

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

**Академия Государственной противопожарной службы**

**А.С.Андросов, Е.П. Салеев**

**ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ**  
**по курсу**  
**“ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА”**

**Москва 2005**

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ  
Академия Государственной противопожарной службы

А.С.Андросов, Е.П. Салеев

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ  
по курсу  
“ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА”

Учебное пособие

*Допущено Министерством Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве  
учебного пособия для высших образовательных учреждений  
МЧС России*

Москва 2005

УДК  
ББК  
А  
ISB N

**Андросов А.С., Салеев Е.П.** Примеры и задачи по курсу. Теория горения и взрыва. Учебное пособие. - М.: Arfltvbz ГПС МЧС России, 2005. - 86 с.

Рецензенты: кафедра общей и специальной химии Академии ГПС МЧС России, кафедра пожарной техники и службы Академии ГПС МЧС России.

Примеры и задачи по курсу “Теория горения и взрыва” составлены на основании многолетнего опыта преподавания дисциплины в Академии ГПС МЧС России с таким расчетом, чтобы они могли служить пособием при курсовом проектировании.

В целях обеспечения методического единства с теоретической частью курса в начале каждой главы приведены примеры решения задач, а также основные расчетные формулы.

В приложении приведены таблицы значений, наиболее часто используемых при решении задач по данному курсу.

Предназначено для курсантов, слушателей и адъюнктов образовательных учреждений МЧС России пожарно-технического профиля.

Главы 1, 2, 3 написаны канд. техн. наук доцентом Андросовым А.С., глава 4 канд. техн. наук старшим научным сотрудником Салеевым Е.П.

**ISB N**

©Академия государственной противопожарной службы  
МЧС России, 2005

## Оглавление

	Стр.
<b>Глава 1. Материальный и тепловой балансы процессов горения .....</b>	<b>5</b>
§ 1.1. Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ ..	5
§ 1.2. Расчет объема и состава продуктов горения .....	17
§ 1.3. Расчет теплоты сгорания веществ .....	27
§ 1.4. Расчет температуры горения и взрыва .....	32
<b>Глава 2. Концентрационные пределы распространения пламени     (воспламенения) .....</b>	<b>40</b>
<b>Глава 3. Температурные показатели пожарной опасности .....</b>	<b>52</b>
§ 3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения) .....	52
§ 3.2. Расчет температур вспышки и воспламенения .....	55
§ 3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения .....	61
<b>Глава 4. Параметры взрыва парогазовых смесей .....</b>	<b>62</b>
§ 4.1. Расчет максимального давления взрыва .....	62
§ 4.2. Расчет тротилового эквивалента взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн .....	63
<b>Приложение .....</b>	<b>67</b>

## Глава 1. Материальный и тепловой балансы процессов горения

Теоретической базой для расчетов материального и теплового балансов являются фундаментальные законы сохранения вещества и энергии.

### § 1.1. Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ

#### Расчетные формулы

Для практических расчетов принимают, что воздух состоит из 21% кислорода и 79 % азота. Таким образом, объемное соотношение азота и кислорода в воздухе составит:

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3,76, \quad (1.1)$$

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

Следовательно, на 1 м<sup>3</sup> (кмоль) кислорода в воздухе приходится 3,76 м<sup>3</sup> (кмоля) азота.

Массовое соотношение азота и кислорода в воздухе составляет 23,3 % O<sub>2</sub> и 76,7 % N<sub>2</sub>. Его можно определить, исходя из выражения:

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

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

Для удобства расчетов 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.), смесь газов (генераторный газ и т.д.).

Т а б л и ц а 1.1

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

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

Для определения объема воздуха при горении в условиях, отличных от нормальных, пользуются уравнением состояния идеальных газов

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

где  $P_0$  – нормальное давление, Па;  $T_0$  – нормальная температура, К;  $V_0$  – объем воздуха при нормальных условиях;  $P_1, V_1, T_1$  – соответственно давление, объем и температура воздуха, характеризующие заданные условия горения.

Практическое количество воздуха  $V_B$  – объем воздуха, фактически поступивший в зону горения. Отношение практического объема воздуха к теоретическому называется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ :

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

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется избытком воздуха  $\Delta V_B$ :

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

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

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

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

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} \cdot V_{\text{ПГ}}^0}{V_B^0(21 - \varphi_{O_2})}, \quad (1.10)$$

где  $\varphi_{O_2}$  – концентрация кислорода в продуктах горения, % об.;  $V_{\text{ПГ}}^0$  – теоретический объем продуктов горения.

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

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

В случае образования продуктов неполного сгорания (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, и др.) формула (1.11) приобретает вид

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

где  $\varphi_{O_2}$ ,  $\varphi_{CO}$ ,  $\varphi_{CH_4}$ ,  $\varphi_{H_2}$  – 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:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} V_{\text{ПГ}}^0}{V_{\text{ПГ}}^0(\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2})} \quad (1.12)$$

и соответственно формулу (1.11)

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

где  $\varphi_{O_2}^0$  – исходное содержание кислорода в окислительной среде, % об.;  $V_{\text{ПГ}}^0$  – теоретический объем окислительной среды.

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

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

где  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Очевидно, что

$$\rho_B = \frac{\varphi_{N_2} M_{N_2} + \varphi_{O_2} M_{O_2}}{V_0} \cdot \frac{PT_0}{P_0 T_1} \quad (1.15)$$

После подстановки постоянных значений в формулу (1.15) получим

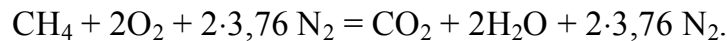
$$\rho_B = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T}, \quad (1.16)$$

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

### Примеры

**Пример 1.** Определить теоретические массу и объем воздуха, необходимого для горения  $1 \text{ м}^3$  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  $\text{CH}_4$  в воздухе



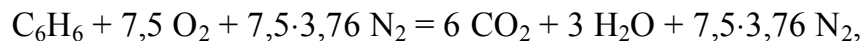
Из уравнения находим  $n_{\text{O}_2} = 2$ ;  $n_{\text{N}_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,52$ ;  $n_{\text{CH}_4} = 1$ , тогда  $V_B^0 = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$  или кмоль/кмоль.

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

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

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

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



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

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

Объем 1 кмоль газа при нормальных условиях составляет  $22,4 \text{ м}^3$

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



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

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

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

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

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

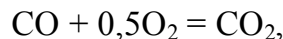
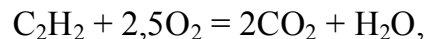
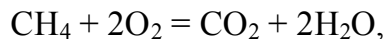
Находим количество воздуха, пошедшего на горение вещества при заданных условиях горения. Используя формулу (1.6), получим

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

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

**Пример 4.** Определить объем воздуха, необходимого для горения 5 м<sup>3</sup> смеси газов, состоящих из 20 % CH<sub>4</sub>; 40 % C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; 10 % CO; 5 % N<sub>2</sub> и 25 % O<sub>2</sub>, 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  $n_{O_2, i}$  запишем уравнение реакций горения горючих компонентов в кислороде

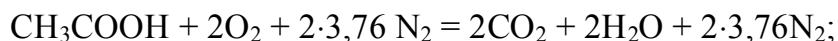


тогда 
$$V_B^0 = \frac{2 \cdot 20 + 2,5 \cdot 40 + 0,5 \cdot 10 - 25}{21} = 5,7 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Для горения 5 м<sup>3</sup> газовой смеси необходимый теоретический объем воздуха составит  $V_B^0 = 5 \cdot 5,7 = 28,5 \text{ м}^3$ . Практическое количество воздуха:  $V_B = 1,8 \cdot 28,5 = 51,3 \text{ м}^3$ .

Пример 5. Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты, если на горение 1 кг поступило 3 м<sup>3</sup> воздуха.

Решение. Для определения коэффициента избытка воздуха по формуле (1.7) необходимо рассчитать его теоретическое количество. Молекулярная масса уксусной кислоты 60.



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

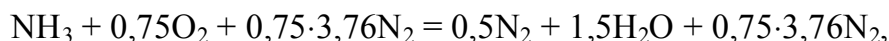
Тогда коэффициент избытка воздуха по формуле (1.7) равен

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

Горение протекало при недостатке воздуха.

Пример 6. Определить объем воздуха, пошедшего на окисление 1 м<sup>3</sup> аммиака, если в продуктах горения содержание кислорода составило 18%.

Решение. Определяем теоретическое количество воздуха, необходимого для горения 1 м<sup>3</sup> аммиака:



тогда

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{0,75 + 0,75 \cdot 3,76}{1} = 3,6 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Для определения коэффициента избытка воздуха по формуле (1.10) необходимо рассчитать теоретическое количество продуктов горения 1 м<sup>3</sup> аммиака (§ 1.2, формула 1.14)

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

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = 1 + \frac{18 \cdot 4,8}{3,6(21 - 18)} = 9,0.$$

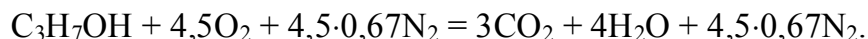
Объем воздуха, участвующего в процессе горения 1 м<sup>3</sup> аммиака, определим из формулы (1.7)

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

**Пример 7.** Определить объем окислительной среды, состоящей из 60 % O<sub>2</sub> и 40 % N<sub>2</sub>, необходимый для горения 1 кг изопропилового спирта, если ее температура равна 295 К, давление 62,0 кПа.

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

Уравнение реакции горения изопропилового спирта



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

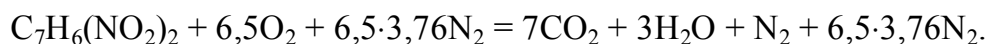
$$V_{oc}^0 = \frac{(4,5 + 4,5 \cdot 0,67) \cdot 22,4}{1 \cdot 60} = 2,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

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

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

**Пример 8.** Определить массу динитротолуола, C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, сгоревшего в герметичном объеме 100 м<sup>3</sup>, если содержание кислорода в продуктах горения составило 12 %.

**Решение.** Так как в продуктах горения содержится кислород, то горение протекало в избытке воздуха. Коэффициент избытка определим по формуле (1.10).



Молекулярная масса горючего 182. Теоретический объем воздуха

$$V_B^0 = \frac{(6,5 + 6,5 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 182} = 3,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретический объем продуктов горения (формула 1.14)

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

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

Практический объем воздуха, пошедший на горение

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

Тогда массу сгоревшего динитротолуола  $m_2$  определим из соотношения

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

### Контрольные задачи

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

2. Определить теоретический объем воздуха, необходимого для горения 1 м<sup>3</sup> метана, этана, пропана, бутана и пентана. Построить график зависимости объема воздуха от положения вещества в гомологическом ряду (содержания углерода в молекуле вещества).

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

4. Определить объем и массу воздуха, пошедшего на горение 1 кг древесины состава: С – 47 %, Н – 8 %, О – 40 %, W – 5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,8; давление 900 ГПа, 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<sup>3</sup> генераторного газа состава: СО – 29 %, Н<sub>2</sub> – 14 %, СН<sub>4</sub> – 3 %, СО<sub>2</sub> – 6,5 %, N<sub>2</sub> – 45 %, О<sub>2</sub> – 2,5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,5?

7. Определить количество сгоревшего толуола, кг, в помещении объемом 400 м<sup>3</sup> если после пожара при отсутствии газообмена установлено, что содержание кислорода снизилось до 17 %.

8. Сколько хлора, м<sup>3</sup>, поступило на горение 300 м<sup>3</sup> водорода, если в продуктах горения избыток окислителя составил 80 м<sup>3</sup> ?

9. Определить избыток воздуха в продуктах горения газовой смеси состава: СО – 15 %, С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub> – 45 % О<sub>2</sub> – 30 %, N<sub>2</sub> – 10 %, если коэффициент избытка воздуха равен 1,9.

10. Сколько окислительной среды, м<sup>3</sup>, состоящей из 50 % кислорода и 50 % азота, необходимо для горения 8 кг этилацетата, если коэффициент избытка равен 1,2; температура 265 К, давление 850 ГПа.

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 (кг), если объем помещения равен  $180 \text{ м}^3$ .

12. Сколько антрацита (принять, что содержание углерода равно 100 %) сгорело в помещении объемом  $150 \text{ м}^3$ , если прекращение горения наступило при снижении кислорода до 13 %. Газообмен не учитывать.

13. Рассчитать массовый и объемный расход воздуха, необходимый для горения газового фонтана дебитом  $30 \text{ млн. м}^3/\text{сут.}$ , состоящего из  $\text{CH}_4$  – 80 %,  $\text{CO}_2$  – 10 %,  $\text{H}_2\text{S}$  – 5 %,  $\text{O}_2$  – 5 % при температуре воздуха  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении 105 кПа.

### Домашнее задание

Рассчитать объем и массу окислительной среды, необходимые для горения  $i$ -го горючего вещества (табл. 1.2).

Т а б л и ц а 1.2

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Метиловый спирт	$\text{CH}_3\text{OH}$	2 кг	Воздух	$T = 300 \text{ К}$ $P = 101325 \text{ Па}$ $\alpha = 3$
2	Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	5 кг	$\text{O}_2$ – 70 % $\text{N}_2$ – 30 %	$T = 290 \text{ К}$ $P = 90000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
3	Смесь газов	$\text{CO}$ – 45 % $\text{N}_2$ – 15 % $\text{C}_4\text{H}_8$ – 10 % $\text{O}_2$ – 30 %	$3 \text{ м}^3$	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,8$
4	Нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	30 кг	Воздух	$T = 280 \text{ К}$ $P = 98000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
5	Сложное вещество	$\text{C}$ – 65 % $\text{O}$ – 20 % $\text{H}$ – 5 % $\text{S}$ – 10 %	200 г	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,4$
6	Этилен	$\text{C}_2\text{H}_4$	$5 \text{ м}^3$	$\text{O}_2$ – 25 % $\text{N}_2$ – 75 %	Нормальные $\alpha = 2,5$
7	Сера	$\text{S}$	2 кг	$\text{O}_2$ – 60 % $\text{N}_2$ – 40 %	$T = 350 \text{ К}$ $P = 120000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,8$
8	Сложное вещество	$\text{C}$ – 90 % $\text{H}$ – 3 % $\text{N}$ – 5 % $\text{O}$ – 2 %	1 кг	Воздух	$T = 300 \text{ К}$ $P = 95000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,5$

Продолжение таблицы 1.2

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
9	Смесь газов	CH <sub>4</sub> – 15 % C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 70 % O <sub>2</sub> – 10 % H <sub>2</sub> – 5 %	5 м <sup>3</sup>	Воздух	Нормальные α = 1,9
10	Алюминий	Al	15 кг	O <sub>2</sub> – 42 % N <sub>2</sub> – 58 %	Нормальные α = 2,8
11	Сплав	Mg – 20 % Al – 80 %	8 кг	Воздух	T = 265 К P = 92000 Па α = 1,5
12	Муравьиная кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5 кг	Воздух	Нормальные α = 1,2
13	Диметиловый эфир	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	10 кг	Воздух	T = 282 К P = 101600 Па α = 4,2
14	Смесь газов	H <sub>2</sub> S – 25 % SO <sub>2</sub> – 15 % CO <sub>2</sub> – 15 % H <sub>2</sub> – 30 % O <sub>2</sub> – 15 %	15 м <sup>3</sup>	Воздух	Нормальные α = 1,4
15	Сложное вещество	C – 82 % H – 8 % W – 10 %	0,7 кг	Воздух	T = 260 К P = 110000 Па α = 1,4
16	Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1 кг	Воздух	T = 305 К P = 101300 Па α = 1,9
17	Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	150 л	Cl <sub>2</sub> – 18 % N <sub>2</sub> – 82 %	Нормальные α = 1,8
18	Смесь газов	CH <sub>4</sub> – 30 % O <sub>2</sub> – 8 % N <sub>2</sub> – 15 % H <sub>2</sub> – 47 %	3 м <sup>3</sup>	Воздух	Нормальные α = 3,2
19	Этиловый эфир уксусной кислоты	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	5 кг	Воздух	T = 270 К P = 85000 Па α = 1,5
20	Метилэтил кетон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	5 кг	Воздух	Нормальные α = 2,5
21	Хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	7 кг	Воздух	T = 305 К P = 1000 Па α = 2,8
22	Нитротолуол	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	1 кг	O <sub>2</sub> – 25 % N <sub>2</sub> – 75 %	T = 280 К P = 98000 Па α = 1,4

Окончание таблицы 1.2

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
23	Смесь газов	NH <sub>3</sub> – 25 % C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> – 25 % C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> – 15 % CO <sub>2</sub> – 30 % O <sub>2</sub> – 5 %	200 л	Воздух	Нормальные α = 1,8
24	Бутиловый спирт	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	4 кг	Воздух	T = 265 К P = 120000 Па α = 1,8
25	Дибромгексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> Br <sub>2</sub>	3 кг	O <sub>2</sub> – 65 % N <sub>2</sub> – 35 %	T = 280 К P = 98000 Па α = 1,7
26	Сложное вещество	C – 70 % S – 5 % H – 5 % O – 20 %	15 кг	Воздух	T = 285 К P = 100000 Па α = 2,8
27	Смесь газов	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 10 % CO – 79 % H <sub>2</sub> – 5 % O <sub>2</sub> – 5 % N <sub>2</sub> – 10 %	10 м <sup>3</sup>	Воздух	Нормальные α = 3,5

### 1.2. Расчет объема и состава продуктов горения

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

Таблица 1.3

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{\text{ПГ}} = \frac{\sum n_{\text{ПГ}}}{n_{\text{Г}}} \quad (1.17)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ ; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$
	$V_{\text{ПГ}}^0 = \frac{V_0 \sum n_{\text{ПГ}i}}{n_{\text{Г}} M} \quad (1.18)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещество сложного состава	$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{C}{100} \quad (1.19)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}$
	$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} \quad (1.20)$	
	$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{S}{100} \quad (1.21)$	
	$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[ 7C + 2 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] \quad (1.22)$	

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Смесь газов	$V_{\text{ПГ}}^0 = \sum V_{\text{ПГ}i} \quad (1.23)$ $V_{\text{ПГ}i} = \frac{1}{100} \left[ \frac{\sum n_{\text{ПГ}i} \cdot \varphi_{\text{Н}i}}{n_{\text{Г}}} + \sum \varphi_{\text{НГ}i} \right].$	$\frac{\text{М}^3}{\text{М}^3}$ ; $\frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{КМОЛЬ}}$

Здесь  $V_{\text{ПГ}}^0$  – теоретический объем продуктов горения;  $n_{\text{НГ}i}$  – количество  $i$ -го продукта горения в уравнении реакции, кмоль;  $n_{\text{Г}}$  – количество горючего, кмоль;  $V_0$  – объем 1 кмолья газа;  $M$  – молекулярная масса горючего;  $V_{\text{НГ}i}$  – объем  $i$ -го продукта реакции;  $C, H, S, O, N, W$  – содержание соответствующих элементов (углерода, водорода, серы, кислорода, и азота) и влаги в горючем веществе, % вес;  $\varphi_{\text{Г}i}$  – содержание  $i$ -го горючего компонента в газовой смеси, % об.;  $\varphi_{\text{НГ}i}$  – содержание  $i$ -го негорючего компонента в составе газовой смеси, % об.

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

$$V_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}}^0 + \Delta V_{\text{В}} \quad (1.24)$$

или 
$$V_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}}^0 + V_{\text{В}}^0(\alpha - 1). \quad (1.25)$$

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

$$\varphi_{\text{ПГ}i} = \frac{V_{\text{ПГ}i}}{\sum V_{\text{ПГ}i}} 100, \quad (1.26)$$

где  $\varphi_{\text{ПГ}i}$  – содержание  $i$ -го компонента в продуктах горения, % об.;  $V_{\text{ПГ}i}$  – объем  $i$ -го компонента,  $\text{м}^3$ , кмоль;  $\sum V_{\text{ПГ}i}$  – полный объем продуктов горения,  $\text{м}^3$ , кмоль.

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

$$V_{\text{O}_2} = 0,21\Delta V_{\text{В}}; \quad (1.27)$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79\Delta V_{\text{В}}, \quad (1.28)$$

где  $V_{\text{N}_2}^0$  – теоретический объем азота в продуктах горения,  $\text{м}^3$ , кмоль,

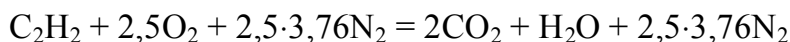
$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V_{\text{В}}^0. \quad (1.29)$$



## Примеры

**Пример 1.** Какое количество продуктов горения выделится при сгорании 1 м<sup>3</sup> ацетилена в воздухе, если температура горения составила 1450 К.

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



Объем продуктов горения при нормальных условиях

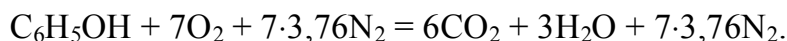
$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{2+1+2,5 \cdot 3,76}{1} = 12,4 \text{ м}^3.$$

Объем продуктов горения при 1450 К

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

**Пример 2.** Определить объем продуктов горения при сгорании 1 кг фенола, если температура горения 1200 К, давление 95 000 Па, коэффициент избытка воздуха 1,5.

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



Молекулярная масса горючего 98.

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем воздуха при нормальных условиях (1.25)

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

Объем продуктов горения при заданных условиях

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

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

Р е ш е н и е. Горючее вещество сложного состава (формулы 1.19-1.22). Теоретический состав продуктов горения при нормальных условиях

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

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

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

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

Полный теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях

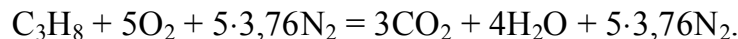
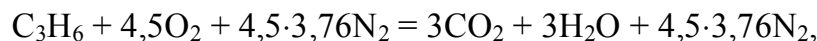
$$V_{\text{пт}} = 6,55 + 0,269 \left( \frac{55}{3} + 5 + \frac{7-13}{8} \right) (1,3 - 1) = 6,55 + 1,8 = 8,35 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем продуктов горения при температуре горения

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

П р и м е р 4. Рассчитать объем продуктов горения при сгорании 1 м<sup>3</sup> газовой смеси, состоящей из C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> – 70 %, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – 10 %, CO<sub>2</sub> – 5 %, O<sub>2</sub> – 15 %, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха 2,8. Температура окружающей среды 298 К.

Р е ш е н и е. Горючее - смесь газов (формула 1.23)



Объем продуктов горения определим по формуле (1.23)

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

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

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)

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \frac{4,5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} = 13,2 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический объем продуктов горения

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

Практический объем продуктов горения (формулы 1.24, 1.25)

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

Объем продуктов горения при температуре 1300 К

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

**Пример 5.** Определить состав продуктов горения метилэтилкетона.

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



$$V_{\text{CO}_2} = 4 \text{ кмолья}; \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = 4 \text{ кмолья}; \quad V_{\text{N}_2} = 20,7 \text{ кмолья}; \quad \sum V_{\text{пт}} = 28,7 \text{ кмолья}.$$

По формуле (1.26) находим состав продуктов горения

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

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

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

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{85}{100} = 1,6 \text{ м}^3/\text{кг};$$

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

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

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях (формула 1.25)

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

Объем продуктов горения при температуре 1450 К

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

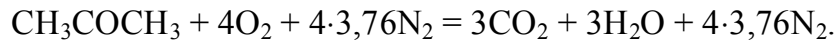
Очевидно, что состав продуктов горения не зависит от температуры горения, поэтому целесообразно определять его при нормальных условиях. По формулам (1.26, 1.28)

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

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

**Пример 7.** Определить количество сгоревшего ацетона, кг, если объем выделившейся двуокиси углерода, приведенный к нормальным условиям, составил  $50 \text{ м}^3$ .

**Решение.** Запишем уравнение реакции горения ацетона в воздухе



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

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

**Пример 8.** Определить количество сгоревшей органической массы состава: С – 58 %, О – 22 %, Н – 8 %, N – 2 %, W – 10 % в помещении объемом  $350 \text{ м}^3$ , если содержание двуокиси углерода составило 5 %.

**Решение.** Определим объем выделившейся двуокиси углерода

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

По формуле (1.19) для вещества сложного состава определим объем  $\text{CO}_2$ , выделяющийся при горении 1 кг горючего,

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

Определим количество сгоревшего вещества

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

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

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

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

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

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

Время горения определим, исходя из соотношения

$$\tau = \frac{m_{\Gamma}}{u_m F},$$

где  $\tau$  – время горения;  $m_{\Gamma}$  – масса выгоревшей древесины, кг;  $u_m$  – массовая скорость выгорания древесины,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $F$  – поверхность горения,  $\text{м}^2$ ;

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

### Контрольные задачи

1. Определить объем и состав (% об.) продуктов горения  $1 \text{ м}^3$  этилена, пропилена, бутилена, если температура горения  $1800 \text{ К}$ , давление  $98 \text{ 000 Па}$ . Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания отдельных компонентов от молекулярной массы горючего.

2. Определить объем продуктов горения и содержание паров воды и кислорода при горении  $1 \text{ кг}$  гексана, гептана, октана, декана, если температура горения  $1300 \text{ К}$ , давление  $10 \text{ 1325 ГПа}$ , коэффициент избытка

воздуха при горении 1,8. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания кислорода от молекулярной массы горючего.

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

4. Сколько продуктов горения, приведенных к нормальным условиям, образуется в результате сгорания 25 м<sup>3</sup> газовой смеси состава Н<sub>2</sub> – 45 %, С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub> – 20 %, СО – 5 %, NH<sub>3</sub> – 15 %, О<sub>2</sub> – 15 %, если горение протекало при коэффициенте избытка воздуха, равном 3,2?

5. Определить, сколько сырой нефти состава: С – 85 %, Н – 10 %, S – 5 % выгорело в объеме 2500 м<sup>3</sup>, если содержание сернистого газа составило 2,5 м<sup>3</sup>. Рассчитать, при каком содержании кислорода наступило прекращение горения.

6. Через какое время содержание СО<sub>2</sub> в помещении объемом 300 м<sup>3</sup> в результате горения гексанола с поверхности 8 м<sup>2</sup> составит 7 %? Массовая скорость выгорания гексана 0,06 кг/(м<sup>2</sup>·с).

7. Определить содержание SO<sub>2</sub> (% об.) в объеме 1200 м<sup>3</sup> на 0,5 м<sup>2</sup> и 4 мин горения нефти состава: С – 82 %, Н – 8 %, S – 10 %, если ее скорость выгорания с площади 5 м<sup>2</sup> составила 0,4 кг/(м<sup>2</sup>·с). Построить график зависимости содержания сернистого газа от времени горения.

8. Определить объем выделившихся на 5-й мин после воспламенения продуктов горения газовой смеси состава: С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub> – 30 %, Н<sub>2</sub> – 22 %, О<sub>2</sub> – 15 %, Н<sub>2</sub>S – 18 %, СО<sub>2</sub> – 15 % и содержание двуокиси углерода, если коэффициент избытка воздуха – 1,5, температура горения 1300 К. Расход газа 5 м<sup>3</sup>/с, температура газа 295 К.

### Домашнее задание

Рассчитать объем образующихся продуктов, м<sup>3</sup>, и содержание в них азота (% об.) при горении *i*-го вещества (табл. 1.4).

Т а б л и ц а 1.4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Диэтиловый спирт	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	1 кг	Воздух	T <sub>z</sub> = 1500 К P = 101400 Па α = 2,5
2	Уксусная кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5 кг	«	T <sub>z</sub> = 1200 К P = 98000 Па α = 2,6
3	Сплав	Mg – 20 % Al – 80 %	1 кг	«	T <sub>z</sub> = 2800 К P = 95000 Па α = 1,6

Продолжение табл. 1.4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
4	Смесь газов	CH <sub>4</sub> – 20 % C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 65 % O <sub>2</sub> – 15 %	1 м <sup>3</sup>	«	T <sub>z</sub> = 1480 К P = 101300 Па α = 2,4
5	Октиловый спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	10 кг	«	T <sub>z</sub> = 1320 К P = 102000 Па α = 2,5
6	Сложное вещество	C – 90 % H – 5 % O – 5 %	1 кг	«	T <sub>z</sub> = 1320 К P = 97000 Па α = 1,6
7	Смесь газов	NH <sub>3</sub> – 10 % C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> – 80 % N <sub>2</sub> – 7 % O <sub>2</sub> – 3 %	1 м <sup>3</sup>	«	T <sub>z</sub> = 1600 К P = 101300 Па α = 1,2
8	Анилин	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	1 кг	«	T <sub>z</sub> = 1550 К P = 94000 Па α = 1,7
9	Диэтиловый эфир	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	25 кг	«	T <sub>z</sub> = 1600 К P = 101300 Па α = 1,4
10	Смесь газов	CO – 70 % C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 25 % O <sub>2</sub> – 5 %	1 м <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> – 42 % N <sub>2</sub> – 58 %	T <sub>z</sub> = 1400 К P = 101300 Па α = 2,5
11	Нитро-бензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	2 кг	Воздух	T <sub>z</sub> = 1800 К P = 87000 Па α = 1,8
12	Сложное вещество	C – 70 % H – 6 % O – 14 % W – 10 %	1 кг	«	T <sub>z</sub> = 1300 К P = 97000 Па α = 1,3
13	Смесь газов	CH <sub>4</sub> – 60 % CO <sub>2</sub> – 30 % H <sub>2</sub> – 10 %	1 м <sup>3</sup>	«	T <sub>z</sub> = 1500 К P = 101300 Па α = 1,2
14	Диметиловый эфир	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	10 кг	O <sub>2</sub> – 30 % N <sub>2</sub> – 70 %	T <sub>z</sub> = 1800 К P = 87000 Па α = 1,8
15	Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1 кг	O <sub>2</sub> – 27 % N <sub>2</sub> – 73 %	T <sub>z</sub> = 1600 К P = 101300 Па α = 2,1
16	Сложное вещество	C – 80 % H – 12 % O – 8 %	1 кг	Воздух	T <sub>z</sub> = 1350 К P = 99000 Па α = 1,8

Продолжение табл. 1.4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
17	Смесь газов	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – 60 % C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 30 % H <sub>2</sub> – 5 % O <sub>2</sub> – 5 %	1 м <sup>3</sup>	- « -	T <sub>z</sub> = 165 К P = 101300 Па α = 2,6
18	Метилэтил кетон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	1 кг	- « -	T <sub>z</sub> = 1480 К P = 91000 Па α = 1,7
19	Сложное вещество	C – 60 % H – 7 % O – 21% W – 12 %	4 кг	- « -	T <sub>z</sub> = 1210 К P = 101300 Па α = 1,4
20	Нитротолуол	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	2 кг	- « -	T <sub>z</sub> = 1340 К P = 100000 Па α = 2,6
21	Смесь газов	NH <sub>3</sub> – 40 % C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 40 % H <sub>2</sub> – 10 % O <sub>2</sub> – 10 %	1 м <sup>3</sup>	- « -	T <sub>z</sub> = 1800 К P = 101300 Па α = 1,7
22	Дибромгексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> Br <sub>2</sub>	1 кг	O <sub>2</sub> – 50 % N <sub>2</sub> – 50 %	T <sub>z</sub> = 1400 К P = 92000 Па α = 2,3
23	Динитробензол	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	1 кг	Воздух	T <sub>z</sub> = 1650 К P = 81000 Па α = 1,1
24	Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	20 кг	- « -	T = 1270 К P = 97000 Па α = 1,6
25	Дихлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl	5 кг	- « -	T = 1320 К P = 99000 Па α = 1,4
26	Муравьиная кислота	C – 70 % S – 5 % H – 5 % O – 20 %	1 кг	O <sub>2</sub> – 80 % N <sub>2</sub> – 20 %	T = 2600 К P = 98000 Па α = 2,5
27	Этилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1 кг	Воздух	T <sub>z</sub> = 1500 К P = 100000 Па α = 1,5



### § 1.3. Расчет теплоты сгорания веществ Расчетные формулы

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

$$Q_B - Q_H = Q_{ис},$$

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

Т а б л и ц а 1.5

Тип горючего Вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальные вещества	$Q_H = \sum (n_i \Delta H_i - n_j \Delta H_j)$ (1.30)	кДж/моль
Вещества сложного состава (формула Менделеева)	$Q_H = 339,4C + 1257H - 108,9(O - S) - 25,1(9H + W)$ (1.31)	кДж/кг
Смесь газов	$Q_H = \frac{1}{100} \sum Q_{H_i} \varphi_{г_i}$ (1.32)	кДж/моль; кДж/м <sup>3</sup>

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

Расчет теплоты сгорания газозвоздушных смесей проводят по формуле

$$Q_H^{CM} = \frac{1}{100} Q_H \varphi_{г}, \quad (1.33)$$

где  $Q_H^{CM}$  – теплота сгорания газозвоздушной смеси, кДж/м<sup>3</sup>, кДж/кмоль;  $Q_H$  – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м<sup>3</sup>, кДж/кмоль;  $\varphi_{г}$  – концентрация горючего в смеси с окислителем, % об.

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении равна

$$q = Q_n u_m, \quad (1.34)$$

где  $q$  – удельная интенсивность тепловыделения кВт/м<sup>2</sup>;  $u_m$  – массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Скорость тепловыделения при горении теплота пожара равна

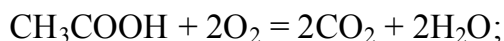
$$q = Q_n u_m \cdot F, \quad (1.35)$$

где  $q_n$  – интенсивность тепловыделения, кВт;  $F$  – площадь горения, м<sup>2</sup>.

### Примеры

**Пример 1.** 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



$$Q_n = (2 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 1 \cdot 485,6) = 792,6 \text{ кДж/моль} = 792,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}.$$

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

$$Q_n = \frac{792,6 \cdot 10^3}{64} = 12384 \text{ кДж/кг}.$$

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

**Решение.** По формуле Д.И. Менделеева (1.31)

$$Q_n = 339,4 \cdot 62 + 1257 \cdot 8 - 108,9(28 - 2) - 25,1 \cdot 9 \cdot 8 = 26460 \text{ кДж/кг}.$$

**Пример 3.** Определить низшую теплоту сгорания газовой смеси, состоящей из СН<sub>4</sub> – 40 %, С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub> – 20 %, О<sub>2</sub> – 15 %, Н<sub>2</sub>С – 5 %, NH<sub>3</sub> – 10 %, СО<sub>2</sub> – 10 %.

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

Т а б л и ц а 1.6

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

По формуле (1.32) определим теплоту сгорания газовой смеси

$$Q_{\text{H}} = \frac{1}{100} (806,3 \cdot 40 + 2666,1 \cdot 20 + 338,6 \cdot 5 + 317,2 \cdot 10) \cdot 10^3 = 1278,5 \cdot 10^3,$$

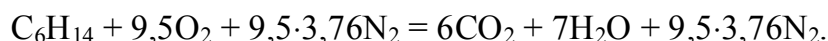
кДж/кмоль.

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

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

**П р и м е р 4.** Рассчитать теплоту сгорания  $1 \text{ м}^3$  стехиометрической гексано-воздушной смеси.

**Р е ш е н и е.** Находим стехиометрический состав горючей смеси по уравнению реакции горения



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

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

Теплоту сгорания  $1 \text{ м}^3$  гексана определим по формуле (1.30)

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

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

Объем одного кмоль газа при стандартных условиях равен  $24,4 \text{ м}^3$ .

Теплоту сгорания  $1 \text{ м}^3$  стехиометрической гексано-воздушной смеси определим по формуле (1.33)

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

**П р и м е р 5.** Определить интенсивность тепловыделения на пожаре органической массы (состав в примере 2), если скорость выгорания  $0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , а площадь пожара  $150 \text{ м}^2$ .

**Р е ш е н и е.** Согласно формуле (1.35):

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

### Контрольные задачи

1. Определить низшую теплоту сгорания  $1 \text{ м}^3$  этана, пропана, бутана, пентана и гексана. Построить зависимость  $Q_{\text{н}}$  от молекулярной массы горючего. Теплота образования горючих веществ: этана –  $88,4 \text{ кДж/моль}$ , пропана –  $109,4 \text{ кДж/моль}$ , бутана –  $232,4 \text{ кДж/моль}$ , пентана –  $184,4 \text{ кДж/моль}$ , гексана –  $211,2 \text{ кДж/моль}$ .

2. Рассчитать теплоту сгорания  $1 \text{ м}^3$  ацетилено-воздушной смеси на нижнем и верхнем концентрационных пределах воспламенения, а также при стехиометрической концентрации. Концентрационные пределы воспламенения (КПВ) ацетилена равны  $2,0\text{-}81,0 \%$ .

**П р и м е ч а н и е.** Построить график зависимости низшей теплоты сгорания от концентрации горючего в воздухе. При расчете теплоты сгорания смеси на КПВ необходимо учесть, что только часть горючего способна полностью окислиться в воздухе, остальное количество горючего не вступит в реакцию горения вследствие недостатка окислителя.

3. Определить низшую теплоту сгорания  $1 \text{ кг}$  древесины состава  $\text{C} - 49 \%$ ,  $\text{H} - 8 \%$ ,  $\text{O} - 43 \%$ . Какова удельная интенсивность тепловыделения на пожаре, если массовая скорость выгорания составляет  $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ?

4. 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  $0,005 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Построить график зависимости  $Q_{\text{н}}$  и  $q$  от содержания влаги в горючем материале.

**П р и м е ч а н и е.** Для решения задачи необходимо пересчитать состав древесины с учетом влаги таким образом, чтобы содержание всех компонентов равнялось  $100\%$ .

5. Определить интенсивность тепловыделения, кВт, при горении газовой смеси состава: CO – 15 %, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> – 40 %, O<sub>2</sub> – 20 %, H<sub>2</sub> – 14 %, CO<sub>2</sub> – 11 %, если скорость истечения 0,8 м<sup>3</sup>/с.

#### § 1.4. Расчет температуры 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

$$Q_H = \sum_{i=1}^n C_{p(v)i} V_{\text{ПГ}} (T_{\Gamma} - T_0). \quad (1.36)$$

При этом адиабатическая температура горения

$$T_{\Gamma}^* = T_0 + \frac{Q_H}{\sum C_{pi} V_{\text{ПГ}}^0}, \quad (1.37)$$

а действительная температура горения

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{ПГ}}}{\sum C_{pi} V_{\text{ПГ}}}, \quad (1.38)$$

где  $T_{\Gamma}^*$  и  $T_{\Gamma}$  – соответственно адиабатическая и действительная температуры горения;  $T_0$  - начальная температура;  $V_{\text{ПГ}i}$  – объем  $i$ -го продукта горения;  $Q_H$  - низшая теплота горения вещества;  $Q_{\text{ПГ}}$  – теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения;  $C_{Vi}$  – теплоемкость  $i$ -го продукта горения при постоянном объеме.

При этом

$$Q_{\text{ПГ}} = Q_H (1 - \eta), \quad (1.39)$$

где  $\eta$  – доля теплотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

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

Таблица 1.7

№ п/п	Определяемые параметры	Примечание
1	Объем и состав продуктов горения	$V_{\text{ПГ}i}$ (§1.2) кмоль/кмоль, м <sup>3</sup> /кг
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплопотерь)	$Q_{\text{ПГ}}$ или $Q_{\text{Н}}$ (§ 1.3) кДж/кмоль, кДж/кг
3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{Н(ПГ)}}}{\sum V_{\text{ПГ}i}}$ (1.40)
4	Температура горения $T_1$ по средней энтальпии с помощью табл. 1а или 1б, ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой $T_1$ (табл. 1а, 1б прил.)	$Q_{\text{ПГ}}^1 = \sum H_i V_{\text{ПГ}i}$ (1.41)
6	Если $Q'_{\text{ПГ}} < Q_{\text{Н(ПГ)}}$ , то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $Q'_{\text{ПГ}} > Q_{\text{Н(ПГ)}}$ , то $T_2 < T_1$ )	$H_i$ - энтальпия $i$ -го продукта горения; $V_i$ - объем $i$ -го продукта горения
7	$Q''_{\text{ПГ}}$ по формуле (1.41)	
8	Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{\text{ПГ}} < Q_{\text{Н(ПГ)}} < Q''_{\text{ПГ}}$	
9	Температура горения	$T_r = T_1 + \frac{(Q_{\text{Н(ПГ)}} - Q'_{\text{ПГ}})(T_2 - T_1)}{Q''_{\text{ПГ}} - Q'_{\text{ПГ}}}$ (1.42)

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 (пп. 3-7) используется значение внутренней энергии газов (табл. 2 приложения). Внутренняя энергия газов

$$U = C_v \cdot T,$$

где  $C_v$  – теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(моль·К), кДж/(м<sup>3</sup>·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 К:

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_u}{\sum C_{pi}^* V_{\text{пг}i}}, \quad (1.43)$$

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

Т а б л и ц а 1.8

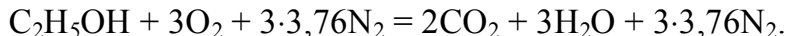
Вещество	Теплоемкость	
	кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	кДж/(моль·К)
CO <sub>2</sub>	2,27	50,85·10 <sup>-3</sup>
SO <sub>2</sub>	2,28	51,07·10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> O (пар)	1,78	39,87·10 <sup>-3</sup>
N <sub>2</sub>	1,42	31,81·10 <sup>-3</sup>
Воздух	1,44	32,26·10 <sup>-3</sup>

### Примеры

**Пример 1.** Определить адиабатическую температуру горения этилового спирта в воздухе.

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

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



Следовательно, продукты горения состоят из:  $V_{CO_2} = 2$  моля,

$V_{H_2O} = 3$  моля,  $V_{N_2} = 11,28$  моля,  $V_{\text{пг}} = 16,28$  моля.

2. Низшую теплоту сгорания определим по формуле (1.30). Из табл.3 приложения находим теплоту образования горючего - 278,2 кДж/моль

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

3. Средняя энтальпия продуктов горения

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

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

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

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

6. Сравниваем  $Q_H$  и  $Q'_{\text{пр}}$ , так как  $Q'_{\text{пр}} > Q_H$ , выбираем температуру горения равной 2000 °С.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2000 °С:

$$Q'_{\text{пр}} = 108,6 \cdot 2 + 88,1 \cdot 6 \cdot 3 + 66,8 \cdot 11,28 = 1235 \text{ кДж/моль.}$$

8. Так как  $Q''_{\text{пр}} < Q_H < Q'_{\text{пр}}$ , определим температуру горения по формуле (1.42)

$$T_{\text{г}}^0 = 2000 + \frac{(1242,2 - 1235)(2100 - 2000)}{1303,7 - 1235} = 2010 \text{ °С.}$$

**Пример 2.** Определить адиабатическую температуру горения органической массы, состоящей из С – 60 %, Н – 7 %, О – 25 %, W – 8 %.

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

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{60}{100} = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{7}{100} + 1,24 \frac{8}{100} = 0,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

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

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

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

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

3. Определим среднюю энтальпию продуктов горения

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

4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м<sup>3</sup>, первую приближенную температуру выбираем по табл. 1б приложения. Ориентируясь на азот, принимаем  $T_1 = 2100 \text{ °С.}$

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

$$Q'_{\text{пр}} = 5118,2 \cdot 1,12 + 4166,1 \cdot 0,88 + 3142,9 \cdot 5,01 = 25144,5 \text{ кДж/кг}$$

6. Из сравнения  $Q_H$  и  $Q'_{\text{пр}}$  ( $Q_H > Q'_{\text{пр}}$ ) выбираем вторую приближенную температуру, равную 1900 °С.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1900 °С



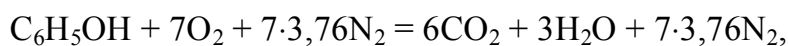
$$Q''_{\text{пр}} = 4579,7 \cdot 1,12 + 3693,5 \cdot 0,88 + 2818,2 \cdot 5,1 = 22498,8 \text{ кДж/кг.}$$

8. Так как  $Q''_{\text{пр}} < Q_{\text{н}} < Q_{\text{пр}}$ , определим температуру горения

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

**Пример 3.** Рассчитать действительную температуру горения фенола ( $\Delta H_{\text{обр}} = 4,2$  кДж/моль), если потери тепла излучением составили 25 % от  $Q_{\text{н}}$ , а коэффициент избытка воздуха при горении 2,2.

**Решение.** 1. Определим состав продуктов горения:



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

$$\Delta V_{\text{в}} = (7 + 7 \cdot 3,76)(2,2 - 1) = 39,98 \text{ моля}, \quad V_{\text{пр}} = 75,3 \text{ моля.}$$

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

$$Q_{\text{н}} = 7 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - 1 \cdot 4,2 = 3500,7 \text{ кДж/моль},$$

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

$$Q_{\text{пр}} = 3500,7(1 - 0,25) = 2625,5 \text{ кДж/моль.}$$

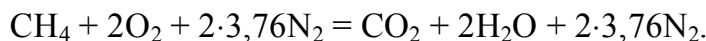
По формуле (1.43) определим действительную температуру горения

$$T_{\Gamma} = 273 + \frac{2625,5}{10^{-3}(50,85 \cdot 6 + 39,87 \cdot 3 + 31,81 \cdot 26,32 + 32,26 \cdot 39,98)} = 1302 \text{ К.}$$

**Пример 4.** Рассчитать температуру взрыва метановоздушной смеси стехиометрического состава.

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

1. Объем и состав продуктов горения



Продукты горения:  $V_{\text{CO}_2} = 1$  кмоль/кмоль,  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 2$  моль/моль,  $V_{\text{N}_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,5$  кмоль/кмоль.

2. Низшая теплота сгорания:

$$Q_{\text{н}} = 1 \cdot 396,6 + 2 \cdot 242,2 - 7,5 = 806 \text{ кДж/моль.}$$

3. Средняя внутренняя энергия продуктов горения

$$U_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{V_{\text{пр}}} = \frac{806}{10,5} = 76,8 \text{ кДж/моль.}$$

4. По табл. 2 приложения принимаем первую приближенную температуру взрыва (по азоту)  $T_1 = 2700$  °С.

5. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов горения при  $T_1$ :

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

6. Сравнение значение  $Q_H$  и  $U_1$  показывает, что  $T_1$  завышена.

7. Выбираем  $T_2 = 2500$  °С.

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

8. Так как  $U_1 > Q_H > U_2$

$$T_{\text{взр}} = 2500 + \frac{806 - 789,2}{860,2 - 789,2} (2700 - 2500) \approx 2524 \text{ °С.}$$

### Контрольные задачи

1. 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.

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

**П р и м е ч а н и е.** При решении задачи необходимо состав древесины пересчитать так, чтобы количество всех компонентов (в том числе и воды) составляло 100 %.

3. 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.

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

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

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

7. 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.

8. Определить время горения толуола, при котором температура в помещении объемом  $400 \text{ м}^3$  повысится с 295 до 375 К, если скорость его выгорания  $0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , а площадь пожара  $50 \text{ м}^2$ . При расчете пренебречь приращением объема продуктов горения над расходуемым воздухом.

### Домашнее задание

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

Т а б л и ц а 1.9

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Смесь газов	CO – 40 %, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 50 %, CO <sub>2</sub> – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,25$
2	Вещество сложного состава	C – 80 %, H – 5 %, S – 6 %, W – 9 %	- « -	$\alpha = 1,6$ $\eta = 0,3$
3	Пропионовая кислота	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> – 25 %, N <sub>2</sub> – 75 %	$\alpha = 1,3$ $\eta = 0,4$
4	Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,35$
5	Уксусно-бутиловый эфир	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	- « -	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$
6	Этилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	- « -	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,2$
7	Вещество сложного состава	C – 82 %, H – 8 %, O – 5 %, W – 5 %	- « -	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,35$
8	Смесь газов	CO – 60 %, H <sub>2</sub> – 40 %	- « -	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,4$
9	Аммиак	NH <sub>3</sub>	- « -	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,2$
10	Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	- « -	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$
11	Нитроэтан	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	- « -	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,2$
12	Гексиловый спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	Воздух	$\alpha = 2,0$ $\eta = 0,1$

Окончание табл. 1.9

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Состав окислительной среды	Условия горения
14	Вещество сложного состава	C – 75 %, H – 8 %, C – 12 %, W – 5 %	- « -	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$
15	Смесь газов	CH <sub>4</sub> – 70 %, NH <sub>3</sub> – 20 %, O <sub>2</sub> – 10 %	- « -	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,2$
16	Муравьиная кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> – 25 %, N <sub>2</sub> – 75 %	$\alpha = 2,2$ $\eta = 0,3$
17	Вещество сложного состава	C – 56 %, H – 14 %, O – 20 %, W – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$
18	Вещество сложного состава	C – 78 %, H – 12 %, O – 10 %	- « -	$\alpha = 1,6$ $\eta = 0,15$
19	Смесь газов	CO – 75 %, CH <sub>4</sub> – 25 %	- « -	$\alpha = 1,9$ $\eta = 0,2$
20	Смесь газов	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – 70 %, C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> – 20 %, O <sub>2</sub> – 10 %	- « -	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,2$
21	Вещество сложного состава	C – 85 %, H – 10 %, O – 5 %	- « -	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,3$
22	Смесь газов	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – 75 %, CH <sub>4</sub> – 20 %, O <sub>2</sub> – 5 %	- « -	$\alpha = 1,7$ $\eta = 0,22$
23	Вещество сложного состава	C – 70 %, H – 16 %, O – 14 %	- « -	$\alpha = 1,2$ $\eta = 0,35$
24	Смесь газов	CO – 50 %, CH <sub>4</sub> – 30 %, CO <sub>2</sub> – 20 %	- « -	$\alpha = 1,9$ $\eta = 0,15$
25	Вещество сложного состава	C – 77 %, H – 13 %, N – 4 %, O – 6 %	- « -	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,45$
26	Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub> – 30 % N <sub>2</sub> – 70 %	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,4$
27	Амиловый спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	Воздух	$\alpha = 2,0$ $\eta = 0,15$

## Глава 2. Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения)

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

### Расчетные формулы

Нижний концентрационный предел воспламенения  $\varphi_H$  определяют по предельной теплоте сгорания. Установлено, что 1 м<sup>3</sup> различных газоздушных смесей на НКПВ выделяет при горении постоянное среднее количество тепла – 1830 кДж, называемое предельной теплотой горения. Следовательно,

$$\varphi_H = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot 100}{Q_H}, \quad (2.1)$$

если принять среднее значение  $Q_{\text{пр}}$  равным 1830 кДж/м<sup>3</sup>, то  $\varphi_H$  будет равно

$$\varphi_H = \frac{1830 \cdot 100}{Q_H}$$

где  $Q_H$  – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м<sup>3</sup>.

Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$j_{\text{H(B)}} = \frac{100}{an + b}, \quad (2.2)$$

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

Т а б л и ц а 2.1

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

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

$$\varphi_{\text{H(В)}} = \frac{p_{\text{H(В)}}100}{p_0}, \quad (2.3)$$

где  $p_{\text{H(В)}}$  – давление насыщенного пара вещества при температуре, соответствующей нижнему (верхнему) пределу воспламенения, Па;  $p_0$  – давление окружающей среды, Па.

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

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

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

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

$$\varphi_{\text{H(В)}}^{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{\text{H(В)}}_i}}, \quad (2.5)$$

где  $\varphi_{\text{H(В)}} = \frac{P_{\text{H(В)}} \cdot 1}{P_0}$  – нижний (верхний) КПВ смеси газов, % об.;  $\varphi_{\text{H(В)}}_i$  –

нижний (верхний) предел воспламенения  $i$ -го горючего газа %, об.;  $\mu_i$  – мольная доля  $i$ -го горючего газа в смеси.

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

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

$$\varphi_{\text{НГ}_2} = \varphi_{\text{НГ}_1} \left( 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_{\Gamma} - T_1} \right); \quad (2.6)$$

$$\varphi_{\text{ВГ}_2} = \varphi_{\text{ВГ}_1} \left( 1 + \frac{T_2 - T_1}{T_{\Gamma} - T_1} \right), \quad (2.7)$$

где  $\varphi_{\text{НГ}_1}, \varphi_{\text{НГ}_2}$  – нижний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах  $T_2$  и  $T_1$ ;  $\varphi_{\text{ВГ}_1}$  и  $\varphi_{\text{ВГ}_2}$  – верхний концентрационный предел воспламенения соответственно при температурах  $T_1$  и  $T_2$ ;  $T_{\Gamma}$  – температура горения смеси.

Приближенно при определении НКПВ  $T_{\Gamma}$  принимают 1550 К, при определении ВКПВ – 1100 К.

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

$$\varphi_{\Phi} = \frac{h'_f \Delta H_f^0 + h'_{\Phi} + \sum h'_i \cdot m_i}{h''_{\Phi} - 1 + \sum h''_i \cdot m_i} \cdot 100; \quad (2.8)$$

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

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

где  $\Delta H_f^0$  – стандартная теплота образования горючего, Дж/моль;  $h'_i, h''_i, h''_{\Phi}$  – константы, зависящие от вида химического элемента в молекуле горючего и вида флегматизатора (табл. 11 приложения);  $m_i$  – количество атомов  $i$ -го элемента (структурной группы) в молекуле горючего.

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

- в точке флегматизации горючая смесь имеет предельную температуру горения  $\sim 1500$  К;
- смесь является стехиометрической при окислении углерода до  $CO$ , водорода до  $H_2O$ .

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

$$Q_H = (T_{\Gamma}^* - T_0) \left[ \sum C_{Pi} \cdot n_{Pi} + C_{P\Phi} \cdot n_{\Phi} \right], \quad (2.11)$$

где  $T_{\Gamma}^*$  – предельная температура горения  $\sim 1500$  К;  $C_{Pi}$ ,  $C_{P\Phi}$  – соответственно теплоемкость  $i$ -го продукта горения и нейтрального газа (флегматизатора), кДж/(моль·К);  $n_{Pi}$  – количество молей  $i$ -го продукта горения стехиометрической смеси, моль/моль;  $n_{\Phi}$  – количество молей нейтрального газа в точке флегматизатора, моль/моль.

Из (2.11)

$$n_{\phi} = \frac{Q_H - (T_{\Gamma}^* - T_0) \sum C_{pi} \cdot n_{\Gamma i}}{C_{p\phi} (T_{\Gamma}^* - T_0)} \quad (2.12)$$

Приняв объем всех компонентов газовой смеси за 100 %, определяется концентрация (% об.) каждого из них

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

### Примеры

**Пример 1.** По предельной теплоте 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<sup>3</sup>:

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

По формуле (2.1) определим НКПВ

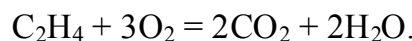
$$\varphi_H = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 10^3} = 1,42\%.$$

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

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

**Пример 2.** Определить концентрационные пределы воспламенения этилена в воздухе.

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



Таким образом,  $n = 3$ , тогда

$$\varphi_H = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25\%; \quad \varphi_B = \frac{100}{1,55 \cdot 3 + 0,56} = 18,23\%.$$

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



$$\Delta_{\text{H}} = \frac{3,25 - 3,0}{3,0} \approx 8\%; \quad \Delta_{\text{B}} = \frac{19,23 - 32,0}{32} \approx -40\%.$$

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

**П р и м е р 3.** Определить концентрационные пределы воспламенения насыщенных паров метанола в воздухе, если известно, что его температурные пределы составляют 280 – 312 К. Атмосферное давление нормальное.

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

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

$$\lg P_{\text{H}} = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 7} = 1,65999,$$

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

$$\lg P_{\text{B}} = 8,22777 - \frac{1660,454}{245,818 + 39} = 2,39789,$$

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

По формуле (3.3) определим НКПВ

$$\varphi_{\text{H}} = \frac{6092,8 \cdot 100}{101325} = 6 \%, \quad \varphi_{\text{B}} = \frac{33300 \cdot 100}{101325} = 32,9\%.$$

**П р и м е р 4.** Определить концентрационные пределы воспламенения газовой смеси, состоящей 40 % пропана, 50 % бутана и 10 % пропилена.

**Р е ш е н и е.** Для расчета КПВ смеси газов по правилу Ле-Шателье (2.5) необходимо определить КПВ индивидуальных горючих веществ, методы расчета которых рассмотрены выше.

$$\text{C}_3\text{H}_8 - 2,1 \div 9,5 \%; \quad \text{C}_3\text{H}_6 - 2,2 \div 10,3 \%; \quad \text{C}_4\text{H}_{10} - 1,9 \div 9,1 \%;$$

$$\varphi_{\text{H}}^{\text{CM}} = \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,1}{2,2} + \frac{0,5}{1,9}} = 2,0\%, \quad \varphi_{\text{B}}^{\text{CM}} = \frac{1}{\frac{0,4}{9,5} + \frac{0,1}{10,1} + \frac{0,5}{9,1}} = 9,38\%.$$

Пример 5. Каково минимальное количество диэтилового эфира, кг, способное при испарении в емкости объемом  $350 \text{ м}^3$  создать взрывоопасную концентрацию?

Решение. Концентрация будет взрывоопасной, если  $\varphi_{\text{н}} = \varphi_{\text{пг}}$  ( $\varphi_{\text{пг}}$  – 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  $350 \text{ м}^3$  этой концентрации

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

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

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

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

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

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

Концентрация паров гексана в помещении объемом  $50 \text{ м}^3$ , следовательно, будет равна

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

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

Пример 7. Определить, образуется ли взрывоопасная концентрация насыщенных паров над поверхностью резервуара, содержащего 60 %

диэтилового эфира (ДЭ) и 40 % этилового спирта (ЭС), при температуре 245 К?

**Р е ш е н и е.** Концентрация паров будет взрывоопасной, если  $\varphi_{\text{Н}}^{\text{СМ}} \leq \varphi_{\text{НП}}^{\text{СМ}} \leq \varphi_{\text{В}}^{\text{СМ}}$  ( $\varphi_{\text{НП}}^{\text{СМ}}$  – 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

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

где  $\mu_i^{\text{ж}}$  – мольная доля  $i$ -го вещества;  $q_i$  – весовая доля  $i$ -го вещества;  $M_i$  – молекулярная масса  $i$ -го вещества ( $M_{\text{ДЭ}} = 74$ ,  $M_{\text{ЭС}} = 46$ ),

$$\mu_{\text{ДЭ}}^{\text{ж}} = \frac{0,6}{\frac{0,6}{74} + \frac{0,4}{46}} = 0,479; \quad \mu_{\text{ЭС}}^{\text{ж}} = \frac{0,4}{\frac{0,6}{74} + \frac{0,4}{46}} = 0,521$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

а) концентрацию паров в воздухе

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

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

$$\mu_{\text{дэ(д)}} = \frac{4495,1}{4495,1 + 199,3} = 0,958; \quad \mu_{\text{эс(н)}} = 1,00 - 0,960 = 0,042.$$

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

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

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

**П р и м е р 8.** Рассчитать безопасную концентрацию кислорода при разбавлении углекислым газом смеси паров ацетона в воздухе.

**Р е ш е н и е.** По табл.3 приложения находим теплоту образования ацетона 248,1 103 Дж/моль. Из химической формулы ацетона (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) следует, что  $m_{\text{с}} = 3$ ,  $m_{\text{н}} = 6$ ,  $m_{\text{о}} = 1$ . Значения остальных параметров, необходимые для расчета по формуле (2.8), выбираем из табл. 11 для двуокиси углерода

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

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{100 - 48,1}{4,844} = 10,7\%;$$

$$\varphi_{\text{O}_2, \text{БЕЗ}} = 1,2 \cdot 10,7 - 4,2 = 8,6\%.$$

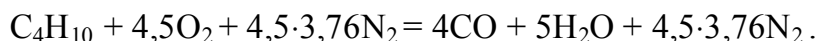
Следовательно, при снижении концентрации кислорода в четырехкомпонентной системе, состоящей из паров ацетона, двуокиси углерода, азота и кислорода, до 8,6 % смесь становится взрывобезопасной. При содержании же кислорода, равном 10,7 % эта смесь будет предельной по взрываемости. Согласно справочным данным ("Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности". Справочник. - М., Химия, 1979), МВСК ацетоновоздушной смеси при

разбавлении ее двуокисью углерода составляет 14,9 %. Определим относительную ошибку расчета

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

Таким образом, результаты расчета МВСК занижены на 28 %.

**П р и м е р 9.** Рассчитать параметры точки флегматизации (МФК, МВС, концентрацию горючего) при разбавлении бутановоздушной смеси диоксидом углерода. Расчет проведем по уравнениям (2.11)÷(2.13). Запишем уравнение химической реакции окисления бутана до СО и Н<sub>2</sub>О



По (1.30) рассчитаем низшую теплоту этой реакции.

Из табл. 3 приложения находим теплоты образования продуктов реакции и рассчитываем  $Q_{\text{H}}$ :

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

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

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

МФК диоксида углерода определим по (2.13)

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

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

$$\varphi_{\text{O}_2} = \frac{4,5 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 14,9 \%;$$

$$\varphi_{\text{Г}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 3,3 \%.$$

## Контрольные задачи

1. 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.

2. 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.

3. Определить концентрационные пределы воспламенения сероуглерода при атмосферном давлении, равном 99000 Па, если его температурные пределы составляют 223-299 К.

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

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

6. 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.

7. Определить, образуется ли взрывоопасная концентрация при испарении в помещении объемом  $220 \text{ м}^3$  15 кг деканола, если температура 310 К, давление 110500 Па.

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

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

10. Определить безопасную концентрацию кислорода при разбавлении паров уксуснопропилового эфира ( $\Delta H_j^0 = 513,7 \cdot 10^3 \text{ кДж/моль}$ ) в воздухе двуокисью углерода, водяным паром и азотом. Объяснить причину различной флегматизирующей эффективности инертных газов.

## Домашнее задание

Рассчитать концентрационные пределы воспламенения паров  $i$ -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку (табл. 2.2).

Т а б л и ц а 2.2

Вариант	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи*
1	Гептан	$C_7H_{16}$	По предельной теплоте сгорания
2	Смесь газов	$C_8H_{18} - 40 \%$ , $C_6H_{14} - 60 \%$	По формуле Ле-Шателье
3	Ацетилен	$C_2H_2$	По аппроксимационной формуле
4	Уксусный альдегид	$C_2H_4O$	По предельной теплоте сгорания
5	Бензол	$C_6H_6$	По температурным пределам воспламенения
6	Ацетон	$C_3H_6O$	По температурным пределам воспламенения
7	Смесь газов	$CH_4 - 40 \%$ , $CO - 50 \%$ , $C_3H_8 - 10 \%$	По формуле Ле-Шателье
8	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	По температурным пределам воспламенения
9	Этан	$C_2H_6$	По предельной теплоте сгорания
10	Толуол	$C_7H_8$	По температурным пределам воспламенения
11	Смесь газов	$CO - 70 \%$ , $CH_4 - 25 \%$ , $C_2H_6 - 5 \%$	По формуле Ле-Шателье
12	Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	По аппроксимационной формуле
13	Уксусно-этиловый эфир	$C_4H_8O_2$	По температурным пределам воспламенения
14	Глицерин	$C_3H_8O_3$	По аппроксимационной формуле
15	Ацетон	$C_3H_6O$	По аппроксимационной формуле
16	Смесь газов	$C_3H_8 - 70 \%$ , $CH_4 - 30 \%$	По формуле Ле-Шателье
17	Метиловый спирт	$CH_4O$	По температурным пределам воспламенения

О к о н ч а н и е т а б л. 2.2

Вариант	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи*
18	Стирол	$C_8H_8$	По температурным пределам воспламенения
19	Фенол	$C_6H_6O$	По предельной теплоте сгорания
20	Гексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	По аппроксимационной формуле
21	Смесь газов	CO – 12 %, $C_2H_2$ – 78 %, $CH_4$ – 10 %	По формуле Ле-Шателье
22	Диэтиловый спирт	$(C_2H_5)_2O$	По температурным пре-делам воспламенения
23	Сероуглерод	$CS_2$	По температурным пределам воспламенения
24	Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	По аппроксимационной формуле
25	Бензиловый спирт	$C_7H_8O$	По температурным пределам воспламенения
26	Метилэтил кетон	$C_4H_8O$	По аппроксимационной формуле
27	Анилин	$C_6H_7N$	По предельной теплоте сгорания



### Глава 3. Температурные показатели пожарной опасности

К температурным показателям пожарной опасности относятся температурные пределы распространения пламени (нижний  $T_H$  и верхний  $T_B$ , температура вспышки в закрытом  $T_{BC}^3$  и открытом  $T_{BC}^0$  приборах, температура воспламенения  $T_{ВП}$ , температура самовоспламенения  $T_{СВ}$ , температура зажигания  $T_3$ , температура горения  $T_G$  (§ 1.4). В порядке возрастания они могут быть расположены в виде ряда

$$T_H \leq T_{BC}^3 < T_{BC}^0 < T_{ВП} < T_{СВ} < T_3 < T_G.$$

#### § 3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения)

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

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

Температурные пределы воспламенения (ТПВ) жидкостей рассчитывают по температуре кипения

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

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

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

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

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

пература будет являться соответственно нижним (верхним) пределом воспламенения.

### Примеры

**Пример 1.** Определить ТПВ метилового спирта, если температура его кипения равна 65 °С.

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

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

$$t_B = 0,6928 \cdot 65 - 15,0 = 30 \text{ °С} = 303 \text{ К}.$$

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

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

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3 %.

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

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

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

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

Из уравнения Антуана (2.4) следует

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

Из табл. 12 приложения Находим значения констант  $A$ ,  $B$  и  $C$  для ацетона

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

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

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

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

Для решения этой же задачи можно воспользоваться данными табл. 7 приложения. Из табл. 7 следует, что НТПВ находится между температурами  $241,9 - 252,2^{\circ}\text{C}$ , а ВТПВ - между  $271,0$  и  $280,7 \text{ K}$ .

Линейной интерполяцией определим ТПВ:

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

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

### Контрольные задачи

1. Определить температурные пределы воспламенения в гомологическом ряду жирных углеводородов: бутан, пентан, гексан, октан, температуры кипения которых соответственно равны  $273,5$ ,  $309$ ,  $341,7$ ,  $398,7 \text{ K}$ . Построить график изменения ТПВ от положения горючего в гомологическом ряду.

2. Сравнить температурные пределы воспламенения *n*-бутиловых эфиров муравьиной и уксусной кислот. На основании полученных данных сделать вывод об их сравнительной пожарной опасности. Температура кипения бутилформиата равна  $379,8 \text{ K}$ , а бутилацетата  $399 \text{ K}$ .

3. Определить температурные пределы воспламенения бутил-бензола по его концентрационным пределам. Значения последних рассчитать по аппроксимационной формуле.

4. По концентрационным пределам воспламенения, значения которых следует установить по аппроксимационной формуле, определить температурные пределы воспламенения ацетона и метиэтилкетона. 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 высоко энергетического

источника без последующего перехода горения в стационарный диффузионный режим.

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

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

$$T_{\text{вс(вп)}} = \frac{A}{P_{\text{нп}} D_0}, \quad (3.3)$$

где  $T_{\text{вс(вп)}}$  – температура вспышки (воспламенения);  $P_{\text{нп}}$  – давление насыщенного пара при температуре вспышки (воспламенения);  $D$  – коэффициент диффузии паров горючего в воздухе;  $n$  – стехиометрический коэффициент при кислороде – количество молей кислорода, необходимое для полного окисления (до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ) одного моля горючего вещества;  $A$  – константа метода определения (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1

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

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

$$D_0 = \frac{10^{-4}}{\sqrt{\sum \Delta M_i m_i}}, \quad (3.4)$$

где  $D_0$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $m_i$  – количество  $i$ -го элемента в молекуле горючего вещества;  $\Delta M_i$  – атомные (элементные) составляющие (табл. 3.2).

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

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

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

Т а б л и ц а 3.2

Название $i$ -го элемента	Значение $\Delta M$ *
Углерод (C)	25 - 50
Водород (H)	1
Кислород (O)	17
Азот (N)	16
Сера (S)	48
Хлор (Cl)	37
Бром (Br)	79
Йод (J)	104
Фтор (F)	16

\* Значение  $\Delta M$  зависит от числа атомов углерода и их положения в молекуле горючего:

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

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

$$t_{\text{вс}} = t_{\text{кип}} - 18\sqrt{k}, \quad (3.5)$$

где  $t_{\text{вс}}$  – температура вспышки, °C;  $t_{\text{кип}}$  – температура кипения, °C;  $k$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$k = 4m_C + m_H + 4m_S + m_N - 2m_O - 2m_{Cl} - 3m_F - 5m_{Br},$$

где  $m_C, m_H, 4m_S, m_N, m_O, m_{Cl}, m_F, m_{Br}$  – количество элементов углерода, водорода, серы, азота, кислорода, хлора, фтора, брома в молекуле горючего вещества.

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

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

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

## Примеры

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

**Решение.** 1. Определим значение стехиометрического коэффициента  $C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$ . Следовательно,  $n=6$ .

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

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

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

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

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

Произведение  $T_1P_1 = 326,4 \cdot 5333 = 1740 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}$ .

Сравнивая полученное значение с вычисленным в п.3, устанавливаем, что  $T_{\text{вп}}P_{\text{нп}} < T_1P_1$ .

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

$$T_2P_2 = 314,5 \cdot 2666 = 5840 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{Па}.$$

Так как  $T_2P_2 > T_{\text{вп}}P_{\text{нп}}$ , линейной интерполяцией находим значение температуры воспламенения

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

Справочное значение температуры воспламенения составляет 314 К.

Погрешность расчета  $\Delta = \frac{319 - 314}{314} \cdot 100 = 1,6 \%$ .

**Пример 2.** 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 значений коэффициента  $k$ . Температура кипения бензола 353 К или 80 °С. Величину  $k$  определим по формуле (4.6)

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

Определим искомую величину температуры вспышки

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

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 %.

### Контрольные задачи

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

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

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

4. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле стирола ( $\text{C}_8\text{H}_8$ ) по формулам В.И. Блинова и Элея. Оценить точность расчета, если  $T_{\text{вс}}$  стирола по справочным данным равна 303 К.

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

### Домашнее задание

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

Т а б л и ц а 3.3

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи*
1	Уксусный альдегид	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	Температура вспышки в закрытом тигле
2	Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	Температура воспламенения
3	Пропилбензол	$\text{C}_9\text{H}_{12}$	Температура вспышки в открытом тигле
4	Окись этилена	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	Температура воспламенения
5	Сероуглерод	$\text{CS}_2$	Температура воспламенения
6	Метиловый спирт	$\text{CH}_4\text{O}$	Температура вспышки в закрытом тигле
7	Толуол	$\text{C}_7\text{H}_8$	Температура воспламенения

## Окончание таблицы 3.3

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи*
8	Этилбензол	$C_8H_{10}$	Температура воспламенения
9	Диэтиловый эфир	$(C_2H_5)_2O$	Температура вспышки в открытом тигле
10	Метилэтил кетон	$C_4H_8O$	Температура воспламенения
11	Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	Температура вспышки в открытом тигле
12	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в открытом тигле
13	Бутиловый спирт (третичный)	$C_4H_{10}O$	Температура воспламенения
14	2-метилбутан	$C_5H_{12}$	Температура вспышки в закрытом тигле
15	Октан	$C_8H_{18}$	Температура воспламенения
16	Этилцикло-пентан	$C_7H_{14}$	Температура воспламенения
17	Уксуснопропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
18	Уксусноэтило-вый эфир	$C_4H_{10}O$	Температура воспламенения
19	Пропиловый спирт (вторичный)	$C_3H_8O$	Температура воспламенения
20	Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	Температура вспышки в открытом тигле
21	Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
22	Бензиловый спирт	$C_7H_8O$	Температура воспламенения
23	Этиловый спирт	$C_2H_6O$	Температура вспышки в открытом тигле
24	Ацетон	$C_3H_6O$	Температура вспышки в закрытом тигле
25	Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	Температура воспламенения
26	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
27	Бромистый бензол	$C_6H_5Br$	Температура воспламенения

### § 3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения

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

Расчет температуры самовоспламенения проводят в следующей последовательности.

Определяют количество углеродных цепей



$$m_{\text{ц}} = \frac{M_p(M_p - 1)}{2}, \quad (3.7)$$

где  $m_{\text{ц}}$  - общее число цепей;  $M_p$  - количество функциональных групп в молекуле горючего вещества -CH<sub>3</sub>, -ОН, фенил.

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

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

$$\mathbf{l}_{\text{ср}} = \frac{\sum m_i C_i}{m_{\text{ц}}}, \quad (3.8)$$

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

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

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

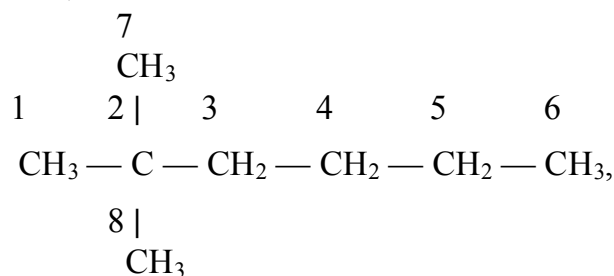
$$t_c = 300 + 116 \sqrt{5 - l_{\text{ср}}} \quad \text{при } \mathbf{l}_{\text{ср}} \leq 5;$$

$$t_c = 300 + 38 \sqrt{l_{\text{ср}} - 5} \quad \text{при } \mathbf{l}_{\text{ср}} > 5.$$

### Примеры

**Пример 1.** Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.

**Решение.** 1. Запишем структурную формулу горючего вещества и определим количество цепей



$M_p = 4$ , так как в молекуле содержится четыре группы -CH<sub>3</sub>.

$$m_{\text{ц}} = \frac{4(4-1)}{2} = 6.$$

2. Находим длину каждой из шести цепей и среднюю длину

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

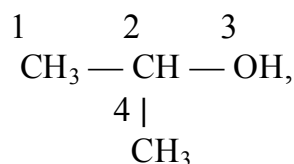
$$I_{\text{cp}} = \frac{3 \cdot 6 + 3 \cdot 3}{6} = 4,5.$$

По табл. 8 приложения определяем, что температура самовоспламенения равна 643 К. По формуле (3.10)

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

**Пример 2.** Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

**Решение.** Исходя из структурной формулы вещества, определим количество цепей



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

$$m_{\text{ц}} = \frac{3(3-1)}{2} = 3.$$

2. Находим длину каждой цепи и среднюю длину

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

В цепях 1-3 и 3-4 содержится по два атома углерода и одна группа  $-\text{OH}$ , которая удлиняет цепь на один атом углерода

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

3. По табл.10 приложения находим, что температура самовоспламенения изопропилового спирта равна 706 К; по формуле (4.10)

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

Согласно справочным данным, температура самовоспламенения равна 693 К.

Относительная ошибка расчета с использованием таблицы составляет

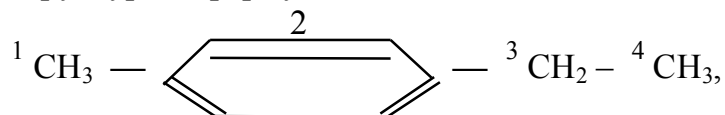
$$\Delta = \frac{706 - 693}{693} 100 = 1,9\%$$

Если расчет вести по формуле (4.10), ошибка возрастет до

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

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

**Решение.** 1. Структурная формула вещества



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

2. Определим длину цепей

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

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

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

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

### Контрольные задачи

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

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

3. 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.

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

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

### Домашнее задание

Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения *i*-го вещества. Сравнить расчетное значение с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку расчета (табл. 3.4).

Т а б л и ц а 3.4

Вариант	Горючее вещество	Структурная формула
1	1,3-диметил 4-пропил- бензол	$(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_3(\text{C}_3\text{H}_7)$
2	2-метил-3-этил- гексан	$\text{C}_3\text{H}_7\text{-CH-(C}_2\text{H}_5\text{)CH(CH}_3\text{)-CH}_3$
3	1-метил-бутанол	$\text{C}_3\text{H}_7\text{CH(CH}_3\text{)OH}$
4	Дифенилметан	$\text{CH}_2(\text{C}_6\text{H}_5)_2$
5	Толуол	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_5$
6	3,3-диметил- пентан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{C(CH}_3\text{)}_2\text{C}_2\text{H}_5$
7	Октан	$\text{C}_8\text{H}_{18}$
8	1,3-диметил- бутанол-1	$\text{CH}_3\text{CH(CH}_3\text{)CH}_2\text{CH(CH}_3\text{)OH}$
9	Дифенилэтан	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{C}_6\text{H}_5)_2$
10	1-метил 2-этил- 4-пропилбензол	$(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)(\text{C}_3\text{H}_7)\text{C}_6\text{H}_3$
11	3,3 диметил- пентанол-1	$\text{C}_2\text{H}_5\text{C(CH}_3\text{)}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$
12	2-этил-3-метил- пентанол-1	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH(CH}_3\text{)CH(C}_2\text{H}_5\text{)CH}_2\text{OH}$
13	2,2-диметил- гексан	$\text{C}_4\text{H}_9\text{C(CH}_3\text{)}_2\text{CH}_3$
14	1,2-диметил- 4-этилбензол	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_2(\text{C}_2\text{H}_5)$
15	2,3-диметил- пентан	$\text{CH}_3\text{CH(CH}_3\text{)CH(CH}_3\text{)C}_2\text{H}_5$
16	Метилдифенил- метан	$(\text{CH}_3)\text{CH(C}_6\text{H}_5)_2$
17	2-метил- пропанол-2	$(\text{CH}_3)_3\text{COH}$

## Окончание таблицы 3.4

Вариант	Горючее вещество	Структурная формула
18	3-метил-пентанол-2	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{CH}_3)\text{C}_2\text{H}_5$
19	2,2,3,3-тетраметилбутан	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$
20	2,3-диметил-октан	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{C}_5\text{H}_{11}$
21	4-метил-4-этилгептан	$\text{C}_3\text{H}_7\text{C}(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)\text{C}_3\text{H}_7$
22	3-метил-пентанол-2	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$
23	1,2,3-триметил-гексанол-1	$\text{C}_3\text{H}_7\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{OH}$
24	1,2,3,4-тетраметилбензол	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{CH}_3)_4$
25	2,3,4-триметил-5-этилдекан	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{C}_2\text{H}_5)\text{C}_5\text{H}_{11}$
26	3,3,-диметил-4,4,-диэтил-нонан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{C}_5\text{H}_{11}$
27	3,3-диметил-гептанол-2	$\text{CH}_3-\text{CH}(\text{OH})\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{C}_4\text{H}_9$
28	2,2,4-триметил-пентан	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_3$
29	3-метил-пентанол-1	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$

## Глава 4. ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВА ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

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 сгорания или детонации парогазовых смесей при условии реализации изобаро-изохорического процесса.

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

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = \frac{P_0 \cdot T_{\text{взр}} \cdot n_{\text{пр}}}{n_c \cdot T_0} \quad (4.1)$$

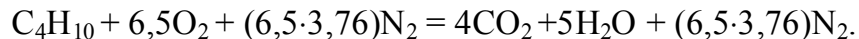
где  $P_{\text{взр}}^{\text{max}}$  – максимальное давление взрыва, Па;  $P_0$ ,  $T_0$ ,  $n_c$  – давление, температура, количество смеси до взрыва, соответственно в Па, К, молях;  $T_{\text{взр}}$ ,  $n_{\text{пр}}$  – температура взрыва, количество продуктов горения, соответственно в К, молях.

**Пример 1.** Рассчитать максимальное давление взрыва бутано-воздушной смеси стехиометрического состава. На момент взрыва давление и температура были близки к нормальным условиям ( $P_0=10^5$  Па,  $T=273$  К).

Температура взрыва 2905 К.

**Решение.**

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



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

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

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = \frac{P_0 \cdot T_{\text{взр}} \cdot n_{\text{пр}}}{n_c \cdot T_0} = \frac{10^5 \cdot 2905 \cdot 33,4}{31,9 \cdot 273} = 11,14 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

4. Избыточное давления взрыва  $\Delta P$  будет равно:

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

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

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

Тротиловый эквивалент вещества рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}}}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (4.2)$$

где  $\eta$  - тротиловый эквивалент парогазовой смеси;  $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$  – теплота взрыва вещества, кДж/кг;  $Q_{\text{ТНТ}} = 4,187 \cdot 10^3$  кДж/кг – теплота взрыва тротила (тринитротолуола).

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

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

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

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} \cdot m \cdot \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (4.3, a)$$

или с учетом (4.2):

$$M_{\text{ТНТ}} = h \cdot m \cdot g \quad (4.3, б)$$

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

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

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

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

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

**Пример 1.** Рассчитать тротильный эквивалент взрыва бутана.

**Решение.**

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

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

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

$$\eta^{C_4H_{10}} = \frac{Q_{\text{взр}}^{C_4H_{10}}}{Q_{\text{ТНТ}}} = \frac{46 \cdot 10^3}{4,187 \cdot 10^3} = 10,9 \approx 11.$$

**Пример 2.** Рассчитать тротильный эквивалент возможного аварийного взрыва 20 кг бутана с воздухом:

а) в технологическом оборудовании,

б) в облаке.

**Решение.**

1. Тротильный эквивалент взрыва бутана в смеси стехиометрического состава равен 10,9 (см. пример 1).

2. Тротильный эквивалент возможного аварийного взрыва при взрыве в технологическом оборудовании рассчитывается по формуле (4.3б) при условии  $\gamma=1$ .

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

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

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

**Пример 3.** Для случаев взрывов, рассмотренных в примере 2, рассчитать безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны.

**Решение.**

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

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

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



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

### Контрольные задачи

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

2. Определить количество взорвавшихся паров бензола, если после аварии отмечены разрушения на расстоянии  $100 \text{ м}$  от эпицентра взрыва. Взрыв произошел в помещении.

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

### Домашнее задание

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

Расчет безопасного расстояния выполнить как для условия взрыва в ограниченном объеме, так и для взрыва в открытом пространстве. Расчет выполнить для горючего вещества массой  $m_i$ .

Т а б л и ц а 4.1

№ варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Масса горючего, кг
1	Диметиловый эфир	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	10
2	Диэтиловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	150
3	Н-бутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	15
4	Нитроэтан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$	2
5	Окись углерода	$\text{CO}$	3
6	Н-пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	50
7	Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	100
8	Сероводород	$\text{H}_2\text{S}$	20
9	Этилбензол	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	15
10	Этилен	$\text{C}_2\text{H}_2$	120
11	Толуол	$\text{C}_7\text{H}_8$	80
12	Этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	5
13	Этан	$\text{C}_2\text{H}_6$	60
14	Укуснобутиловый эфир	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	20
15	Н-гексильовый спирт	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	70

О к о н ч а н и е т а б л и ц ы 4.1

№ варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Масса горючего, кг
16	Уксусноэтиловый эфир Мети-	$C_4H_8O_2$	30
17	ловый спирт	$CH_4O$	130
18	Пропиловый спирт	$C_3H_8O$	30
19	Метан	$CH_4$	10
20	Глицерин	$C_3H_5(OH)_3$	25
21	Этиловый спирт	$C_2H_5OH$	75
22	Изобутан	$C_4H_{10}$	75
23	Аммиак	$NH_3$	200
24	Н-гептан	$C_7H_{16}$	100
25	Анилин	$C_6H_7N$	250
26	Н-гексан	$C_6H_{14}$	30
27	Ацетилен	$C_2H_2$	2

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Т а б л и ц а 1, а

### ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) ГАЗОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Темпера- тура, °С	Теплосодержание, кДж/моль						Темпера- тура, °С
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	
0	0	0	0	0	0	0	0
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1	100
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5	200
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2	300
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2	400
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3	500
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5	600
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9	700
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3	800
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8	900
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3	1000
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9	1100
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5	1200
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2	1300
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,8	1400
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4	1500
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1	1600
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8	1700
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6	1800
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2	1900
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1	2000
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7	2100
2200	78,1	74,1	71,7	120,8	98,8	110,5	2200
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2	2300
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0	2400
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8	2500
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	119,4	141,6	2600
2700	97,9	92,6	93,1	101,5	124,8	147,3	2700
2800	101,8	96,4	96,8	107,6	130,3	153,0	2800
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8	2900
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7	3000

Таблица 1, б

**ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) ГАЗОВ  
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ**

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

**ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ГАЗОВ**

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

## ТЕПЛОТА ОБРАЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ 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
н-Бутан (газ)	132,4
н-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
н-Гексан	167,2
н-Гептан	239,7
Глицерин	675,4
Двуокись	
серы	297,5
углерода	396,6
Диоксон (ж)	375,4
Дифенил (тв)	-80,4
Изобуган (ж)	159,2
Кислота	
бензойная (тв)	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
н-Пентан (ж)	184,4

Окончание табл. 3

Вещество	Теплота образования, кДж/моль
Пропан (газ)	109,4
Пропан (ж)	125,3
Сероводород	201,1
Серовуглерод (ж)	-88,0
Спирт	
н-амиловый	359,1
н-бутиловый	341,5
н-гексиловый	385,1
метиловый (ж)	239,0
пропиловый (ж)	307,1
этиловый (ж)	278,2
Теофен (ж)	-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
Эфир	
диметиловый (ж)	207,8
диэтиловый (ж)	283,2
уксусноамиловый	594,7
уксуснобутиловый (ж)	542,2
уксуснометиловый (ж)	411,9
уксуснопропиловый (ж)	513,7
уксусноэтиловый (ж)	480,2

Таблица 4

**ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ  
НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ**

Газы	Плотность по воздуху	Температура самовоспла- менения, К	Пределы воспламенения, %	
			нижний	верхний
Аммиак	0,59	903	15,0	28,0
Ацетилен	0,9	608	2,0	81,0
Бутан	2,0	678	1,9	9,1
Бутилен	1,93	657	1,6	9,4
Водород	0,069	783	4,0	75,0
Метан	0,55	810	5,0	15,0
Окись углерода	0,967	883	12,5	74,0
Окись этилена	1,5	702	3,0	80,0
Окись пропилена	2,0	673	2,0	22,0
Пропан	1,56	739	2,1	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



## ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Жидкость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура самовоспламе- нения, К	Температурные пределы воспламенения, К		Концентрационные пределы воспламенения, %	
			нижний (температура вспышки)	верхний	нижний	верхний
Анилин	1022	835	343	363	1,3	4,2
Альдегид уксусный	780	458	235	-	4,0	5,0
Ацетон	790	738	253	279	2,2	13,0
Бензол	879	813	259	283	1,4	7,1
Глицерин	1260	673	431	513	-	-
Кислота уксусная (ледяная)	1049	727	308	349	3,3	22,0
Сероуглерод	1263	363	223	299	1,0	50,0
Спирт						
изоамиловый	816	628	310	335	1,07	5,0
бензиловый	1050	673	360	418	1,0	15,5
н-бутиловый	814	683	304	333	1,52	7,9
изобутиловый	820	828	299	323	1,89	7,3
метиловый	795		280	312	6,0	34,7
н-пропиловый	803	737	293	326	2,02	13,55
изопропиловый	785	643	281	310	2,25	11,65
этиловый	789	693	284	314	3,6	19,0
Стирол	902	803	299	332	1,08	6,2
Голуол	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 уксусноизоамиловый	870	703	276	330	0,2	4,35
Эфир уксусноэтиловый	881	673				

**ВЕЛИЧИНЫ ПАРАМЕТРОВ  $k$  и  $l$   
ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРЕДЕЛОВ  
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

Гомологический ряд	Формула $n=1,2,3,4,\dots$	Параметры	
		$k$	$l$
Нормальные алканы	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6957}{0,7874}$	$\frac{73,8}{50,3}$
2-метилалканы	$(\text{CH}_3)_2-\text{CH}(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6885}{0,7900}$	$\frac{74,9}{52,2}$
Нормальные 1-алканы	$\text{CH}_2=\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,6867}{0,7876}$	$\frac{74,5}{49,5}$
Нормальные жирные спирты	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5746}{0,6928}$	$\frac{73,8}{50,3}$
2-метилкарбинолы	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$	$\frac{0,6582}{0,7278}$	$\frac{44,1}{21,5}$
н-Алкилформиаты	$\text{HCOO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5359}{0,6050}$	$\frac{47,6}{25,0}$
н-Акилацетаты	$\text{CH}_3\text{COO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$	$\frac{0,5940}{0,7761}$	$\frac{50,9}{40,8}$

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

Таблица 7

**ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ НЕКОТОРЫХ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ, Па**

Вещество	133,322	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13332,2	26664,4	53328,8	101325
	Температура, К								
Акриловая кислота	276,5	312,0	325,0	339,2	348,0	359,1	376,3	395,0	414,0
Альдегид уксусный	191,5	216,2	225,2	235,2	241,6	250,4	263,0	277,9	293,3
Ангидрид уксусный	274,7	309,0	321,8	335,1	343,8	355,2	373,0	392,8	412,6
Ацетон	213,6	241,9	252,2	263,6	271,0	280,7	295,7	312,5	329,5
Бензол	236,3	261,5	270,4	280,6	288,4	299,1	315,2	333,6	353,1
Бромистый этил	198,7	225,5	235,2	246,3	253,5	263,0	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
Метилэтилкетон	224,2	255,3	266,5	279,0	287,0	298,0	314,6	333,0	352,6
Метилциклогексан	237,1	269,8	281,7	295,0	303,5	315,1	332,6	252,6	373,9
3-Метил-2-бутанол	253,1	281,3	291,3	302,6	309,2	318,5	332,0	346,8	361,9
2-Метилбутан	190,1	216,0	225,7	236,5	243,4		267,1	283,5	300,8
Окись этилена	198,0	224,0	233,7	244,5	251,7	261,0	275,1	290,8	307,5
Октан	259,0	281,3	304,5	318,1	326,8	338,7	356,	377,0	398,6
Пропилбензол	279,3	316,4	329,8	344,6	354,1		386,5	408,7	432,2
Спирт									
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

Продолжение табл. 7

Вещество	133,322	1333,22	2666,44	5332,88	7999,32	13332,2	26664,4	53328,8	101325
	Температура, К								
бутиловый (вторичный)	270,8	389,9	300,3	311,1	318,2	327,1	340,9	356,9	372,5
бутиловый (третичный)	252,6	278,5	287,3	297,5	304,0	312,8	325,7	341,0	355,9
изобутиловый	264,0	287,3	294,7	317,1	324,7	334,5	348,9	364,4	381,0
метиловый	229,0	256,8	267,0	278,0	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	355,0	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	307,9	321,4	336,5	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
Этилциклопентан	240,8	272,9	284,7	298,0	306,4	318,0	335,4	355,3	381,4
Эфир									
диэтиловый	198,7	224,9	234,5	245,2	251,2	261,5	275,2	290,9	307,6
уксосонометиловый	215,8	243,7	253,9	265,1	272,5	282,4	297,0	313,0	330,8
уксосонопропиловый	246,3	278,4	289,0	301,8	310,0	320,8	337,0		374,8
уксосоноэтиловый	229,6	259,5	270,0	282,1	289,6	300,	315,0	332,3	350,1

**ТЕМПЕРАТУРА САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ (К)  
НЕКОТОРЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЦЕПИ**

$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$
3,0	743	6,0	507	9,0	482	12,0	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,4	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,5	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,6	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4,0	686	7,0	496	10,0	479	13,0	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477
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	7,6	492	10,5	478	13,5	476
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5,0	500	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	475

**ТЕМПЕРАТУРА САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ (К)  
НЕКОТОРЫХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ УГЛЕРОДНОЙ ЦЕПИ**

$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$
-2,0	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
-1,0	835	1,0	712	3,0	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
0,2	827	1,8	704	3,8	696
0,1	824	1,9	703	3,9	696
0,0	819	2,0	703	4,0	695

Таблица 10

**ТЕМПЕРАТУРА САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ (К)  
НЕКОТОРЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОДНОАТОМНЫХ СПИРТОВ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ УГЛЕРОДНОЙ ЦЕПИ**

$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$	$L_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$
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	4,8	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	685	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

**ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА  
МИНИМАЛЬНОЙ ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ**

Параметры	Значения параметров при разбавлении смеси		
	азотом	водяным паром	Двуокисью углерода
$h'_{f_0}$ моль/Дж	$0,864 \cdot 10^{-5}$	$0,800 \cdot 10^{-5}$	$0,735 \cdot 10^{-5}$
$h'_{\phi}$	1,256	0,780	0,579
$h'_c$	2,5277	1,651	1,251
$h'_H$	0,7592	0,527	0,418
$h'_o$	0,197	1,446	0,542
$h'_N$	-0,151	-0,147	-0,135
$h'_{c=c}$	1,500	1,500	1,500
$h''_{\phi}$	2,800	2,236	2,020
$h''_c$	5,946	5,000	4,642
$h''_H$	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



Т а б л и ц а 12

## ЗНАЧЕНИЯ КОНСТАНТ УРАВНЕНИЯ АНТУАНА

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Константы уравнения Антуана			Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Показатель «n» в уравнении (3.4, a)
			A	B	C		
н-Амилацетат	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130,196	7,16870	1579,510	221365	0,0520	1,87
Амилен	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70,134	6,78568	1014,294	229,783	0,0690	1,84
н-Амиловый спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88,149	7,18246	1287,625	161,330	0,0661	1,87
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,030	-	-	-	0,198	1,88
Анилин	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93,128	6,92129	1457,020	176,195	0,0622	1,87
Ацетальдегид	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	44,053	7,19160	1093,537	233,413	0,11	1,83
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	-	-	-	0,18	1,79
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58,080	7,25058	1281,721	237,088	0,109	1,90
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,113	6,48898 6,98426	902,275 1252,776	178,099 225,178	0,0775	1,86
Бутадиен 1,3	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54,091	-	-	-	0,0806	1,82
н-Буган	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,123	-	-	-	0,0605	1,87
Бутен-1	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,107	-	-	-	0,0801	1,83
транс-Бутен-2	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,107	-	-	-	0,0801	1,82
н-Бутилацетат	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116,160	7,00641	1340,743	199,757	0,0574	1,87
н-Бутиловый спирт	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,122	9,59730	2664,684	279,638	0,0681	1,86
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	-	-	-	0,66	1,70
Винилхлорид	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	62,499	-	-	-	0,104	1,82
н-Гексадекан	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226,445	6,78749	1656,405	136,869	0,0347	1,86
н-Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,177	6,87024	1166,274	223,661	0,0663	1,55
н-Гексиловый спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	102,176	7,27800	1420,273	165,469	0,0588	1,87
н-Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100,203	6,95154	1295,405	219,819	0,0609	1,54
Гидразин	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	32,045	8,87325	2266,447	266,316	0,167	1,86
Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	92,094	9,05297	3074,220	214,712	0,08	1,9
н-Декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142,284	7,39530	1809,975	227,700	0,0502	1,45

Продолжение табл. 12

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Константы уравнения Антуана			Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Показатель «n» в уравнении (3.4, a)
			A	B	C		
Дивиниловый эфир	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O	70,091	6,98810	1055,259	228,589	0,0765	1,84
Диметиловый эфир	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46,069	-	-	-	0,108	1,85
Диметилформамид	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO	73,094	7,03446	1482,985	204,342	0,0898	1,87
Диоксан-1,4	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88,106	7,51611	1632,425	250,725	0,0758	1,85
Дифтордихлорметан	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	120,914	-	-	-	0,0806	1,81
1,2-Дихлорэтан	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	98,960	7,66135	1640,179	259,715	0,0845	1,86
Диэтиламин	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	73,138	7,22314	1267,557	236,329	0,0756	1,85
Диэтиловый эфир	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,122	6,99790	1098,945	232,372	0,0772	2,14
н-Додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170,337	8,17081	2463,739	253,884	0,0399	1,88
Изобутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,123	-	-	-	0,0819	1,87
Изобутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,11	-	-	-	0,0801	1,82
Изобутиловый спирт	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,122	8,70512	2058,392	245,642	0,0756	1,87
Изопентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,150	6,79306	1022,551	233,493	0,0700	1,76
Изопропилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120,194	6,93773	1460,668	207,652	0,0615	1,87
Изопропиловый спирт	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60,096	8,38,562	1733,000	232,380	0,0831	1,92
м-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,167	7,00849	1461,925	215,073	0,0671	1,87
о-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,167	6,99891	1474,679	213,686	0,0671	1,88
п-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,167	6,99184	1454,328	215,411	0,0671	1,87
Метан	CH <sub>4</sub>	16,0426	-	-	-	0,196	1,76
Метиловый спирт	CH <sub>4</sub> O	32,042	8,22777	1660,454	245,818	0,129	2,08
Метилпропилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86,133	7,8642	1870,4	273,2	0,0664	1,86
Метилэтилкетон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72,107	7,02453	1292,791	232,340	0,0760	1,86
Нафталин	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128,173	10,55455 7,67291	3123,337 2206,690	243,569 245,127	0,0622	1,89
н-Нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128,257	7,05283	1510,695	211,502	0,0499	1,57
Окись углерода	CO	28,0104	-	-	-	0,149	1,72
Окись этилена	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	44,0530	-	-	-	0,110	1,83

Продолжение табл. 12

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Константы уравнения Антуана			Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Показатель «n» в уравнении (3.4, a)
			A	B	C		
н-Октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,230	6,96903	1379,556	211,896	0,0503	1,77
н-Гептадекан	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212,418	6,94237	1739,084	157,545	0,0358	1,90
н-Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,150	6,84715	1062,555	231,805	0,0729	1,83
*-Пиколин	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93,128	7,30064	1632,315	224,787	0,0754	1,88
*Пиродин	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> N	79,101	6,78610	1217,730	196,342	0,0828	1,87
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,096	-	-	-	0,0977	1,80
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,080	-	-	-	0,0962	1,82
н-Пропиловый спирт	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60,096	8,31708	1751,981	225,125	0,085	1,88
Сероводород	H <sub>2</sub> S	34,076	-	-	-	0,141	1,82
Серовуглерод	CS <sub>2</sub>	76,131	7,00048	1202,471	245,616	0,0890	1,69
Стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104,161	7,94049	2113,057	272,986	0,0674	1,88
Тетрагидрофуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72,107	5,99964	753,805	175,793	0,0588	1,84
н-Тетрадекан	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198,391	7,27514	1950,497	190,513	0,0370	1,89
Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92,140	6,95508	1345,087	219,516	0,0753	1,65
н-Тридекан	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184,364	7,96895	2468,910	250,310	0,0384	1,89
2,2,4-Триметилпентан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,230	6,81171	1259,150	221,085	0,0427	1,86
Уксусная кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60,052	-	-	-	-	2
Идеальный газ							
Уксусная кислота	C <sub>3,7</sub> H <sub>7,4</sub> O <sub>3,7</sub>	111,097	7,79846	1789,752	245,908	0,107	1,90
н-Ундекан	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	153,311	7,68008	2102,959	242,574	0,0417	1,88
Формальдегид	CH <sub>2</sub> O	30,026	6,28480	607,399	197,626	0,146	1,81
Фталевый ангидрид	C <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	148,118	7,99959	2879,067	277,501	0,0616	1,87
Фтортрихлорметан	CCl <sub>3</sub> F	137,368	-	-	-	0,0603	1,83
Хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	112,558	7,26112	1607,316	235,351	0,0628	2,09
Хлорэтан	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	64,514	6,82723	954,119	229,554	0,0981	1,82

Продолжение табл. 12

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Константы уравнения Антуана			Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Показатель «n» в уравнении (3.4, a)
			A	B	C		
Циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84,161	6,64788	1095,531	210,064	0,0648	1,89
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,069	-	-	-	0,121	1,78
Этилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88,106	6,992409	1200,297	214,262	0,0733	1,89
Этилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,167	6,95904	1425,464	213,345	0,0671	1,87
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	-	-	-	0,109	1,80
Этиленгликоль	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	62,068	9,01261	2753,183	252,009	0,099	1,87
Этиловый спирт	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46,069	8,68665	1918,508	252,125	0,110	1,51
Этилцеллозольв	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	90,122	8,74133	2392,56	273,15	0,0721	1,86
Бензин А-72 (зимний) ГОСТ 2084-67	C <sub>6,991</sub> H <sub>13.108</sub>	97,2	5,07020	682,876	222,066	-60÷85	2
Бензин АИ-93 (летний) ГОСТ 2084-67	C <sub>7,024</sub> H <sub>13.706</sub>	98,2	4,99831	664,976	221,695	-60÷95	2
Бензин АИ-93(зимний) ГОСТ 2084-67	C <sub>6,911</sub> H <sub>12.168</sub>	95,3	5,14031	695,019	223,220	-60÷90	2
Бензин авиационный Б-70 ГОСТ1012-72	C <sub>7,267</sub> H <sub>14.796</sub>	102,2	8,41944	2629,65	384,195	-40÷110	2
Дизельное топливо «З» ГОСТ 305-73	C <sub>12,343</sub> H <sub>23.889</sub>	172,3	5,95338	1255,73	199,523	40÷210	2
Дизельное топливо «Л» ГОСТ 305-73	C <sub>14,511</sub> H <sub>29.120</sub>	203,6	5,87629	1314,04	192,473	60÷240	2
Керосин осветительный КО-20 ГОСТ 4753-68	C <sub>13,595</sub> H <sub>26.860</sub>	191,7	5,69697	1211,73	194,677	40÷240	2
Керосин осветительный КО-22 ГОСТ 4753-68	C <sub>10,914</sub> H <sub>21.832</sub>	153,1	6,47119	1394,72	204,260	40÷190	2
Керосин осветительный КО-25 ГОСТ 4753-68	C <sub>11,054</sub> H <sub>21.752</sub>	154,7	6,00016	1223,85	203,341	40÷190	2
Ксилол (смесь изомеров) ГОСТ 9410-71	C <sub>7,99</sub> H <sub>9.98</sub>	106,0	7,05479	1478,16	220,535	0÷50	2

Продолжение табл. 12

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Константы уравнения Антуана			Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Показатель «n» в уравнении (3.4, a)
			A	B	C		
Уайт-спирит ГОСТ 3134-52*	C <sub>10,5</sub> H <sub>21,0</sub>	147,3	8,01130	2218,3	273,15	20÷80	2
Масло трансформаторное ГОСТ 10121-76	C <sub>21,74</sub> H <sub>42,28</sub> S <sub>0,04</sub>	303,9	7.75932	2524,17	174,010	164÷343	2
Масло АМТ-300 ТУ 38-1Г-1-68	C <sub>21,74</sub> H <sub>42,28</sub> S <sub>0,04</sub>	312,9	6,99959	2240,001	167,85	170÷376	2
Масло АМТ-300Т ТУ 38 101242-72	C <sub>19,04</sub> H <sub>24,58</sub> S <sub>0,19</sub> 6N <sub>0,07</sub>	260,3	6,49540	2023,77	164,09	171÷396	2
Растворитель М (н-бутилацетат-30; этилацетат-5; этиловый спирт-60; изобутиловый спирт-5)	C <sub>2,761</sub> H <sub>7,147</sub> O <sub>1,1</sub> 87	59,4	8,93202	2083,566	267,735	0÷50	2
Растворитель РМЛ ТУКУ 467-56 (толуол-10; этиловый спирт-64; н-бутиловый спирт-10; этилцеллозольв-16)	C <sub>2,645</sub> H <sub>5,910</sub> O <sub>1,0</sub> 38	55,2	9.57161	2487,728	290,920	0÷50	2
Растворитель РМЛ-218 МРТУ 6-10-729-68 (н-бутилацетат-9; этилацетат-16; ксилол-21,5; толуол-21,5; этиловый спирт-16; н-бутиловый спирт-3; этилцеллозольв-13)	C <sub>4,791</sub> H <sub>8,318</sub> O <sub>0,9</sub> 71	81,5	8,07751	1761,043	251,546	0÷50	2

Окончание табл. 12

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса	Константы уравнения Антуана			Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Показатель «n» в уравнении (3.4, a)
			A	B	C		
Растворитель РМЛ-215 ТУ 6-10-1013-70 (н-бутилацетат-18; ксилол-25; толуол-25; н-бутиловый спирт-15; этилцеллозольв-17)	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,8}$ 45	95,0	7,71160	1699,687	241,000	0÷50	2
Растворитель Р-4 (н-бутилацетат-12; толуол-62; ацетон-26)	$C_{5,452}H_{7,606}O_{0,5}$ 35	81,7	7,17192	1373,667	242,828	-15÷100	2
Растворитель Р-4 (ксилол-15; толуол-70; ацетон-15)	$C_{6,231}H_{7,798}O_{0,2}$ 23	86,3	7,15273	1415,199	244,752	-15÷100	2
Растворитель Р-5 ((н-бутилацетат-30; ксилол-40; ацетон-30)	$C_{5,309}H_{8,665}O_{0,8}$ 97	86,8	7,178501	1378,851	245,039	-15÷100	2
Растворитель Р-12 ((н-бутилацетат-30; ксилол-10; толуол-60)	$C_{6,837}H_{9,217}O_{0,5}$ 15	99,6	7,04804	1403,079	221,483	0÷100	2

Андросов Александр Сергеевич  
Салеев Евгений Павлович

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ  
по курсу  
«ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»

Редактор Г.А. Науменко  
Компьютерный набор Л.А. Крошкина  
Корректор

Подписано в печать  
Бумага офсетная  
Тираж 700

Печ. л.

Формат 60×90 1/16  
Уч.-изд. л.  
Заказ

---

Академия ГПС МЧС России  
129306, Москва, ул. Б. Галушкина, 4