,87
Бутен-1	C_4H_8	56,1	_	-	-	0,0801	1,83
транс-Бутен-2	C_4H_8	56,1	-	1	-	0,0801	1,82
п-бутилацета	$C_6H_{12}O_2$	116	7,01	1340,8	199,8	0,06	1,87
n-бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	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
п-гексадекан	C ₁₆ H ₃₄	227	6,79	1656,4	136,87	0,034	1,86
п-гексан	C ₆ H ₁₄	86,2	6,87	1166,3	223,66	0,066	1,55
п-гексиловый спирт	C6H14O	102	7,28	1420,2 7	165,47	0,059	1,87
п-гептан	C7H16	100	6,95	1295,4	219,82	0,061	1,54
Гидразин	N2H4	32,1	8,87	2266,5	266,32	0,17	1,86
Глицерин	C3H8O3	92,1	9,05	3074,2	214,71	0,08	1,9
п-декан	C10H22	142	7,39	1809,9	227,7	0,05	1,45
Дивиниловый эфир	C4H6O	70,1	6,98	1055,3	228,6	0,077	1,84
Диметиловый эфир	C4H6O	46,1	-	-	-	0,108	1,85
- диметилформа- мид	C3H7NO	73,1	7,03	1482,9	204,34	0,089	1,87
Диоксан-1,4	C4H8O2	88,1	7,52	1632,4	250,73	0,076	1,85
Дифтордихлорме тан	CF2Cl2	121	-	_	-	0,081	1,81
1,2-дихлорэтан	C2H4Cl2	98.9	7,66	1640,2	259,72	0,08	1,86
Диэтиламин	C4H11N	73,1	7,22	1267,6	236,33	0,076	1,85
Диэтиловый эфир	C4H10O	74,1	6,99	1098,9	232,37	0,077	2,14
п-додекан	C12H26	170	8,17	2463,7	253,88	0,04	1,88
Изобутан	C4H10	58,1	_	-	-	0,082	1,87
Изобутилен	C4H8	56,1	_	-	-	0,08	1,82
Изобутиловый спирт	C4H10O	74,1	8,71	2058,4	245,64	0,08	1,87
Изопентан	C5H12	72,2	6,79	1022,6	233,49	0,07	1,76
Изопропилбензол	C9H12	120	6,94	1460,7	207,65	0,06	1,87
Изопропиловый спирт	C3H8O	60,1	8,38	1733	232,38	0,083	1,9
м-ксилол	C8H10	106	7,01	1461,9	215,07	0,067	1,87
о-ксилол	C8H10	106	6,99	1474,7	213,69	0,007	1,88
п-ксилол	C8H10	106	6,99	1454,3	215,41	0,07	1,87
Метан	CH4	16	-	-	-	0,196	1,76

Продолжение прил. Продолжение табл.12

	Продолжение табл.12								
1	2	3	4	5	6	7	8		
Метиловый	CH4O	32	8,23	1660,5	245,82	0,129	1,08		
спирт	СП4О	32	8,23	1000,3	243,62	0,129	1,08		
Метилпропил-	C5H10O	86,1	7,86	1870,4	273,2	0,07	1,86		
кетон	C31110O	00,1	7,00	1670,4	213,2	0,07	1,60		
Метилэтилкетон	C4H8O	72,1	7,02	1292,8	232,34	0,0760	1,86		
			10,5	3123,3 2206,7	243,57		1,89		
Нафталин	C10H8	128	6		245,13	0,0622			
			7,68		,				
п-нонан	C9H20	128	7,05	1510,7	211,5	0,05	1,57		
Окись углерода	CO	28	_	-	_	0,15	1,72		
Окись этилена	C2H40	44,1	_	_	_	0,11	1,83		
п-октан	C8H18	114	1379	1379,6	211,89	0,05	1,77		
n-okmun	Collio	117	,6	1377,0	211,07	0,03	1,//		
п-гептадекан	C15H32	212	1739	1739,1	157,55	0,04	1,90		
			,1				·		
п-Пентан	C5H12	72,2	6,85	1062,6	231,81	0,07	1,83		
*Пиколин	C_6H_7N	93,1	7,3	1632,3	224,79	0,08	1,88		
*Пиридин	C_6H_5N	79,1	6,79	1217,7	196,34	0,08	1,87		
Пропан	C_3H_8	44,1	_	-	_	0,09	1,80		
Пропилен	C_3H_6	42,1	_	_	_	0,09	1,82		
п-пропиловый	C ₃ H ₈ O	60,1	8,31	1751,9	225,13	0,08	1,88		
спирт	C3118O		0,51						
Сероводород	C_2S	34,1	_	_	_	0,14	1,82		
Сероуглерод	CS_2	76,1	7	1202,5	245,62	0,09	1,69		
Стирол	C_8H_8	104	7,94	2113,1	272,99	0,07	1,88		
Тетрагидрофуран	C_4H_8O	72	5,99	753,81	175,79	0,06	1,84		
п-тетрадекан	H_{30}	198	7,27	1950,5	190,51	0,04	1,89		
Толуол	C ₇ H ₈	92,1	6,95	1345,1	219,52	0,08	1,65		
п-тридекан	$C_{13}H_{28}$	184	7,96	2468,9	250,31	0,04	1,89		
2,2,4-			- 04	10500	224.00	0.04	4.0.0		
триметилпентан	C_8H_{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	0211402	00,1							
Уксусная кислота	C _{3,7} H _{7,4} O _{3,7}	111	7,79	1789,8	245,91	0,11	1,90		
					,		,		
п-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	$C_8H_4O_3$	148	7,99	2879,1	277,5	0,06	1,9		
ангидрид	-0	140	1,,,,	2077,1	2,7,3	0,00	1,7		
Фтортрихлор-	CCL₃F	137	_	_	_	0,06	1,83		
метан									
Хлорбензол	C ₆ H ₅ CL	113	7,26	1607,3	235,35	0,06	2,09		
Хлолрэтан	C ₂ H ₅ CL	64,5	6,82	954,12	229,55	0,09	1,82		
Циклогексан	C_6H_{12}	84,2	6,65	1095,5	210,06	0,06	1,89		

Продолжение приложения. Продолжение табл.12

					Прообл	іжение п	пиол. 1 2
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 ₂ H ₆ O	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 гопливо «З» ГОСТ 305-73	$C_{12,343}H_{23,88}$	172	5,95	1255,7	199,52	40-210	2
Дизельное гопливо «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

					Око	нчание п	паол.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 (n-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; этил- целлозольв-16)	$\begin{array}{c} C_{2,645}H_{5,910} \\ O_{1,038} \end{array}$	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; голуол-21,5; этиловый спирт-16; <i>n</i> -бутиловый спирт-3; этилцел-лозольв-13)	$\begin{matrix} C_{4,791}H_{8,318} \\ O_{0,971} \end{matrix}$	81,5	8,08	1761	251,55	0-50	2
Растворитель РМЛ-215 ГУ6-10-1013-70 (<i>n</i> -бутилацетат- 18; ксилол -25; голуол-25; <i>n</i> - бутиловый спирт- 15; этилцелло- зольв-17)	$C_{5,962}H_{9,779}\\O_{0,845}$	95,0	7,71	1699,7	241	0-50	2
Растворитель P-4 (<i>n</i> -бутилацетат- 12; толуол-62; ацетон-26)	$\begin{array}{c} C_{5,452}H_{7,606} \\ O_{0,535} \end{array}$	81,7	7,17	1373,7	242,83	-15-100	2
Растворитель P-4 (ксилол -15; голуол-70; аце- тон-15)	$\begin{array}{c} C_{6,231}H_{7,798} \\ O_{0,223} \end{array}$	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 60x84/16. 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