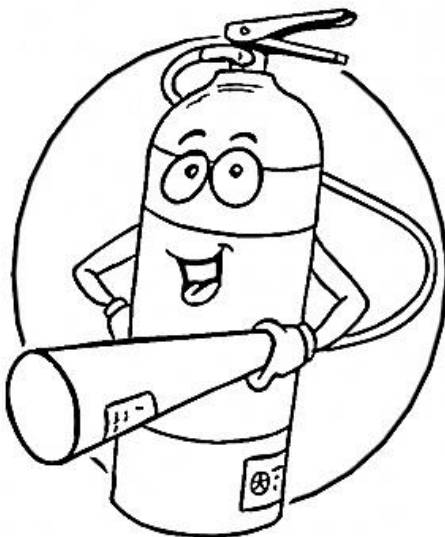


**Г.А. Тихановская  
Л.М. Воропай**

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**



Вологда  
2014

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Вологодский государственный университет

**Г.А. Тихановская**  
**Л.М. Воропай**

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**

Методическое пособие

Вологда  
2014

УДК 544.03:614.844(076)  
ББК 68.923я73  
Т46

Рецензенты:

*Д.В. Карлович*, начальник управления пожаротушения ГУ МЧС России  
по Вологодской области;  
*М.Б. Гусев*, главный эксперт ЭКЦ УМВД России по Вологодской области

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВоГУ

**Тихановская, Г.А.**

**Т46. Физико-химические основы развития и тушения пожаров:** метод.  
пособие / Г.А. Тихановская, Л.М. Воропай. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 95 с.

Методическое пособие по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» предназначено для студентов направления бакалавриата 20.03.01 «Техносферная безопасность», профиль «Защита в чрезвычайных ситуациях».

Методическое пособие составлено в соответствии с программой курса и может быть использовано студентами всех форм обучения. В методическое пособие включены решения типовых задач по основным разделам курса, задачи для выполнения контрольных работ студентами заочного отделения, практические и лабораторные работы. Приложения, включающие таблицы, необходимы для осуществления расчетов в практических работах и при выполнении контрольных работ студентами заочного отделения.

Пособие может быть использовано при самостоятельной работе и при подготовке к экзаменам студентами направления «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

УДК 544.03:614.844(076)  
ББК 68.923я73

© ВоГУ, 2014  
© Тихановская Г.А., Воропай Л.М. 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Специалисту направления «Техносферная безопасность» необходимо владеть как теоретическими основами физико-химических процессов развития и тушения пожаров, так и методами расчетов основных параметров пожара, таких как:

- стехиометрические расчеты расхода воздуха на горение и расчет объема продуктов сгорания;
- расчет теплоты и температуры горения на основании термодинамических расчетов и по приведенным формулам;
- определение температуры самовоспламенения и определение йодного числа и т.д.

Предлагаемое пособие включает решение типовых задач по всем разделам курса и может служить руководством при самостоятельном выполнении контрольных работ студентами заочного отделения.

Практические и лабораторные работы, включенные в пособие, призваны сформировать у студента представление о законах и зависимостях процессов горения и пожаротушения. Это поможет выработать правильный подход к оценке конкретного пожара и выбрать оптимальные методы его ликвидации.

В приложениях приведено большое количество справочного материала по физико-химическим параметрам пожара.

Правильное использование справочного материала и умение свободно работать с таблицами должно способствовать быстрому определению пожарной ситуации и выбору стратегии по предотвращению бедствия.

Пособие является дополнением к учебному пособию по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» часть I и II, где изложены теоретические основы процессов горения и пожаротушения.

## 1. РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

### 1. Определение плотности газа при определенных условиях

При нормальных условиях плотность азота равна 1,25 г/л. Определить плотность газа при 0°C и давлении  $5,065 \cdot 10^5$  Па.

**Решение:** Из закона Бойля – Мариотта вытекает следствие: при постоянной температуре плотность газа ( $\rho$ ) прямо пропорциональна его давлению:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2},$$

тогда  $\rho_2$  – плотность азота при давлении  $p_2$  будет равна:

$$\rho_2 = \frac{p_2 \cdot \rho_1}{p_1} = \frac{5,065 \cdot 10^5 \cdot 1,25}{1013 \cdot 10^5} = 6,25 \text{ (г/л)}$$

### 2. Определение объема газа при переменных условиях

При температуре 18°C и давлении 98,64 кПа объем газа равен 2 л. Чему будет равен объем газа при нормальных условиях?

**Решение:** Объединенный закон Гей-Люссака – Бойля-Мариотта выражается уравнением  $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$ , где  $p$  – давление и  $V$  – объем данной массы газа при температуре  $T_1$ ;  $p_0$  – давление,  $V_0$  – объем данной массы газа при нормальных условиях, т.е.  $T_0 = 273$ , а  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па. Данные задачи переводим в единицы СИ и находим объем:

$$V_0 = \frac{pVT_0}{Tp_0}; V_0 = \frac{98640 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 273}{291 \cdot 1013 \cdot 10^5} = 0,00183 \text{ (м}^3\text{)} \text{ или } 1,83 \text{ л.}$$

### 3. Определение объема газа при нормальных условиях

Какой объем занимает 2 моль кислорода при нормальных условиях?

**Решение:** Закон Авогадро: в равных объемах различных газов при одинаковых условиях содержится равное число молекул.

Число молекул ( $N_A$ ) в 1 моль вещества одинаково у всех веществ и равно  $6,02 \cdot 10^{23}$  (число Авогадро). Следовательно, количества веществ 1 моль, находящихся в газообразном состоянии при одинаковой температуре и одинаковом давлении, занимают равные объемы. При нормальных условиях (температура 0°C и давление =  $1,01325 \cdot 10^5$  Па) объем 1 моль газа = 22,414 л  $\approx$  22,4 л (мольный объем газа). Тогда 2 моль газа ( $O_2$ ) займет объем =  $22,4 \cdot 2 = 44,8$  литра.

### 4. Определение массы газа по его объему при переменных условиях

Найти массу 1 литра  $O_2$  при температуре 17°C и нормальном давлении.

**Решение:** уравнение состояния идеального газа – уравнение Клайперона-Менделеева для 1 моль газа имеет вид:  $pV=RT$ , а для любого количества газо-

образного вещества:  $pV=nRT$ ; где  $R$  – универсальная газовая постоянная, числовое значение которой зависит от единиц измерения других величин. Ее величина выражается в единицах СИ Дж/моль·К;  $n$  – число моль газа =  $m/M$ ; где  $m$  – масса вещества. Тогда

$$m = \frac{pVM}{RT} = \frac{10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 32}{8,31 \cdot (273 + 17)} = 1,33 \text{ г}$$

*5. Нахождение количества вещества по его объему при определенных условиях*

Какое количество вещества и какая масса кислорода находится в газометре емкостью 10 л при 20°C и под давлением 100 кПа?

**Решение:** уравнение состояния идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева):  $pV=nRT$  решаем его относительно количества вещества ( $n$ ):

$$n = \frac{pV}{RT}$$

Данные задачи подставляем в уравнение в единицах СИ:  $R = 8,314 \text{ Дж/(моль·К)}$ ;  $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $T = 273 + 20 = 293 \text{ К}$ ,  $V = 0,01 \text{ м}^3$ .

$$n = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,01}{8,314 \cdot 293} = 0,41 \text{ (моль)}$$

$m$  (масса в-ва) =  $nM$ ;  $m = 0,41 \cdot 32 = 13,12 \text{ г}$ .

*6. Определение парциального давления газа и состава смеси газов*

0,5 моль водорода и 0,25 моль азота находятся в газометре вместимостью 5 л при 10°C. Вычислить парциальное давление каждого из газов и состав смеси в объемных долях.

**Решение:** Парциальное давление каждого компонента находим из уравнения Клайперона-Менделеева:  $pV = nRT$ ;  $p = \frac{nRT}{V}$ ;

$$P_{(H_2)} = \frac{0,5 \cdot 8,314 \cdot 283}{0,005} = 2,35 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad P_{(N_2)} = \frac{0,25 \cdot 8,314 \cdot 283}{0,005} = 1,18 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

По формуле:  $X$  (мольная доля) =  $\frac{\varphi}{100}$ , где  $\varphi$  – объемная доля (%). Тогда:

$$\varphi_{(H_2)} = \frac{0,5 \cdot 100}{0,5 + 0,25} = 66,7 \%; \quad \varphi_{(N_2)} = \frac{0,25 \cdot 100}{0,5 + 0,25} = 33,3 \%;$$

*7. Определение мольной доли горючего в стехиометрической смеси*

Определить мольную долю горючего в стехиометрической смеси метана с кислородом.

**Решение:** Если горючие (углеводород) и окислитель (кислород) расходуют друг друга полностью, образуя двуокись углерода ( $CO_2$ ) и воду ( $H_2O$ ), то такая смесь называется стехиометрической. Следовательно:  $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ .

Мольная доля горючего ( $X_{\text{гор.стех}}$ ) равна числу моль горючего ( $\text{CH}_2$ ), отнесенного к общему числу моль в смеси. Т.е.  $X_{\text{гор.стех}} = 1/3$ ; Уравнение в общем виде:  $X_{\text{гор.стех}} = \frac{1}{1+v}$ , где  $v$  обозначает число моль  $\text{O}_2$  в уравнении реакции с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Ответ:  $1/3$

#### 8. Определение числа моль окислителя и мольную долю горючего в стехиометрической смеси

Определить число моль  $\text{O}_2$  и мольную долю горючего  $X$  для стехиометрической смеси пропана с воздухом.

**Решение:** В том случае, если окислителем является воздух, следует принимать во внимание что: сухой воздух содержит: 21% кислорода; 78% азота; 1% благородных газов. Тогда для воздуха мольная доза азота составит 3,762 мольных долей кислорода ( $79:21=3,762$ ). Уравнение реакции горения пропана в воздухе  $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 + 5 \cdot 3,762 \text{N}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 5 \cdot 3,762 \text{N}_2$ .

$$\text{Тогда: } X_{\text{гор.стех}} = \frac{1}{1+5+3,762 \cdot 5} \cdot 100 = 4,03$$

Ответ: число моль кислорода ( $\nu_{\text{O}_2}$ ) = 5; мольная доля горючего ( $X_{\text{C}_3\text{H}_8}$ ) = 4,03 моль %

#### 9. Определение мольной и массовой доли окислителя в стехиометрической смеси

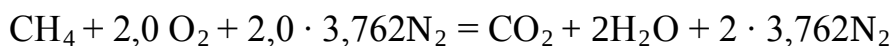
Сколько кислорода  $\text{O}_2$  необходимо для стехиометрического горения метана. Найти молярное отношение ( $X$ ) и массовое отношение ( $\omega$ ).

**Решение:** стехиометрическое горение метана выражается уравнением  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ . Молярное отношение ( $X$ ) – это отношение числа моль кислорода к числу моль всей смеси, т.е.  $X = 2/3$ ; Массовое отношение ( $\omega$ ) – это отношение массы  $\text{O}_2$  к массе всей смеси. Т.е.  $\omega = \frac{32 \cdot 2}{16 + 64} = \frac{4}{5}$

#### 10. Нахождение мольной (моль %) и массовой доли горючего (вес %) для стехиометрической смеси

Каковы значения мольной ( $X$ ) и массовой ( $\omega$ ) долей горючего для стехиометрической смеси метана с воздухом.

**Решение:** Уравнение реакции:



Мольная доля горючего (X) – это отношение числа моль горючего к числу моль всех компонентов смеси.

$$X = \frac{1}{1+2+2 \cdot 3,762} \cdot 100 = 9,5 \text{ моль \%};$$

$$\omega = \frac{16}{16 + 64 + 105,3} \cdot 100 = 8,64 \text{ вес \%}$$

#### 11. Нахождение стехиометрической концентрации горючего в воздухе

Рассчитать стехиометрическую концентрацию этиленгликоля в воздухе.

**Решение:** Для расчета стехиометрической концентрации этиленгликоля в воздухе ( $\varphi_{\text{ст}}$ ) используем формулу:  $\varphi_{\text{ст}} = \frac{100}{4,84\beta + 1}$ , где (в общем случае)  $\beta = m_c + m_s + m_{\text{si}} + 2,5m_p + 0,25(m_n - m_x) - 0,5m_o$  где  $m_{\text{c,s,si,p,n,o}}$  – число атомов углерода, серы, кремния, фосфора, водорода и кислорода в молекуле горючего;  $m_x$  – суммарное число атомов F, Cl, Br, J в молекуле горючего. Тогда этиленгликоль  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ .  $\beta = 2 + 0,25 \cdot 6 - 0,5 \cdot 2 = 2,5$ .

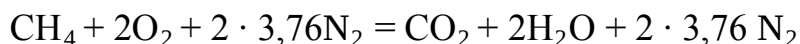
Находим  $\varphi_{\text{ст}} = \frac{100}{4,84 \cdot 2,5 + 1} = 7,63 \%$

#### 12. Расчет объема воздуха, идущего на горение газообразного горючего

Рассчитать объем воздуха, необходимого для полного сгорания 5 м<sup>3</sup> метана.

**Решение:**

1 способ (химический): Уравнение (брутто):



Из уравнения следует, что на 1 моль  $\text{CH}_4$ , т.е. 22,4 л расходуется 2+2·3,76моль, т.е. 2·22,4+22,4·2·3,76 (л) воздуха. Составляем пропорцию:

22,4 л  $\text{CH}_4$  ----- (1+3,76)44,8 л. воздуха

5 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$  ----- X м<sup>3</sup> воздуха.

Следовательно  $X = V_{\text{в}} = \frac{5 \cdot (1+3,76) \cdot 44,8}{22,4} = 47,6 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$

2 способ (технический):

Расчет производится по формуле:

$$V_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot \beta \cdot V_{\text{г}} \text{ (м}^3\text{/м}^3 \text{ или кмоль/кмоль)}$$

где  $V_{\text{в}}^0$  – объем воздуха (н.у.)

$\beta$  – отношение молекул окислителя к количеству моль горючего в уравнении реакции.

$$\beta = n_{\text{O}_2} / n_{\text{г}}$$

тогда  $V_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot 2 \cdot 5 = 47,6 \text{ м}^3$ .

*13. Определение объема воздуха, необходимого для сгорания твердого горючего*

Рассчитать объем воздуха, необходимого для сгорания 10 кг сухих дров (н.у.)

**Решение:**

1 способ (химический):  $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 + 6 \cdot 3,76 N_2 = 6 CO_2 + 5H_2O + 6 \cdot 3,76 N_2$   
На 1 моль  $C_6H_{10}O_5$  расходуется  $6 + 6 \cdot 3,76$  моль воздуха.

Пропорция:

1 моль  $C_6H_{10}O_5$  -----  $6(1+3,76)$  моль воздуха

$\frac{10000}{162}$  моль  $C_6H_{10}O_5$  ----- X моль воздуха

$$X = \frac{10000}{162} \cdot 28,56 \approx 176,3 \text{ моль}$$

1 моль –  $22,4 \text{ м}^3$ , тогда  $X = V_E^0 = 176,3 \cdot 22,4 = 39491 \text{ л} = 39,49 \text{ м}^3/\text{кг}$

2 способ (технический): Для твердых и жидких веществ применяется уравнение:

$$V_E^0 = 4,76 \cdot \beta \cdot V_0 / M_r \text{ (м}^3/\text{кг)}, \text{ где } V_0 = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}; M_r - \text{молярная масса}$$

горючего в-ва.

$$V_E^0 = 4,76 \cdot 6 \cdot 22,4 / 162 = 3,94 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ или } 39,49 \text{ на } 10 \text{ кг.}$$

*14. Определение массы горючего, выгорающего в закрытом помещении определенного объема*

Какая масса сухих дров выгорит на складе  $10 \times 10 \times 4 \text{ м}^3$  до самопроизвольного потухания. Помещение считать замкнутым.

**Решение:**  $V_E = 4,76 \cdot \beta \cdot V_0 / M_r \cdot m \text{ (кг)}$

$$m = \frac{V_E \cdot M_r}{4,76 \cdot \beta \cdot V_0} = \frac{400 \cdot 162}{4,76 \cdot 6 \cdot 22,4} = 101,3 \text{ кг}$$

*15. Определение объема воздуха, идущего на горение твердого горючего сложного состава*

Определить объем воздуха, необходимого для сгорания 5 кг торфа (в%). С – 40,0; Н – 4,0; О – 13,0; N – 20,0; А – 10,0; W – 13,0.

**Решение:** Используем формулу:

$$V_B^0 = V_{B_C}^0 \frac{[C]}{100} + V_{B_H}^0 \frac{[H]}{100} - V_{B_{(O)}}^0 \frac{[O]}{100}$$

Азот, зола и влага при определении воздуха не учитываются.

где  $V_{B_C}^0, V_{B_H}^0$  – количество воздуха, необходимого для горения каждого элемента ( $\text{м}^3/\text{кг}$ )

$[C]$  и  $[H]$  – содержание каждого элемента (вес %) в горючем.

Определяем:  $C + O_2 = CO_2$

$$V_B^0 = 4,76 \cdot \beta \cdot \frac{V_0}{M_2}; \quad \beta = M_0/n_r$$

$$n_C = 1; n_{O_2} = 1; \beta = \frac{1}{1} = 1; \text{ тогда } V_{B_C}^0 = \frac{4,76 \cdot 1 \cdot 22,4}{12} = 8,9$$

$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$

$$n_{H_2} = 1; n_{O_2} = 0,5; \beta_H = \frac{0,5}{1} = 0,5$$

$$V_B^0 = \frac{4,76 \cdot 0,5 \cdot 22,4}{2} = 26,6$$

$V_{B(O)}^0$  – количество воздуха, в котором содержится 1 кг кислорода ( $\text{м}^3/\text{кг}$ )

1 кмоль  $O_2$  (32 кг) -----22,4  $\text{м}^3$ ; 1 кг  $O_2$  занимает объем 22,4/32 ( $\text{м}^3$ ), то

$$V_{B(O)}^0 = \frac{4,76 \cdot 22,4}{32} = 3,3 \text{ м}^3$$

Подставляем в уравнение:

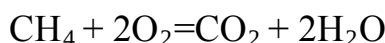
$$V_B^0 = 8,9 \frac{40}{100} + 26,6 \frac{4}{100} - 3,3 \frac{13}{100} = 8,9 \cdot 0,4 + 26,6 \cdot 0,04 - 3,3 \cdot 0,13 = 4,2$$

$$4,2 \cdot 5 \approx 21 \text{ м}^3$$

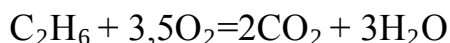
*16. Определение объема воздуха, необходимого для горения определенного объема газа сложного состава*

Какой объем воздуха (н.у.) необходим для сгорания 10  $\text{м}^3$  природного газа, содержащего (об.%):  $CH_4$  (метан) – 87%;  $C_2H_6$  (этан) – 3,5 %;  $C_3H_8$  (пропан) – 2%;  $CO_2$  – 6,3%;  $N_2$  – 2,2 %.

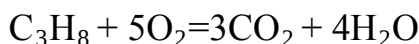
**Решение:** Составляем уравнения реакции горения газа, входящего в состав смеси:



$$v_{B_{CH_4}}^0 = 4,76 \cdot 2 \cdot 0,87 = 8,28 \text{ м}^3/\text{м}^3$$



$$v_{B_{C_2H_6}}^0 = 4,76 \cdot 3,5 \cdot 0,035 = 5,83 \text{ м}^3/\text{м}^3$$



$$v_{B_{C_3H_8}}^0 = 4,76 \cdot 5 \cdot 0,02 = 0,476 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

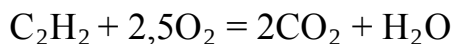
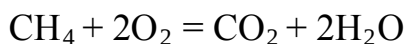
$$v_B^0 = \sum v_{B_i}^0 = 8,28 + 5,83 + 0,476 = 14,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Или в расчете на 10  $\text{м}^3$  – 146  $\text{м}^3$

*17. Определение объема воздуха, идущего на горение определенного объема смеси газов*

Определить объем воздуха, необходимого для 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; записываем уравнение реакции:



$$\text{тогда } V_{\text{B CH}_4}^0 = 4,76 \cdot 2 \cdot 0,2 = 1,904 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{\text{B C}_2\text{H}_2}^0 = 4,76 \cdot 2,5 \cdot 0,4 = 4,76 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{\text{B CO}}^0 = 4,76 \cdot 0,5 \cdot 0,1 = 0,238 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{\text{B}}^0 = 1,9 + 4,76 + 0,238 - 2,5 = 4,398 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$\text{В расчете на 5 м}^3: V_{\text{B}} = 4,398 \cdot 5 = 21,99 \text{ м}^3 \approx 22 \text{ м}^3$$

$$\text{Практическое количество воздуха: } V_{\text{B}} = 22 \cdot 1,8 = 39,6 \text{ м}^3$$

*18. Определение коэффициента избытка воздуха*

Указать величину коэффициента избытка воздуха при горении уксусной кислоты CH<sub>3</sub>COOH, если на горение 1 кг поступило 3 м<sup>3</sup> воздуха.

**Решение:** α – коэффициент избытка воздуха – это отношение объема воздуха практически участвующего в горении к теоретически необходимому.

$$\alpha = \frac{v_{\text{пр}}^0}{v_{\text{теор}}^0}$$

$$v_{\text{пр}} = 3 \text{ м}^3 \text{ (по условию).}$$



$$v_{\text{B CH}_3\text{COOH}}^0 = 4,76 \cdot \beta \cdot 22,4 / M_{\text{CH}_3\text{COOH}}; M_{\text{CH}_3\text{COOH}} = 60 \text{ кг/кмоль}$$

$$v_{\text{теор}}^0 = 4,76 \cdot 2 \cdot \frac{22,4}{60} = 3,55 \text{ м}^3/\text{кг}$$

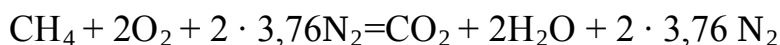
$$\alpha = 3/3,55 = 0,84$$

т.к. α < 1, смесь богатая, образуются продукты неполного сгорания.

*19. Определение объема продуктов горения определенного объема индивидуального вещества*

Определить объем продуктов сгорания 10 м<sup>3</sup> метана

**Решение:** Составляем уравнение горения метана в воздухе.



1. Определяем объем CO<sub>2</sub>. По уравнению реакции составляем пропорцию:

$$22,4 \text{ м}^3 \text{CH}_4 \text{-----} 22,4 \text{ м}^3 \text{CO}_2$$

$$10 \text{ м}^3 \text{CH}_4 \text{-----} X \text{ м}^3 \text{CO}_2$$

$$X = V_{\text{CO}_2}^0 = \frac{10 \cdot 22,4}{22,4} = 10 \text{ м}^3$$

2. Определяем объем  $\text{H}_2\text{O}$  (для определения влажных продуктов реакции).

$$\text{Пропорция: } 22,4 \text{ м}^3 \text{CH}_4 \text{-----} 2 \cdot 22,4 (\text{м}^3) \text{H}_2\text{O}$$

$$10 \text{ м}^3 \text{CH}_4 \text{-----} X' \text{ м}^3 \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{Тогда } X' = V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 22,4}{22,4} = 20 \text{ м}^3$$

3. Находим объем азота ( $X''$ )

$$\text{Пропорция: } 22,4 \text{ м}^3 \text{CH}_4 \text{-----} 2 \cdot 3,74 \cdot 22,4 (\text{м}^3) \text{N}_2$$

$$10 \text{ м}^3 \text{CH}_4 \text{-----} X'' \text{ м}^3 \text{N}_2$$

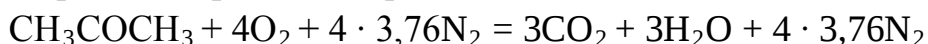
$$\text{Тогда } X'' = V_{\text{N}_2} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{22,4} = 75,2 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{ит}} = 10 + 20 + 75,2 = 105,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

*20. Определение объема и состава продуктов горения определенной массы индивидуального вещества*

Определить объем и состав сухих продуктов сгорания 1 кг ацетона.

**Решение:** Уравнение реакции горения 10 кг ацетона:



$$M_{\text{CH}_3\text{COCH}_3} = 58 \text{ а.е.м.}$$

$$1. \text{ Находим объем } \text{CO}_2: 58 \text{ кг } \text{CH}_3\text{COCH}_3 \text{-----} 3 \cdot 22,4 (\text{м}^3) \text{CO}_2$$

$$10 \text{ кг } \text{CH}_3\text{COCH}_3 \text{-----} X \text{ м}^3 \text{CO}_2$$

$$X = V_{\text{CO}_2} = \frac{10 \cdot 3 \cdot 22,4}{58} = 11,58 \text{ м}^3$$

$$2. \text{ Находим объем азота } (X'): X' = V_{\text{NO}_2} = \frac{10 \cdot 4 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{58} = 58,08 \text{ м}^3$$

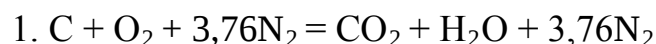
3. Исходя из расчетов, объем сухих продуктов составит:

$$11,58 + 58,08 = 69,66 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

*21. Определение объема влажных продуктов горения определенной массы твердого вещества сложного состава*

Определить объем влажных продуктов сгорания 1 кг каменного угля состава (вес.%): С – 75,8; Н – 3,8; О – 2,8; N – 1,1; S – 2,5; W – 3,0; A – 11,0.

**Решение:**



а) по уравнению реакции находим объем образовавшегося  $\text{CO}_2$ :

$$\text{Пропорция: } 12 \text{ кг С -----} 22,4 \text{ м}^3 \text{CO}_2$$

$$0,758 \text{ кг С -----} X \text{ м}^3 \text{CO}_2$$

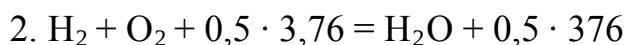
$$X = V_{CO_2} = \frac{0,758 \cdot 22,4}{12} = 1,4 \text{ м}^3$$

б) по уравнению реакции находим объем образовавшегося азота:

Пропорция: 12 кг С ----- 3,76·22,4 (м<sup>3</sup>) азота

0,758 кг С ----- X м<sup>3</sup> азота

$$V_{N_2} = \frac{0,758 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{12} = 5,306 \text{ м}^3$$

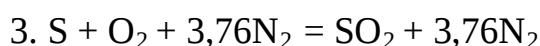


а) По уравнению реакции находим объем паров воды:

Пропорция: 2 кг H<sub>2</sub> ----- 22,4 м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O

0,038 кг H<sub>2</sub> ----- X м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O

$$V_{H_2O} = \frac{0,038 \cdot 22,4}{2} = 0,425 \text{ м}^3$$



а) По уравнению реакции находим объем SO<sub>2</sub>: 32 кг S-----22,4 · 3,76 м<sup>3</sup>N<sub>2</sub>

0,025 кг S----- X м<sup>3</sup> N<sub>2</sub>

$$V_{N_2} = \frac{0,025 \cdot 22,4 \cdot 3,76}{32} = 0,0658 \text{ м}^3$$

4. Находим азот из горючего вещества (1,1 вес %), т.е. 0,011 кг.

Пропорция: 28 кг N<sub>2</sub> ----- 22,4 м<sup>3</sup>

0,011 кг N<sub>2</sub> ----- X м<sup>3</sup>

$$V_{N_2(\text{гор})} = \frac{0,011 \cdot 22,4}{28} = 0,0088 \text{ м}^3$$

5. Находим влагу в горючем веществе: 18 кг H<sub>2</sub>O ----- 22,4 м<sup>3</sup>

0,03 кг H<sub>2</sub>O ----- X

$$V_w = \frac{0,03 \cdot 22,4}{18} = 0,037 \text{ м}^3$$

6. Находим сумму азота, образовавшегося при горении.

$$V_{N_2} = 5,306 + 0,798 + 0,658 + 0,0088 = 6,7708 \text{ м}^3$$

7. Из общего объема азота (6,7708 м<sup>3</sup>) вычитаем объем азота, приходящий-ся на кислород в составе каменного угля.

а) находим объем азота, приходящегося на кислород в составе каменного угля ( $V'_{N_2}$ )

32 кг O<sub>2</sub> ----- 3,76 · 22,4 (м<sup>3</sup>) N<sub>2</sub>

0,028 кг O<sub>2</sub> ----- X м<sup>3</sup> N<sub>2</sub>

$$V'_{N_2} = \frac{0,028 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{32} = 0,0736 \text{ м}^3$$

$$\text{б) } V'_{N_2} = 6,7708 - 0,0736 = 6,6972 \text{ м}^3$$

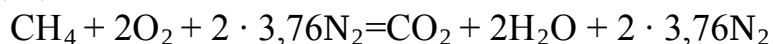
8. Находим объем продуктов горения:  $V_{\text{пр}} = 1,4 + 0,462 + 6,6972 + 0,017 = 8,576 \text{ м}^3/\text{кг}$

22. Определение объема влажных продуктов сгорания определенного объема газа сложного состава

Определить объем влажных продуктов сгорания 1 м<sup>3</sup> доменного газа следующего состава (в%): CO<sub>2</sub> – 10,5; CH<sub>4</sub> – 0,3; CO – 28; N<sub>2</sub> – 58, 5; H<sub>2</sub> – 2,7.

**Решение:** Количество и состав продуктов горения для смеси газов определяется по уравнениям горения каждого газа, входящего в смесь. Негорючие газы переходят в продукты горения, а содержание кислорода в смеси газов снижает количество азота в продуктах горения.

1. Метан CH<sub>4</sub>; 0,3 % об.



а) Находим объем образовавшегося CO<sub>2</sub>:

$$22,4 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 \text{ ----- } 22,4 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

$$0,003 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 \text{ ----- } X$$

$$X = \frac{0,003 \cdot 22,4}{22,4} = 0,003 \text{ м}^3$$

б) Находим объем образовавшегося N<sub>2</sub>:

$$22,4 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 \text{ ----- } 22,4 \cdot 2 \cdot 3,76 (\text{м}^3) \text{ N}_2$$

$$0,003 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 \text{ ----- } X \text{ м}^3 \text{ N}_2$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{0,003 \cdot 22,4 \cdot 2 \cdot 3,76}{22,4} = 0,022 \text{ м}^3$$

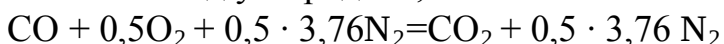
в) Находим объем образовавшейся при горении метана воды:

$$22,4 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 \text{ ----- } 22,4 \cdot 2 (\text{м}^3) \text{ H}_2\text{O}$$

$$0,003 \text{ м}^3 \text{ CH}_4 \text{ ----- } X \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$$

$$X = \frac{0,003 \cdot 22,4 \cdot 2}{22,4} = 0,006 \text{ м}^3$$

2. CO – оксид углерода: 2,8 % об.



а) Находим объем CO<sub>2</sub>:

$$22,4 \text{ м}^3 \text{ CO} \text{ ----- } 22,4 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

$$0,028 \text{ м}^3 \text{ CO} \text{ ----- } X \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{0,028 \cdot 22,4}{22,4} = 0,028 \text{ м}^3$$

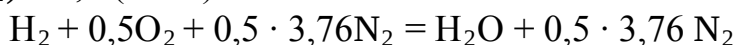
б) При этом образовалось азота:

$$22,4 \text{ м}^3 \text{ CO} \text{ ----- } 22,4 \cdot 0,5 \cdot 3,76 (\text{м}^3) \text{ N}_2$$

$$0,028 \text{ м}^3 \text{ CO} \text{ ----- } X \text{ м}^3 \text{ N}_2$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{0,028 \cdot 22,4 \cdot 0,5 \cdot 3,76}{22,4} = 0,0526 \text{ м}^3$$

3. Водород (H<sub>2</sub>) – 2,7 (% об)



а) Находим объем  $H_2O$ :

$22,4 \text{ м}^3 H_2$  -----  $22,4 \text{ м}^3 H_2O$  (пар)

$0,027 \text{ м}^3 H_2$  -----  $X \text{ м}^3 H_2O$

$$V_{H_2O} = \frac{0,027 \cdot 22,4}{22,4} = 0,027 \text{ м}^3$$

б) При этом образуется азота:

$22,4 \text{ м}^3 H_2$  -----  $22,4 \cdot 0,5 \cdot 3,76 \text{ (м}^3\text{) } N_2$

$0,027 \text{ м}^3 H_2$  -----  $X \text{ м}^3 N_2$

$$V_{N_2} = \frac{0,027 \cdot 22,4 \cdot 0,5 \cdot 3,76}{22,4} = 0,05 \text{ м}^3$$

4. Находим объем  $CO_2$  в составе газа:

$$V_{CO_2} = \frac{10,5}{100} = 0,105 \text{ м}^3$$

5. Находим азот в составе газа

$$V_{N_2} = \frac{58,5}{100} = 0,585 \text{ м}^3$$

6. Находим суммарный объем каждого из продуктов горения

$$\sum V_{CO_2} = 0,28 + 0,003 + 0,105 = 0,388 \text{ м}^3$$

$$\sum V_{H_2O} = 0,027 + 0,006 = 0,033 \text{ м}^3$$

$$\sum V_{N_2} = 0,05 + 0,526 + 0,022 + 0,585 = 1,183 \text{ м}^3$$

7. Находим объем продуктов горения:

$$V_r = 0,388 + 0,033 + 1,183 = 1,604 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

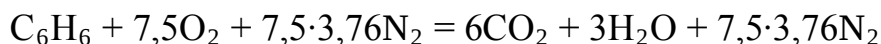
Ответ:  $1,604 \text{ м}^3/\text{м}^3$

### 23. Определение низшей теплоты горения вещества на основании термодинамических расчетов

Рассчитать низшую теплоту горения бензола (кДж/моль); кДж/кг; кДж/м<sup>3</sup>)

**Решение:**

1. По закону Гесса и на основании уравнения реакции горения бензола находим



$$\Delta H_r = 6\Delta H_{298}^0 CO_2 + 3\Delta H_{298}^0 H_2O - \Delta H_{298}^0 C_6H_6$$

где  $\Delta H_{298}^0$  – стандартные энтальпии образования веществ.

$$\Delta H_r = 6 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - (-34,8) = 3142,8 \text{ кДж/моль}$$

или  $3142,8 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}$ .

2. Переводим в кДж/кг:

1 кмоль  $C_6H_6 = 78 \text{ кг}$ , тогда  $3142,8 \cdot 10^3$  ----- 78 кг

X ----- 1 кг

$$\Delta H'_r = X = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{78} = 40292,3 \text{ кДж/кг}$$

3. При сгорании 1 кмоль паров  $C_6H_6$  т.е.  $22,4 \text{ м}^3$  выделяется  $3142,8 \cdot 10^3 \text{ кДж/моль}$

$$\text{тогда } \Delta H_r = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{22,4} = 140303,6 \text{ кДж/м}^3$$

Ответ: Теплота горения  $1 \text{ м}^3$  паров бензола (н.у.) равна  $140303,6 \text{ кДж/м}^3$ ;  
теплота горения  $1 \text{ кг}$  бензола равна  $40292,3 \text{ кДж/кг}$

*24. Определение низшей и высшей теплоты горения вещества по формуле Д.И.Менделеева*

Определить по формулам Д.И. Менделеева высшую и низшую теплоты горения 4 метал 5β оксиэтилтиазола ( $C_6H_9ONS$ )

**Решение:**

1. Определяем процентное отношение элементов в молекуле  $C_6H_9ONS$

$$M_{C_6H_9ONS} = 143 \text{ а.е.м. это } 100\%$$

$$C = 12 \cdot 6 \cdot 100 / 143 = 50,3 \%$$

$$H = 1 \cdot 9 \cdot 100 / 143 = 6,3 \%$$

$$O = 1 \cdot 16 \cdot 100 / 143 = 11,2 \%$$

$$N = 1 \cdot 14 \cdot 100 / 143 = 9,8 \%$$

$$S = 1 \cdot 32 \cdot 100 / 143 = 22,4 \%$$

2. Низшая теплота горения  $C_6H_9ONS$ :

$$Q_n = 339,4 \cdot 50,3 + 1257 \cdot 6,3 - 108,9(11,2 - 22,4) - 25(9 \cdot 6,3 + 0) = 23720,2 \text{ кДж/кг}$$

3. Высшая теплота горения  $C_6H_9ONS$ :

$$Q_v = 339,4 \cdot 50,3 + 1257 \cdot 6,3 - 108,9(11,2 - 22,4) = 25143,38 \text{ кДж/кг}$$

Ответ:  $Q_n = 23720,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $Q_v = 25143,38 \text{ кДж/кг}$ .

*25. Определение низшей теплоты горения смеси газов*

Определить низшую теплоту горения ( $\text{кДж/м}^3$ ;  $\text{кДж/кмоль}$ ) газовой смеси, имеющей следующий состав компонентов смеси (% об):  $CO - 20\%$ ;  $CH_3 - 20\%$ ;  $H_2 - 10\%$ ;  $C_2H_6 - 20\%$ ;  $CO_2 - 10\%$ ;  $N_2 - 10\%$ ;  $O_2 - 10\%$ .

**Решение:** Для смеси газов низшую теплоту горения определяют как сумму теплот сгорания компонентов горючей смеси.

По таблице термодинамических величин находим теплоты сгорания ( $\text{кДж/м}^3$ ).

$$\Delta H_{CO} = 12650 \text{ кДж/м}^3$$

$$\Delta H_{H_2} = 10770 \text{ кДж/м}^3$$

$$\Delta H_{CH_3} = 35820 \text{ кДж/м}^3$$

$$\Delta H_{C_2H_6} = 63690 \text{ кДж/м}^3$$

$$Q_n = 12650 \cdot 0,2 + 10770 \cdot 0,1 + 35820 \cdot 0,2 + 63690 \cdot 0,2 = 23509 \text{ кДж/м}^3$$

2. Теплота горения 1 моль газовой смеси:

1 кмоль газа – 22,4 м<sup>3</sup>

тогда 23509 кДж – 1 м<sup>3</sup>

X – 22,4 м<sup>3</sup>

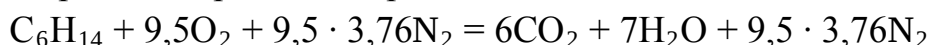
$$Q_H^{CH} = \frac{23509 \cdot 22,4}{1000} = 526,6 \text{ кДж/моль}$$

Ответ:  $Q_H \cdot 1 \text{ м}^3 = 23509 \text{ кДж}$  ;  $Q_H \cdot 1 \text{ моль} = 526,6 \text{ кДж}$

26. *Определение теплоты горения определенного объема стехиометрической смеси*

Рассчитать теплоту горения 1 м<sup>3</sup> стехиометрической гексано-воздушной смеси.

**Решение:** Уравнение реакции горения:



Находим мольную долю горючего в стехиометрической смеси:

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

Теплоту сгорания гексана находим на основании теплот образования веществ.

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

$$Q_H = 3909,6 / 22,4 \cdot 10^3 = 174,5 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3$$

Учитывая, что гексана в смеси 2,2%

$$Q_H^{CH} = 174,5 \cdot 10^3 \cdot 0,022 = 3839 \text{ кДж/м}^3$$

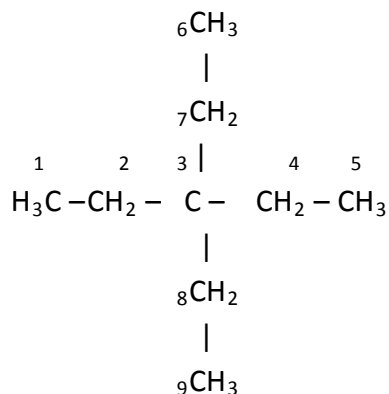
Ответ:  $Q_{H \text{ смеси}} = 3839 \text{ кДж/м}^3$

27.1. *Определение температуры самовоспламенения предельного углеводорода*

Рассчитать  $T_{св}$  3,3-диэтиленпентана

**Решение:**

1. Структурная формула:



2. Нумеруем все атомы углерода.
3. Одинаковые цепи с концевой метильной группой 4.
4. Производим расчет общих чисел цепей.

$$\sum n_i = M(M - 1)/2$$

$n_i$  – число цепей

$M$  – число концевых групп в молекуле.

$$\sum n_i = 4(4 - 1)/2 = 6$$

5. Находим число цепей с одинаковым числом атомов углерода –  $C_5$  – их 6.  
В данном соединении длина всех цепей одинакова.
6. Находим среднюю длину цепи.

$$l_{\text{ср}} = \frac{\sum n_i l_i}{\sum n_i} = \frac{6 \cdot 5}{6} = 5$$

$l_i$  – длина  $i$ -й углеродной цепи.

7. По таблице находим  $T_{\text{вс}} = 560 \text{ K}$

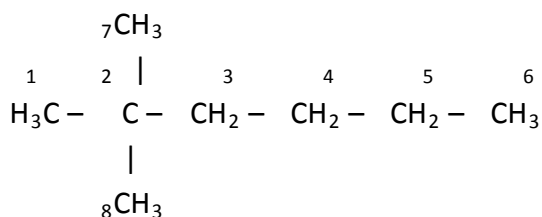
Ответ:  $T_{\text{вс}} = 560 \text{ K}$  3,3 диэтилпентана.

## 27.2. Определение температуры самовоспламенения предельного углеводорода

Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана

**Решение:**

1. Записываем структурную формулу соединения и определяем количество цепей.



$M_p = 4$ , т.к. присутствуют 4 группы  $\text{CH}_3$

$n_i = 6$

2. Находим длину каждой из 6ти цепей и среднюю длину молекулы

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

| $n_i$ | 1-6 | 7-8 | 8-6 | 8-1 | 1-7 | 7-6 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $l_i$ | 6   | 3   | 6   | 3   | 3   | 6   |

По таблице находим  $T_{\text{св}} = 643 \text{ K}$

3. Можно по формуле:  $T_{\text{св}} = 300 + 116\sqrt{5 - 4,5} = 385^0$  или 655K

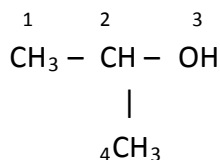
Ответ: 643 – 655 K

### 28. Определение температуры воспламенения предельных спиртов

Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

**Решение:**

1.



$M_p$  – число радикалов 3, т.к. 2 гр. –  $\text{CH}_3$  и 1 гр.  $\text{OH}$

$M_{\text{ц}} = 3$  (содержит гр.  $\text{CH}_3$ )

2. Находим длину каждой цепи

|       |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|
| $n_i$ | 1-3 | 3-4 | 1-4 |
| $l_i$ | 3   | 3   | 3   |

$$l_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 3}{3} = 3$$

По таблице определяем температуру самовоспламенения изопропилового спирта  $T_{\text{вс}} = 706$  K.

Согласно справочным данным  $T_{\text{вс}} \text{ C}_3\text{H}_7\text{OH} = 693$  K.

Относительная ошибка составит:

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

Ответ:  $T_{\text{вс}} = 693$  K, ошибка 1,9%

### 29. Определение температуры самовоспламенения ароматического вещества

Рассчитать температуру самовоспламенения 1 метил-4-этилбензола.

**Решение:**

1. Структурная формула вещества:  $\text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$ ;

$M_p = 3$ , т.к. 2 метильные группы и 1 фенильная группа.

2. Определяем длину цепей.

|       |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|
| $n_i$ | 1-4 | 1-2 | 2-4 |
| $l_i$ | 3-1 | 1-1 | 2-1 |

Длина цепи уменьшается на 1 атом углерода, т.к. в нее входит фенил.

$$l_{\text{ср}} = \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{3} = 1$$

3. По таблице определяем  $T_{\text{вс}} = 712 \text{ K}$ .

Ответ:  $T_{\text{вс}} = 712 \text{ K}$

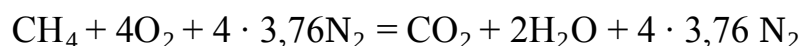
### 30. Определение нижнего концентрационного предела воспламенения

Определить НКПВ метана.

**Решение:** Нижний концентрационный предел воспламенения рассчитывается по уравнению:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{a \cdot n + b}$$

1. Находим  $n$  – число атомов кислорода, необходимого для полного сгорания горючего.



Из уравнения следует что  $n = 4$ .

2. Из таблицы выбираем значения постоянных  $a$  и  $b$ :  $a = 4,342$ ;  $b = 4,679$

3. Подставляем данные в формулу и находим НКПВ

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{4,342 \cdot 4 + 4,679} = 4,5 \% \text{ об.}$$

Ответ: НКПВ = 4,5 % об.

### 31. Вычисление НКПВ смесей нескольких паров или газов по формуле Ле Шателье

Вычислить НКПВ смеси пропана и бутана, если пропана 80% об, бутана 20% об.

**Решение:** В соответствии с формулой Ле Шателье:

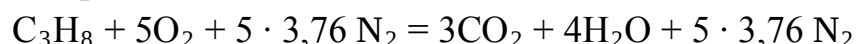
$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{\varphi_{\text{н}(1)}} + \frac{\varphi_2}{\varphi_{\text{н}(2)}} + \dots + \frac{\varphi_n}{\varphi_{\text{н}(n)}}} \quad (1)$$

Находим:

1. НКПВ пропана ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ):

$$\varphi_{\text{н}(\text{C}_3\text{H}_8)} = \frac{100}{a \cdot n + b} \quad (2)$$

где  $n$  – число атомов кислорода, необходимого для полного сгорания пропана (по уравнению реакции).



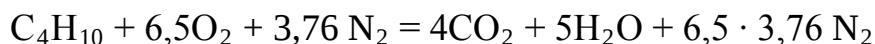
$$n = 10$$

$a$  и  $b$  – эмпирические константы, табл. При  $n = 10$   $a = 4,342$ ;  $b = 4,679$ .

Подставляем в формулу 2 и находим:

$$\varphi_{\text{н}(\text{C}_3\text{H}_8)} = \frac{100}{4,342 \cdot 10 + 4,679} = 2,037 \% \text{ об.}$$

2. Аналогично находим НКПВ бутана ( $C_4H_{10}$ )



$$n = 13$$

$$\varphi_{H(C_4H_{10})} = \frac{100}{4,342 \cdot 13 + 4,679} = 1,6 \% \text{ об.}$$

3. Находим НКПВ смеси (по формуле 1):

$$\varphi_H = \frac{100}{\frac{80}{2,037} + \frac{20}{1,6}} = 1,93 \approx 2 \% \text{ об.}$$

Можно решать по таблицам НКПВ различных веществ.

Ответ: НКПВ смеси составляет  $\approx 2 \% \text{ об.}$

### 32. Определение нижних концентрационных пределов воспламенения по теплоте сгорания

По предельной теплоте горения  $Q_{пр}$  рассчитать НКПВ бутана в воздухе.

**Решение:**

1. Находим по таблице низшую теплоту сгорания бутана  $Q_H = 2882,3 \text{ кДж/моль}$ .

2. Эту величину необходимо пересчитать на  $\text{кДж/м}^3$ .

1 моль бутана ----- 22,4 л, тогда  $Q_H = \frac{2882,3 \cdot 1000}{22,4} = 128,7 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3$

3. По формуле:  $\varphi_{H(\text{НКПВ})} = \frac{1830 \cdot 100}{Q_H} = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 10^3} = 1,42 \% \text{ об.}$

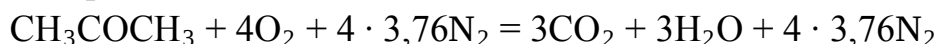
Ответ: 1,42 % об.

### 33. Определение стехиометрической концентрации паров горючего в воздухе при определенных условиях ( $г/м^3$ )

Определить стехиометрическую концентрацию паров ацетона в воздухе при  $t=15^\circ\text{C}$  и  $p=740 \text{ мм рт. ст.}$  в  $г/м^3$ .

**Решение:**

1. Уравнение реакции:



$$X_{\text{гор.стех.}} = \frac{1}{1 + 4 + 4 \cdot 3,76} = \frac{1}{20,04} \cdot 100 = 5 \% \text{ об.}$$

2. Находим стехиометрическую концентрацию ацетона в  $г/м^3$

$$M_{CH_3COCH_3} = 58 \text{ г/моль}$$

3. Находим мольный объем при заданных условиях (Авогадро и объединенный газовый закон).

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}; V_t = \frac{p_0 V_0 T}{p T_0} = \frac{760 \cdot 22,4 \cdot 273 + 15}{740 \cdot 273} = 25,2 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

4. Находим объем смеси:  $20 \cdot 25,2 = 504$  л.

5. Определяем стехиометрическую концентрацию ацетона в г/м<sup>3</sup>.

$$\varphi_{\text{сх}} = \frac{58 \cdot 1000}{504} = 114,8 \text{ г/м}^3$$

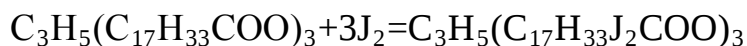
Ответ: 114,8 г/м<sup>3</sup>.

### 34. Определение йодного числа триглицеридов жирных кислот

Определить расчетным путем йодное число триглицерида олеиновой кислоты.

**Решение:**

1. Уравнение реакции триолеата с йодом



2. Молекулярная масса триглицерида равна  $M = 884$  г/моль

Молекулярная масса йода = 254 г/моль

3. Составляем пропорцию:

884 г глицерида ----- 254·3(г) J<sub>2</sub>

100 г масла ----- X г J<sub>2</sub>

$$X = m_{\text{J}} = \frac{100 \cdot 254 \cdot 3}{884} = 86,2 \text{ г}$$

Возможность самовозгорания определяется из следующих закономерностей:

$m_{\text{J}} > 100$  – возможно самовозгорание;

$m_{\text{J}} < 100$  – мало склонны к самовозгоранию;

$m_{\text{J}} < 50$  – самовозгорание невозможно.

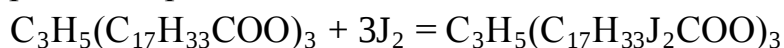
### 35. Определение способности к самовозгоранию различных масел

Определить способность самовозгорания подсолнечного масла, имеющего состав: тристеарат – 9%, триолеат – 38%, триленолеат – 53%.

**Решение:**

1. Стеариновая кислота  $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{16} - \text{COOH}$  – это предельная одноосновная кислота, не содержащая двойных связей, не присоединяет йод и т.о. не оказывает влияние на йодное число. Следовательно, содержание тристеарата при расчете не учитываем.

2. Уравнение реакции триолеата с йодом



$M_{\text{триолеата}} = 884$  г/моль

$M_{\text{J}_2} = 254$  г/моль

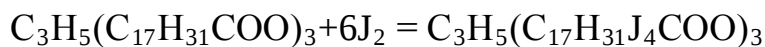
Пропорция:

854 г -----254·3 (г) J

38 г ----- X

$$X = m'_J = \frac{254 \cdot 3 \cdot 38}{884} = 32,75 \text{ г}$$

3. Аналогично для триолеата:



$M_{\text{триолеата}} = 878 \text{ г/моль};$

Пропорция:

878 г -----254·6

53 г ----- X

$$X = m''_J = \frac{254 \cdot 53 \cdot 6}{878} = 92 \text{ г}$$

4. Определяем общее йодное число

$$m_J = 32,75 + 92 = 124,75 \approx 125 \text{ г}$$

Ответ:  $m_J = 125 \text{ г}$ , следовательно, подсолнечное масло склонно к самовозгоранию.

*36. Определение количества тепла, идущего на нагревание до температуры кипения определенного объема воды*

На какую величину снизится температура пламени из-за затрат тепла, идущего на  $10 \text{ м}^3$  тонко распыленной воды для нагревания капелек воды до температуры кипения ( $t_0=10^0\text{C}$ )

**Решение:**

$$Q = C_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot \Delta t = C_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (t_{\text{кип}} - t_0)$$

где  $C_{\text{в}}$  – теплоемкость воды = 4,19 кДж/кг·К

$m_{\text{в}}$  – масса воды, которая находится через плотность.

$$m_{\text{в}} = \rho \cdot V \text{ т.е. } m_{\text{в}} = 10 \cdot 1000 = 10000 \text{ кг}$$

$t_{\text{кип}}$  – температура кипения =  $100^0\text{C}$

$t_0$  – начальная температура воды

$$\text{Тогда } Q = 4,19 \cdot 10000 \cdot 90 = 3,7 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Ответ:  $Q = 3,7 \cdot 10^6 \text{ кДж}$

*37.1. Определение затрат тепла на парообразование (испарение) определенного объема тонкораспыленной воды*

Найти снижение температуры в факеле пламени из-за затрат тепла на парообразование (испарение)  $10 \text{ м}^3$  тонкораспыленной воды.

**Решение:**  $Q = r \cdot m_{\text{в}}$ ;

где  $r$  – скрытая теплота парообразования воды = 2260 кДж/кг.

$$Q = 2260 \cdot 10000 = 22,6 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Ответ:  $Q = 22,6 \cdot 10^6 \text{ кДж}$

*37.2. Определение затрат тепла на парообразование (испарение) определенного объема тонкораспыленной воды*

Найти снижение температуры в факеле пламени за счет смешения паров 10 м<sup>3</sup> воды при температуре 100<sup>0</sup>С и реагентов в зоне реакции и затраты тепла на нагревание паров воды до температуры среды в зоне горения ( $t_{\text{пл}}=1000^0$ )

**Решение:**  $Q = C_p^{\text{сп}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (t_{\text{пл}} - 100)$

$$Q = C_p^{\text{сп}} = 2,52 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$m_{\text{в}}$  – масса воды – 10 000 кг.

$t_{\text{пл}}$  – температура пламени.

$$Q = 2,52 \cdot 10000 \cdot (1000 - 100) = 22,6 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

Ответ:  $Q = 22,6 \cdot 10^6 \text{ кДж}$

*38. Определение теоретической флегматизирующей концентрации флегматизаторов*

Рассчитать теоретическую флегматизирующую концентрацию CO<sub>2</sub> ( $\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}}$ ), необходимую для тушения метана.

**Решение:**

$$\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = \frac{21 - [\text{O}_2]}{21} \cdot 100 (\% \text{ об})$$

где  $[\text{O}_2]$  – предельное содержание кислорода при введении в горючую смесь углекислого газа (табл)

$$\text{тогда } \varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = \frac{21 - 16}{21} \cdot 100 = 23,8 \% \text{ об.}$$

Ответ: 23,8 % об.

*39. Номенклатура галогенпроизводных углеводородов*

Указать формулу и условное обозначение трифторхлордибромэтана по международной номенклатуре

**Решение:** Галогенпроизводные предельных углеводородов, используемые в качестве химически активных ингибиторов (ХАИ), имеют торговые названия. Международный термин «галлон» (в России – хладон). Для их условного обозначения номер галлона составляется следующим образом:

- первая цифра – число атомов углерода;
- вторая - число атомов фтора;
- третья – хлора;
- четвертая – брома;
- пятая – йода.

Количество атомов водорода определяется по оставшимся у углерода валентностям, исходя из общей формулы  $C_n(HFClBrJ)_{2n+2}$ . Тогда трифторхлордибромэтан -  $C_2HF_3ClBr_2$ .

#### *40. Определение содержания воды в флегматизаторах*

Каким образом можно определить присутствие воды в галогенуглеводородах?

**Комментарий:** Практически присутствие воды в галогенуглеводородах можно определить с помощью карбида кальция ( $CaC$ ). При добавлении  $CaC$  к огнетушащему составу имеющаяся в нем вода будет взаимодействовать с образованием газообразного ацетилена ( $C_2H_2$ ). Внешне это проявляется в выделении пузырьков газа.

## **2. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

1. Определить мольную долю горючего в стехиометрической смеси водорода с кислородом
2. Определить мольную долю кислорода в стехиометрической смеси октана с кислородом
3. Определить число молей  $O_2$  и мольную долю горючего для стехиометрической смеси водорода с воздухом.
4. Определить число молей  $O_2$  и мольную долю горючего для стехиометрической смеси метана с воздухом.
5. Определить число молей  $O_2$  и мольную долю горючего для стехиометрической смеси гептана с воздухом.
6. Определить число молей  $O_2$  и мольную долю горючего для стехиометрической смеси октана с воздухом.
7. Сколько кислорода  $O_2$  необходимо для стехиометрического горения метана. Найти молярное отношение ( $x$ ) и массовое отношение ( $\omega$ ).
8. Каковы значения мольной ( $x$ ) и массовой ( $\omega$ ) долей горючего для стехиометрической смеси метана с воздухом.
9. Определить группу горючести глюкозы на основании расчета потенциала горючести.

10. Определить группу горючести бензина на основании расчета потенциала горючести.
11. Определить группу горючести гидроксида кальция на основании расчета потенциала горючести.
12. Определить группу горючести этиленгликоля на основании расчета потенциала горючести.
13. Определить группу горючести бромтрифтор углерода (хладон) на основании расчета потенциала горючести.
14. Определить группу горючести дибромтетрафтор углерода (хладон) на основании расчета потенциала горючести.
15. Определить группу горючести этилового спирта на основании расчета потенциала горючести.
16. Определить возможность протекания процесса горения этилового спирта.
17. Определить возможность протекания процесса горения бензола.
18. Определить возможность протекания процесса горения бензина.
19. Определить возможность протекания процесса горения глюкозы.
20. Определить горючесть этиленамина ( $C_2H_5NH_2$ )
21. Определить горючесть всех оксидов азота и оксидов серы.
22. Определить горючесть  $CO$  и  $CO_2$
23. Написать реакции замещения хлора с метаном. Определить горючесть галогенпроизводных по формуле. Сделать вывод о влиянии галогенов на горючесть соединений.
24. Сравнить горючесть этилена, дихлорэтана и дибромэтана. Сделать вывод о влиянии различных галогенов на горючесть соединений.
25. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания  $10\text{ м}^3$  пропана.
26. Определить объем метана, полностью выгоревшего в помещении  $10 \times 2 \times 5\text{ (м}^3\text{)}$  до момента самопроизвольного потухания.
27. Рассчитать объем воздуха, необходимого для сгорания  $1\text{ кг}$  сухих дров (н.у.).
28. Рассчитать объем воздуха, необходимого для полного сгорания  $1\text{ т.}$  угля, содержащего  $80\%$  углерода.
29. Определить объем воздуха, необходимого для сгорания  $10\text{ кг}$  торфа состава:  $C - 40,0$ ;  $H - 3,0$ ;  $O - 12,0$ ;  $N - 25$ ;  $A - 10$ ;  $W - 10$  (% вес).
30. Рассчитать теоретический объем воздуха, необходимого для сгорания  $10\text{ кг}$  угля следующего состава:  $C - 42\%$ ,  $H - 3,4\%$ ,  $N - 0,5\%$ ,  $O - 14,3\%$ ,  $W - 10,73\%$ . Примеси  $29,07\%$ .

31. Какой объем воздуха теоретически необходим для сгорания 10 кг нефти следующего состава: С – 85%, Н – 10%, N – 0,5%, О – 2,2%, S- 1,3%.

32. Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , если на горение 1 кг поступило  $3 \text{ м}^3$  воздуха.

33. Рассчитать количество воздуха (массу и объем), пошедшего на полное сгорание смеси газов следующего состава: CO – 40%,  $\text{N}_2$  – 20%,  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 8%,  $\text{O}_2$  – 32% если коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ) равен 2.

34. Рассчитать практический объем воздуха, пошедшего на горение 1 кг органической смеси следующего состава: С – 90%, Н – 3%, N – 4%, О – 3% при  $T = 400 \text{ К}$  и  $p = 90000 \text{ кПа}$ , если коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ) равен 2.

35. Рассчитать состав продуктов горения 5 кг фенола. Определить объемы этих веществ, если температура горения  $1300^\circ\text{К}$ , давление 90 кПа.

36. Определить объем и состав влажных продуктов сгорания 1 кг каменного угля состава (вес %) С- 75; Н – 4,5; О – 2,8; N – 1; S – 2,6; W – 3; А – 11.

37. Определить объем продуктов горения при сгорании  $1 \text{ м}^3$  газовой смеси, состоящей из  $\text{C}_3\text{H}_6$  – 70%;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 10%;, CO – 5%;  $\text{O}_2$  – 15%.

38. Рассчитать объем и определить состав влажных продуктов горения смеси горючего газа (75%) и этилена (25%).

39. Определить объем продуктов горения  $20 \text{ м}^3$  ацетилена в воздухе, если температура горения составила 1450 К.

40. Какое количество ( $\Sigma$ ) сухих продуктов сгорания выделится при сгорании  $100 \text{ м}^3$  природного газа.

41. Рассчитать объем и состав влажных продуктов сгорания коксового газа.

42. Рассчитать объем и определить состав сухих и влажных продуктов сгорания 10 т. метилового спирта.

43. Определить объем и состав водяного газа.

44. Рассчитать объем продуктов сгорания 1 кг топлива следующего состава: С – 55%, О – 13%, Н – 5%, S – 7%, N – 3%, W – 17%,  $T_{\text{гор}} = 1170 \text{ К}$ .

45. Определить объем продуктов сгорания 10 т органической массы состава: С – 50%, О – 13%, Н – 8%, S – 7%, N – 6%, W – 17%,  $T_{\text{гор}} = 1180 \text{ К}$ , коэффициент избытка воздуха 1,8.

46. Определить по формулам Менделеева высшую и низшую теплоты горения 4–метил–5–β–оксиэтилтиазола ( $\text{C}_6\text{H}_9\text{ONS}$ ).

47. Определить низшую теплоту горения ( $\text{кДж/м}^3$ ;  $\text{кДж/кмоль}$ ) газовой смеси, имеющей следующий состав компонентов смеси (% об): CO – 15%;  $\text{H}_2$  – 15%;  $\text{CH}_4$  – 25%;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 15%;  $\text{CO}_2$  – 5%;  $\text{N}_2$  – 15%;  $\text{O}_2$  – 10%.

48. Рассчитать теплоту горения  $10 \text{ м}^3$  стехиометрической гексано-воздушной смеси.

49. Рассчитать теплоту сгорания этилена по теплотам образования веществ.

50. Рассчитать  $Q_n$  и  $Q_v$  для этилена, используя формулу Д.И. Менделеева.

51. Рассчитать низшую теплоту горения сернистого мазута, имеющего состав (% об): С – 82,5; Н – 10,65; S – 3,1; О – 0,5; А – 0,25; W – 3.

52. Рассчитать высшую теплоту горения нефтяной фракции, имеющей следующий состав (в %): С – 84,5; Н – 11,2; S – 3,99; О – 0,3.

53. Определить низшую теплоту горения уксусной кислоты ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), по теплотам образования веществ.

54. Определить низшую теплоту горения 1 кг древесины состава: С – 49%; Н – 8%; О – 43%. Какова интенсивность тепловыделения, если массовая скорость выгорания составляет  $0,01 \text{ кг/1 м}^2 \cdot \text{с}$ ?

55. Рассчитать интенсивность тепловыделения при горении газовой смеси состава: СО – 15%;  $\text{H}_2$  – 14%;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 40%;  $\text{CO}_2$  – 11%;  $\text{O}_2$  – 20%, если массовая скорость выгорания  $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$ .

56. Определить низшую теплоту горения газовой смеси ( $\text{кДж/м}^3$ ,  $\text{кДж/кмоль}$ ) при н.у., имеющей следующий состав (% об): СО – 18%;  $\text{H}_2$  – 12%;  $\text{CO}_2$  – 8%;  $\text{N}_2$  – 14%, этан – 22%; пропан – 16%;  $\text{O}_2$  – 10%.

57. Определить расчетным путем йодное число триглицерида линолевой кислоты. Сделать вывод о способности к самовозгоранию.

58. Определить йодное число триглицерида линоленовой кислоты. Сделать вывод о способности к самовозгоранию.

59. Рассчитать йодное число касторового масла имеющего следующий состав:

Трипальмеат – 3%  
Тристеарат – 4%  
Триомат – 5%  
Тримномат – 6%  
Тририцилат – 82%

Триглицераты кислот:  
пальмитиновой,  
стеариновой,  
олеиновой,  
линолевой,  
линоленовой

60. Определить объем воздуха, необходимого для  $5 \text{ м}^3$  смеси газов, состоящих из 20%  $\text{CH}_4$ ; 40%  $\text{C}_2\text{H}_2$ ; 10% СО; 5%  $\text{N}_2$  и 25%  $\text{O}_2$ , если коэффициент избытка воздуха равен 1,8.

61. Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.

62. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

63. Рассчитать температуру самовоспламенения 1 метил-4-этилбензола.

64. Рассчитать температуру самовоспламенения органического вещества 2,2 диметил-бутанола.

65. Рассчитать температуру самовоспламенения 1,4 диизопропил бензола.
66. Рассчитать температуру самовоспламенения 4 – бутанола, вторичного бутилового спирта и третичного бутилового спирта. Сделать вывод о влиянии разветвления углеродной цепи на температуру воспламенения.
67. Определить температуру воспламенения этана, бутана, гексана, декана. Построить график зависимости  $T_{\text{св}}$  от положения веществ в гомологическом ряду.
68. Определить  $T_{\text{св}}$  толуола, 1,4-ди изопропилбензола и сделать вывод о влиянии боковой цепи на сравнительную пожарную опасность ароматических соединений.
69. Определить  $T_{\text{св}}$  октана, октанола – 1 и этилбензола. Сделать вывод о влиянии строения вещества на их сравнительную пожарную опасность.
70. Вычислить НКПВ метана; этана; бутана. Сравнить их пожаровзрывоопасность.
71. Вычислить НКПВ смеси пропана и бутана, если пропана 80% об, бутана 20% об.
72. По предельной теплоте горения рассчитать НКПВ бутана в воздухе.
73. Определить НКПВ и ВКПВ этана, бутана, гексана. Сравнить их пожаровзрывоопасность.
74. Вычислить НКПВ и ВКПВ метана, этилена, ацетилен.
75. Определить НКПВ и ВКПВ уксусной кислоты и уксусного альдегида и проанализировать возможности образования взрывоопасных концентраций.
76. Определить КПВ газовой смеси, состоящей из 50% бутана, 10% пропилена и 40% этилена.
77. Вычислить НКПВ смеси этана и пропана, если этана 78%, а пропана 22%.
78. Вычислить НКПВ смеси пропана и бутана, если пропана 90%, бутана – 10%.
79. По предельной теплоте сгорания ( $Q_{\text{пр}}$ ) определить, как изменится НКПВ от положения предельных углеводородов (этан, пропан, бутан, гептан, гексан) в гомологическом ряду. Построить график зависимости НКПВ от молярной массы горючего.
80. Рассчитать КПВ парогазовой смеси, состоящей из 20% этана, 60% этилена, 20% паров этилового спирта.
81. Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров этилового спирта с воздухом в объемных процентах.
82. Рассчитать стехиометрическую концентрацию н-бутанола в объемных процентах.

83. Сколько диэтилового эфира должно испариться в помещении объемом  $200 \text{ м}^3$ , чтобы образовалась стехиометрическая концентрация при  $t = 10^\circ\text{C}$  и давлении  $750 \text{ мм рт.ст.}$

84. Рассчитать, при какой концентрации температура самовоспламенения ацетилен в воздухе будет самой низкой.

85. Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров пентана в воздухе при  $t = 18^\circ\text{C}$  и давлении  $750 \text{ мм рт.ст.}$

86. Рассчитать стехиометрическую концентрацию бутана с воздухом в  $\text{г/м}^3$ ,  $t = 30^\circ\text{C}$ ,  $p = 97 \text{ кПа}$ .

87. Сколько карбида кальция должно прореагировать с водой, чтобы в помещении объемом  $480 \text{ м}^3$  образовалась стехиометрическая концентрация ацетилен в воздухе (н.у.)

88. Найдите объем сероводорода, выделившегося при взаимодействии  $60 \text{ г}$  магния с  $500 \text{ мл}$  раствора серной кислоты ( $\rho$ ) с массовой долей  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $55,5\%$  при температуре  $18^\circ\text{C}$  и давлении  $96 \text{ кПа}$ .

89. Вычислите массу  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  раствора сульфата магния с массовой долей  $20\%$ . Плотность раствора  $1219 \text{ кг/м}^3$ .

90. Определите массовую долю (%) разложившегося карбоната стронция, если при прокаливании  $10 \text{ кг}$  карбоната стронция его масса уменьшилась на  $1,7 \text{ кг}$ .

91. При растворении в кислоте  $7,5 \text{ г}$  оксида кальция, содержащего примесь карбоната кальция, выделилось  $0,21 \text{ л}$  газа (н.у.). Какова массовая доля (%) карбоната кальция в исходной смеси?

92. Какой объем раствора соды потребуется для полной нейтрализации ортофосфорной кислоты, содержащейся в ее растворе объемом  $200 \text{ мл}$ , если

$$C_{\text{з}(\text{Na}_2\text{CO}_3)} = 2 \text{ экв/л, а } C_{\text{з}(\text{H}_3\text{PO}_4)} = 3 \text{ экв/л ?}$$

93. Гидрид кальция какой массы надо обработать водой, чтобы получить водород объемом  $1000 \text{ м}^3$  (н.у.)?

94. Напишите электронную формулу атома фосфора в нормальном и возбужденном состоянии. Чему равны максимальные значения ковалентности и степени окисления фосфора? Сравните с азотом и объясните причину сходства и различия.

95. При нормальных условиях  $1 \text{ г}$  воздуха занимает объем  $733 \text{ мл}$ . Какой объем займет та же масса воздуха при  $0^\circ\text{C}$  и давлении, равном  $93,3 \text{ кПа}$  ( $700 \text{ мм.рт.ст.}$ )?

96. Давление газа, занимающего объем  $2,5 \text{ л}$  равно  $121,6 \text{ кПа}$ . Чему равно давление, если, не изменяя температуру, сжать газ до  $1 \text{ л}$ ?

97. При давлении 98,7 кПа и температуре 91<sup>0</sup>С некоторое количество газа занимает объем 608 мл. Найти объем газа при н.у.

98. При нормальных условиях 1 г воздуха занимает объем 733 мл. Какой объем займет та же масса воздуха при 0 С<sup>0</sup> и давлении, равном 93,3 кПа (700 мм.рт.ст.)?

99. Давление газа, занимающего объем 2,5 л, равно 121,6 кПа. Чему равно давление, если, не изменяя температуру, сжать газ до 1 л?

100. Какой объем СО<sub>2</sub> получается при сгорании 2 л бутана? Объемы этих газов измерены при 27 С и 740 мм.рт.ст.

### ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

| вар       | Номера задач |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
|-----------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| <b>01</b> | 1            | 11 | 21 | 31 | 41 | 51 | 61 | 71 | 81 | 91  |
| <b>02</b> | 2            | 12 | 22 | 32 | 42 | 52 | 62 | 72 | 82 | 92  |
| <b>03</b> | 3            | 13 | 23 | 33 | 43 | 53 | 63 | 73 | 83 | 93  |
| <b>04</b> | 4            | 14 | 24 | 34 | 44 | 54 | 64 | 74 | 84 | 94  |
| <b>05</b> | 5            | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | 85 | 95  |
| <b>06</b> | 6            | 16 | 26 | 36 | 46 | 56 | 66 | 76 | 86 | 96  |
| <b>07</b> | 7            | 17 | 27 | 37 | 47 | 57 | 67 | 77 | 87 | 97  |
| <b>08</b> | 8            | 18 | 28 | 38 | 48 | 58 | 68 | 78 | 88 | 98  |
| <b>09</b> | 9            | 19 | 29 | 39 | 49 | 59 | 69 | 79 | 89 | 99  |
| <b>10</b> | 10           | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |

### 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

#### Практическая работа № 1

#### СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ ГОРЮЧЕСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** освоить расчеты основных показателей горючести веществ и материалов на основании стехиометрических и термодинамических законов.

#### **Общие положения:**

Пламя предварительно перемешанной смеси называют *стехиометрическим*, если горючее (углеводород) и окислитель (кислород —  $O_2$ ) расходуют друг друга полностью, образуя двуокись углерода ( $CO_2$ ) и воду ( $H_2O$ ). Если существует избыток горючего, говорят, что смесь богатая, а в случае избытка окислителя говорят, что смесь бедная.

Рассмотрим простейшие примеры:

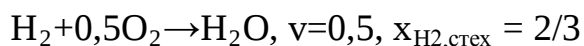
- 1)  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$  — стехиометрическая смесь,
- 2)  $3H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + H_2$  — богатая смесь ( $H_2$  в избытке),
- 3)  $CH_4 + 3O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2 + O_2$  - бедная смесь ( $O_2$  в избытке).

Каждый символ в таком уравнении химической реакции соответствует одному молю вещества. Так, первое из этих уравнений означает, что два моля  $H_2$  реагируют с одним молем  $O_2$  с образованием двух молей  $H_2O$ .

Если уравнение химической реакции записано таким образом, что оно описывает реакцию именно одного моля горючего, то мольная доля горючего в стехиометрической смеси может быть легко определена из соотношения

$$X_{гор,стех} = 1 / ((1+v))$$

Здесь  $v$  обозначает число молей  $O_2$  в уравнении реакции с образованием  $CO_2$  и  $H_2O$ . Примером служит реакция



Если окислителем является воздух, то следует принимать во внимание, что сухой воздух содержит только 21 % кислорода, а также 78 % азота и 1 % благородных газов. Таким образом, для воздуха  $X_{N_2} = 3,762 X_{O_2}$ . Отсюда мольные доли для стехиометрической смеси с воздухом будут равны

$$X_{гор,стех} = 1 / ((1+v \cdot 4,762)), \quad X_{O_2,стех} = v \cdot X_{гор,стех},$$

$$X_{N_2,стех} = 3,762 \cdot X_{O_2,стех}$$

где  $v$  как и прежде означает количество молей  $O_2$  в уравнении реакции полного превращения одного моля горючего в  $CO_2$  и  $H_2O$ .

Оценку горючести жидкостей и плавящихся твердых химических элементов можно определить по формуле:

$$П = 4C + 1H + 4S + 1N - 2O - 2Cl - 3F - 5Br$$

где C, H, S и т.д. - число атомов соответствующих элементов в молекуле горючего.

П в данном случае называется потенциалом горючести.

Если  $П \leq 0$  - вещества негорючие; если  $0 < П \leq 2$  - вещества трудногорючие; если  $П > 2$  - вещества горючие.

Горючесть газов и паров жидкости можно определить по т.н. энтальпии горючести.

$$П = \Delta H_r^0 - \Delta H_f^0$$

где  $\Delta H_f^0$  - стандартная теплота образования вещества;

$\Delta H_r^0$  - энтальпия горючести вещества (термодинамическая характеристика).

Если  $П < 0$  - вещество горючее. Для случая  $П=0$  - вещество трудногорючее.

Если  $П > 0$  - вещество негорючее.

Оценка возможности протекания самопроизвольных реакций разложения проводится по энергии Гиббса (изобарно-изотермическому потенциалу) соответствующей реакции:

$$\Delta G_{x.p.} = \sum \Delta G_{\text{кон.прод.}} - \sum \Delta G_{\text{исх.в-в.}}$$

где  $\Delta G_{\text{кон.прод.}}$  - изобарный потенциал образования продуктов реакции;

$\Delta G_{\text{исх.в-в.}}$  - изобарный потенциал образования исходных веществ.

Если  $\Delta G_{x.p.} < 0$  - реакция разложения возможна; если  $\Delta G_{x.p.} > 0$  - протекание реакции невозможно.

### **Задание 1.**

Написать уравнения химических реакций горения в воздухе:

- метана;
- бензина;
- гексана;
- этилового спирта.

И определить:

- мольную долю горючего в стехиометрической смеси горючего с воздухом в моль-%( $X_{\text{гор.стех.}}$ ),
- число моль кислорода в смеси ( $\nu_{O_2}$ ),

- мольную долю кислорода в стехиометрической смеси горючего с воздухом ( $x_{O_2}$ ),
- массовую долю горючего в стехиометрической смеси ( $\omega_{гор.стех}$ ),
- массовую долю кислорода в стехиометрической смеси ( $\omega_{O_2}$ ),

Данные представить в виде таблицы по следующей форме:

Таблица 1

| Уравнение реакции горения                                       | $X_{гор.стех}$ | $\nu_{O_2}$ | $x_{O_2}$ | $\omega_{гор.стех}$ | $\omega_{O_2}$ |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|-------------|-----------|---------------------|----------------|
|                                                                 | Моль %         | моль        | Моль %    | Вес %               | Вес %          |
| $H_2 + 0,5O_2 + 0,5 \cdot 3,762N_2 = H_2O + 0,5 \cdot 3,762N_2$ | 29,6           | 0,5         | 17,7      | 2,83                | 22,6           |
|                                                                 |                |             |           |                     |                |

где  $X_{гор.стех}$  - мольная доля горючего, моль %;

$\nu_{O_2}$  - число моль кислорода, моль;

$x_{O_2}$  - мольная доля кислорода, моль %;

$\omega_{гор.стех}$  - массовая доля горючего в стехиометрической смеси, % вес;

$\omega_{O_2}$  - массовая доля кислорода, % вес.

### Задание 2.

Решить задачи на стехиометрические расчеты.

### Задание 3.

Определить группу горючести веществ:

- глюкозы;
- бензина;
- гидроксида кальция;
- этиленгликоля;
- бромтрифторуглерода (хладон);
- дибромтетрафторуглерода (хладон);
- этилового спирта. На основании расчета потенциала горючести.

### Задание 4.

Определить возможность протекания процесса горения веществ по  $\Pi$ ;  $\Pi(\Delta H)$ ;  $\Delta G$ :

- этилового спирта;
- бензола;
- глицерина;
- муравьиной кислоты.

Данные представить в виде таблицы 2.

Таблица 2

### Горючесть веществ и материалов

| Вещество | Потенциал горючести по формуле | Вывод             | $P(\Delta H)$ | Вывод                       | $\Delta G$ | Вывод                    |
|----------|--------------------------------|-------------------|---------------|-----------------------------|------------|--------------------------|
| $CH_4$   | $P = 8$                        | $P > 2$ , Горючее | - 816,5       | $P(\Delta H) < 0$ , Горючее | - 818,59   | $\Delta G < 0$ , Горючее |
|          |                                |                   |               |                             |            |                          |

#### Задание 5.

- Определить горючесть этиленамина ( $C_2H_5NH_2$ );
- Определить горючесть всех оксидов азота и оксидов серы;
- Определить горючесть  $CO$  и  $CO_2$ ;
- Написать реакции замещения хлора с метаном. Определить горючесть галогенпроизводных по формуле. Сделать вывод о влиянии галогенов на горючесть соединений.
- Сравнить горючесть этана, дихлорэтана, дифторэтана и дибромэтана. Сделать вывод о влиянии различных галогенов на горючесть соединений.

#### Задание 6.

Сдать тесты по темам 1,2,3.

| Вещество           | Хим.формула      | $\Delta H_f^0$ ,<br>кДж/моль | $\Delta H_c^0$ ,<br>кДж/моль | $\Delta G$ ,<br>кДж/моль | $\Delta S^0$ ,<br>Дж/моль·К |
|--------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Метан              | $CH_4(g)$        | - 891,5                      | - 75                         | - 50,8                   | 186,19                      |
| Этиловый спирт     | $C_2H_5OH_{(ж)}$ | - 1374,3                     | - 278,2                      | 174,77                   | 160,7                       |
| Бензол             | $C_6H_6_{(ж)}$   | - 3282,4                     | 49,04                        | 124,5                    | 173,2                       |
| Муравьиная кислота | $CH_2O_{2(ж)}$   | - 263,1                      | - 422,8                      |                          | 129,0                       |
| Глицерин           | $C_3H_8O_{3(ж)}$ | - 1658,8                     | - 675                        |                          | 207,9                       |
| Диоксид углерода   | $CO_{2(г)}$      |                              |                              | - 394,38                 |                             |
| Вода               | $H_2O_{(ж)}$     |                              |                              | - 237,5                  |                             |

$\Delta H_c^0$  – стандартная энтальпия сгорания вещества,

$\Delta H_f^0$  – стандартная энтальпия образования вещества,

$\Delta G$  – изобарно-изотермический потенциал ( $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ ),

$\Delta S^0$  – стандартная энтропия образования вещества.

## Практическая работа №2

### МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

**Цель работы:** научиться производить расчеты на основании брутто-уравнений материального баланса.

#### **Общие положения:**

Сущность материального баланса процесса горения заключается в том, что масса веществ и материалов, присутствующих до горения, должна равняться массе веществ и материалов, получившейся после горения.

В общем виде уравнение материального и теплового баланса выглядит так:

$$n_{\Gamma} [\Gamma] + n_o [O] = \sum m_i [\Pi\Gamma]_i + Q_{x.p.},$$

где  $[\Gamma]$  - химическая формула горючего вещества;

$[O]$  - химическая формула окислителя;

$[\Pi\Gamma]_i$  - химическая формула  $i$ -го вещества, образовавшегося в результате реакции горения;

$n_{\Gamma}$ ,  $n_o$ ,  $m_i$  - стехиометрические коэффициенты при соответствующих веществах;

$Q_{x.p.}$  - тепловой эффект реакции горения.

Это уравнение отражает в большинстве химических процессов лишь исходное и конечное состояние реагирующей системы, но не дает сведений о тех путях и промежуточных фазах, через которые этот процесс осуществлялся. Если окислительной средой будет являться кислород воздуха, то уравнение примет вид:

$$n_{\Gamma} [\Gamma] + n_{o_2} [O_2] + n_{o_2} \cdot 3,76[N_2] = \sum m_i [\Pi\Gamma]_i + n_{o_2} \cdot 3,76[N_2] + Q_{x.p.}$$

Это уравнение можно использовать для расчета количества воздуха, необходимого для полного сгорания веществ и материалов, количества выделившихся продуктов сгорания веществ и материалов, что необходимо для решения некоторых практических задач противопожарной защиты (например, для определения количества вещества, которое может выгореть до момента самопроизвольного потухания в замкнутом помещении, содержащем заданный объем воздуха, или для определения количества того или иного продукта сгорания, которое может выделиться при сгорании определенного количества горючего вещества).

Для пересчета объема воздуха или газообразных продуктов горения, находящихся при нормальных условиях, в объем для заданных условий используется уравнение:

$$V^{T,P} = (V_o T P_o) / (T_o P),$$

которое получено из уравнения состояния идеальных газов:

$$(P_o V_o) / T_o = (P V^{T,P}) / T$$

$$P_o = 101325 \text{ Па (760 мм рт.ст.)};$$

$$T_o = 273 \text{ К (0°C)};$$

$V_o = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  - объем одного кмоль любого газа при нормальных условиях.

Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы количества горючего вещества (кмоль, кг,  $\text{м}^3$ ), называется удельным теоретическим количеством воздуха ( $V_{\Sigma}^o$ ). Допускается, что при горении веществ в теоретически необходимом количестве воздуха происходит образование продуктов только полного сгорания. Все горючие вещества подразделяются на три группы, для которых существуют свои методики расчетов:

- индивидуальные химические вещества, состав которых выражается химической формулой ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$  и т.д.),
- сложные смеси веществ, состав которых задается весовым процентным содержанием в них различных элементов (древесина, торф, уголь),
- смеси газов (природный газ, коксовый газ и т.д.).

### **Задание:**

Составить брутто-уравнения химических реакций горения вещества в воздухе и решить следующие задачи (расчеты сделать на основании приближенных формул и химических расчетов).

Для расчета теоретически необходимого объема воздуха используется приведенная формула:

$$\text{Для газов: } V_{\Sigma}^o = 4,76 \cdot \beta, [\text{м}^3/\text{м}^3] \text{ или } [\text{кмоль}/\text{кмоль}],$$

где  $4,76 = 1 + 3,76$  – это количество воздуха, в котором содержится 1 кмоль  $\text{O}_2$ ;

$$\beta = n_{\text{O}_2} / n_{\text{Г}}$$

$n_{\text{O}_2}$  - число моль окислителя;

$n_{\text{Г}}$  – число моль горючего в брутто уравнении.

$$\text{Для жидкостей и ТГМ: } V_{\Sigma}^o = 4,76 \cdot \beta \cdot V_o / M_{\text{Г}} (\text{м}^3/\text{кг}),$$

где  $V_0 = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ;

$M_r$  - молекулярная масса ГМ.

См. решение типовых задач.

1. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания  $10 \text{ м}^3$  пропана.

2. Определить объем метана, полностью выгоревшего в помещении  $10 \times 2 \times 5 (\text{м}^3)$  до момента самопроизвольного потухания.

3. Рассчитать объем воздуха, необходимого для сгорания  $1 \text{ кг}$  сухих дров (н.у.).

4. Рассчитать объем воздуха, необходимого для полного сгорания  $1 \text{ т.}$  угля, содержащего  $80\%$  углерода.

5. Определить объем воздуха необходимого для сгорания  $10 \text{ кг}$  торфа состава:  $\text{C} - 40,0$ ;  $\text{H} - 3,0$ ;  $\text{O} - 12,0$ ;  $\text{N} - 25$ ;  $\text{A} - 10$ ;  $\text{W} - 10$ .

6. Рассчитать теоретический объем воздуха, необходимого для сгорания  $10 \text{ кг}$  угля следующего состава:  $\text{C} - 42\%$ ,  $\text{H} - 3,4\%$ ,  $\text{N} - 0,5\%$ ,  $\text{O} - 14,3\%$ ,  $\text{W} - 10,73\%$ . Примеси  $29,07 \%$ .

7. Какой объем воздуха теоретически необходим для сгорания  $10 \text{ кг}$  нефти следующего состава:  $\text{C} - 85\%$ ,  $\text{H} - 10\%$ ,  $\text{N} - 0,5\%$ ,  $\text{O} - 2,2\%$ ,  $\text{S} - 1,3\%$ .

#### Избыток воздуха:

Коэффициент избытка воздуха – это отношение объема воздуха, практически участвующего в горении ( $V_{\text{пр}}^0$ ) к теоретически необходимому  $V_{\text{теор}}^0$  (рассчитанному по приведенным формулам или по химическому уравнению).

1. Определить коэффициент избытка воздуха при горении уксусной кислоты  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , если на горение  $1 \text{ кг}$  поступило  $3 \text{ м}^3$  воздуха.

2. Рассчитать количество воздуха (массу и объем), пошедшего на полное сгорание смеси газов следующего состава:  $\text{CO} - 40\%$ ,  $\text{N}_2 - 20\%$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8 - 8\%$ ,  $\text{O}_2 - 32\%$ , если коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ) равен  $2$ .

3. Рассчитать практический объем воздуха, пошедшего на горение  $1 \text{ кг}$  органической смеси следующего состава:  $\text{C} - 90\%$ ,  $\text{H} - 3\%$ ,  $\text{N} - 4\%$ ,  $\text{O} - 3\%$  при  $T = 400 \text{ K}$  и  $p = 90000 \text{ кПа}$ , если коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ) равен  $2$ .

#### Расчет объема продуктов горения.

Продуктами горения называются газообразные, жидкие и твердые вещества, образующиеся в результате процесса горения.

Расчетный объем продуктов горения определяется по формуле:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_{\text{в}},$$

где  $V_{\text{пр}}^0$  – теоретический объем продуктов горения ( $\text{кмоль/кмоль}$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ).

$\Delta V_{\Sigma}^0$  – избыток воздуха (при  $\alpha_v > 1$  смесь бедная, часть воздуха не расходуется на горение и переходит в продукты горения).

Теоретический объем продуктов горения определяется для трех групп веществ и материалов.

1. Рассчитать состав продуктов горения 5 кг фенола. Определить объемы этих веществ, если температура горения  $1300^0\text{K}$ , давление 90 кПа.
2. Определить объем и состав влажных продуктов сгорания 1 кг каменного угля состава (вес %) C- 75; H – 4,5; O – 2,8; N – 1; S – 2,6; W – 3; A – 11.
3. Определить объем продуктов горения при сгорании  $1 \text{ м}^3$  газовой смеси, состоящей из  $\text{C}_3\text{H}_6$  – 70%;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 10%;, CO – 5%;  $\text{O}_2$  – 15%.

### Практическая работа №3 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

**Цель работы:** ознакомиться с расчетами теплоты сгорания.

#### **Общие положения:**

Особенностью реакций горения является то, что при их протекании выделяется большое количество тепла.

В расчете на единицу количества горючего вещества тепловой баланс зоны горения можно записать так:

$$Q_{\text{н}} + Q_{\text{исх}} - Q_{\text{недож}} = Q_{\text{пг}} + Q_{\text{пот}},$$

где  $Q_{\text{исх}}$  - количество тепла, поступающего в зону горения с горючим веществом и окислителем (если  $\alpha_v = 1$ ,  $T_{\text{н}} = 293 \text{ K}$ ,  $Q_{\text{исх}} \approx 0,03Q_{\text{н}}$ );

$Q_{\text{недож}}$  - количество тепла, нереализуемое в зоне горения из-за химического и механического недожога.  $Q_{\text{недож}}$  зависит от вида горючего материала и условий горения и возрастает с увеличением количества воздуха, необходимого для полного сгорания ( $Q_{\text{недож}}$  составляет 5-25% от  $Q_{\text{н}}$ );

$Q_{\text{пг}}$  - количество тепла, затрачиваемое на нагрев продуктов горения. За счет  $Q_{\text{пг}}$  продукты горения нагреваются до температуры более  $1000^{\circ}\text{C}$  ( $Q_{\text{пг}}$  составляет 40-80% от  $Q_{\text{н}}$ );

$Q_{\text{пот}}$  - количество тепла, теряемое из зоны горения конвекцией и излучением ( $Q_{\text{пот}}$  составляет 40-60% от  $Q_{\text{н}}$ );

$Q_{\text{н}}$  - низшая теплота сгорания вещества или материала. Этот показатель характеризует пожарную опасность вещества или материала.

Низшей теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}$  называется количество тепла, выделяемого при полном сгорании единицы массы или объема (кг, кмоль,  $\text{м}^3$ ) горючего вещества, при условии сгорания водорода до образования пара и испарения влаги горючего вещества (кДж/кмоль, кДж/кг, кДж/ $\text{м}^3$ ).

Различают также высшую теплоту сгорания  $Q_v$  - это количество тепла, выделяемого при полном сгорании единицы массы или объема горючего вещества при условии, что содержащийся в нем водород сгорает с образованием жидкой воды, и влага в веществе не испаряется. Эта величина имеет чисто теоретическое значение, т.к. температура горения намного выше  $100^\circ\text{C}$ , и всегда выделяющаяся вода при горении и влага вещества будут испаряться. Для расчетов параметров процессов горения используется низшая теплота горения.

### ***Расчет теплоты горения***

Для индивидуальных химических соединений низшую теплоту сгорания можно определить из следствия закона Гесса.

Теплота сгорания химического соединения равна разности между суммой теплот образования продуктов сгорания и теплотой образования сгоревшего химического соединения:

$$Q_n = \sum(\Delta H_{f_{\text{пр}(i)}} \cdot m_i) - \Delta H_{f_r} \cdot n_r \text{ [кДж/моль]},$$

где  $\Delta H_{f_{\text{пр}(i)}}$ ,  $\Delta H_{f_r}$  - соответственно теплота образования  $i$ -го продукта сгорания и горючего вещества;

$m_i$ ,  $n_r$  - стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции горения.

Стандартные теплоты образования простых веществ ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и т.д.) равны нулю.

Для сложных химических соединений низшую теплоту сгорания определяют по формуле Д.И. Менделеева:

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

где  $C$ ,  $H$ ,  $S$ ,  $W$  - содержание углерода, водорода, серы и влаги в горючем веществе (% вес.);

$O$  - сумма кислорода и азота в горючем веществе (% вес.).

Для смеси газов низшую теплоту горения определяют как сумму теплот сгорания компонентов горючей смеси:

$$Q_n^{\text{см}} = (\sum Q_{ni} \cdot \varphi_i) / 100 \text{ [кДж/м}^3\text{; кДж/моль]}$$

где  $Q_{ni}$  - низшая теплота сгорания  $i$ -го компонента смеси газов;

$\varphi_i$  - содержание  $i$ -го компонента в смеси газов (% об.).

### ***Температура горения***

Часть из выделяемого в зоне горения тепла расходуется на нагрев продуктов горения ( $Q_{\text{пр}}$ ).

Максимальная температура, до которой нагреваются продукты горения, называется температурой горения.

*Различают следующие температуры горения:*

- калориметрическая – температура, до которой нагреваются продукты горения при следующих условиях:  $T_0 = 273 \text{ K}$ ;  $\alpha_v = 1$ ;  $Q_{\text{пг}} = Q_{\text{н}}$ ;
- адиабатическая - если выполняются условия:  $T_0 = 273 \text{ K}$ ;  $\alpha_v \neq 1$ ;  $Q_{\text{пг}} = Q_{\text{н}}$ ;
- теоретическая - температура горения, когда учитывается часть тепла, расходуемого на диссоциацию продуктов горения, и выполняются следующие условия:  $T_0 = 273 \text{ K}$ ;  $\alpha_v = 1$ ;  $Q_{\text{пг}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{дисс}}$ ;
- действительная температура горения - та температура, до которой нагреваются продукты горения в реальных условиях:  $T_0 \neq 273 \text{ K}$ ;  $\alpha_v \neq 1$ ;  $Q_{\text{пг}} \neq Q_{\text{н}}$ .

Для сложных химических соединений низшую теплоту сгорания определяют по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_{\text{н}} = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9 (O - S) - 25 (9 \cdot H + W), \text{ (кДж/кг)},$$

где C, H, S, W – содержание углерода, водорода, серы и влаги в горючем веществе (% вес);

O – сумма кислорода и азота в горючем веществе (вес %).

$$Q_{\text{в}} = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9 (O - S)$$

### **Задачи:**

1. Рассчитать по закону Гесса низшую теплоту горения бензола (кДж/моль; кДж/кг; кДж/м<sup>3</sup>).
2. Определить по формулам Менделеева высшую и низшую теплоты горения 4–метил–5–β–оксиэтилтиазола (C<sub>6</sub>H<sub>9</sub>ONS).
3. Определить низшую теплоту горения (кДж/м<sup>3</sup>; кДж/кмоль) газовой смеси, имеющей следующий состав компонентов (% об): CO – 15%; H<sub>2</sub> – 15%; CH<sub>4</sub> – 25%; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 15%; CO<sub>2</sub> – 5%; N<sub>2</sub> – 15%; O<sub>2</sub> – 10%.
4. Рассчитать теплоту горения 10 м<sup>3</sup> стехиометрической гексано-воздушной смеси.
5. Рассчитать теплоту сгорания этилена по теплотам образования веществ.
6. Рассчитать Q<sub>н</sub> и Q<sub>в</sub> для этилена, используя формулу Д.И. Менделеева.
7. Рассчитать низшую теплоту горения сернистого мазута, имеющего состав (% об): C – 82,5; H – 10,65; S – 3,1; O – 0,5; A – 0,25; W – 3.
8. Рассчитать высшую теплоту горения нефтяной фракции, имеющей следующий состав (в %): C – 84,5; H – 11,2; S – 3,99; O – 0,3.
9. Определить низшую теплоту горения уксусной кислоты (CH<sub>3</sub>COOH), по теплотам образования веществ.
10. Определить низшую теплоту горения 1 кг древесины состава: C – 49%; H – 8%; O – 43%. Какова интенсивность тепловыделения, если массовая скорость выгорания составляет 0,01 кг/1м<sup>2</sup>·с?

11. Рассчитать интенсивность тепловыделения при горении газовой смеси состава:  $\text{CO}$  – 15%;  $\text{H}_2$  – 14%;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 40%;  $\text{CO}_2$  – 11%;  $\text{O}_2$  – 20%, если массовая скорость выгорания  $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$ .

12. Определить низшую теплоту горения газовой смеси ( $\text{кДж/м}^3$ ,  $\text{кДж/кмоль}$ ) при н.у., имеющей следующий состав (% об):  $\text{CO}$  – 18%;  $\text{H}_2$  – 12%;  $\text{CO}_2$  – 8%;  $\text{N}_2$  – 14%, этан – 22%; пропан – 16%;  $\text{O}_2$  – 10%.

#### **Практическо-лабораторная работа № 4** **САМОВОЗГОРАНИЕ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ.** **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

**Цель работы:** экспериментальное определение йодного числа; освоение расчетных методов определения температуры самовоспламенения (самовозгорание) веществ и материалов, работа со справочной литературой.

##### **Общие положения:**

Самовозгоранием называют резкое увеличение скорости экзотермических реакций, вызывающих самонагревание веществ, приводящее к возникновению горения при отсутствии источника зажигания.

Тепловым называется самовозгорание, вызванное самонагреванием, возникшим под воздействием внешнего нагрева вещества выше температуры самонагревания. К тепловому самовозгоранию имеют склонность многие вещества и материалы, к которым можно отнести масла и жиры, каменные угли и т.д.

Самовозгорание масел и жиров часто является причиной пожаров. Существует три вида масел: минеральные, растительные и животные.

Минеральные масла, содержащие предельные углеводороды, к самовозгоранию не способны. Отработанные минеральные масла могут содержать непредельные углеводороды, способные к самовозгоранию.

Растительные (льняное, конопляное, хлопковое и др.) и животные (сливочное) масла по своему составу отличны от минеральных. Они представляют собой смесь глицеридов жирных кислот: пальмитиновой  $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$ , стеариновой  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ , олеиновой  $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ , линолевой  $\text{C}_{17}\text{H}_{31}\text{COOH}$ , линоленовой  $\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{COOH}$  и др. Пальмитиновая и стеариновая кислоты являются предельными, олеиновая, линолевая и линоленовая – непредельными. Глицериды предельных кислот, а следовательно, и масла, содержащие их в большом количестве, окисляются при температурах выше  $150^\circ\text{C}$  и не способны самовозгораться. Масла, содержащие большое количество глицеридов непредельных кислот, способны к самовозгоранию.

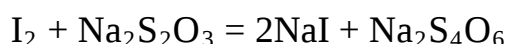
О количестве глицеридов непредельных кислот в масле и жире судят по йодному числу масла, т.е. по количеству граммов йода, поглощенному 100 г масла. Чем выше йодное число масла, тем в большей степени оно способно к самовозгоранию (льняное масло имеет йодное число в пределах 192-197, конопляное - 145-167, касторовое - 82-86). Если йодное число масел меньше 50, их самовозгорание невозможно.

**Задание 1:** *Определение йодного числа с бромистым йодом (по Ганусу).*

Бромистый йод образуется при взаимодействии йода с бромом в углекислой среде.

Бромистый йод количественно присоединяется к непредельным жирным кислотам по месту двойных связей. Избыток бромистого йода, не вошедший в реакцию, реагирует с йодистым калием по уравнению  $\text{BrI} + \text{KI} = \text{KBr} + \text{I}_2$ .

Выделившийся йод оттитровывают тиосульфатом



Ход работы: В сухую коническую колбу или склянку с притертой пробкой емкостью 250-300 мл отвешивают на аналитических весах 0,2-0,3 г масла и растворяют его в 10 мл хлороформа. В другую такую же колбу или склянку вносят 10 мл хлороформа без масла («слепой опыт»). В обе колбы из бюретки (со стеклянным краном) добавляют по 25 мл реактива Гануса. Сосуды плотно закрывают пробками, смоченными в растворе йодистого калия. Содержимое сосудов осторожно взбалтывают, после чего сосуды ставят в темное место на 1-1,5 часа. По истечении указанного времени в оба сосуда добавляют по 10 мл 20%-ного раствора йодистого калия и 50 мл воды и выделившийся йод оттитровывают 0,1 н раствором тиосульфата натрия до слабо-желтой окраски, потом добавляют 10-12 капель раствора крахмала и продолжают титрование до полного обесцвечивания раствора.

При расчетах принимают во внимание, что 1 мл 0,1 н раствора тиосульфата натрия соответствует 1 мл 0,1 н раствора йода. Йодное число *и.ч.* вычисляют по формуле

$$\text{и.ч.} = \frac{(c - o) \cdot 0,01269 \cdot 100}{n},$$

где *c* – количество 0,1 н раствора тиосульфата, израсходованное на титрование контрольной пробы («слепой опыт»), мл; *o* – количество 0,1 н раствора тиосульфата, израсходованное при титровании опытного образца, мл; *k* – поправочный коэффициент к титру, приблизительно 0,1 н раствора тиосульфата; 0,01269 – титр раствора тиосульфата по йоду; *n* – навеска масла, г.

**Задание 2:** Определение перекисного числа.

Количественное определение перекисей в растительном масле основано на реакции выделения йода перекисями из йодистого калия в кислой среде.

Йод открывают раствором тиосульфата.

Ход работы: В конической колбе или склянке с притертой пробкой емкостью 200 мл отвешивают (на аналитических весах) около 2 г масла. Навеску растворяют в 20 мл смеси ледяной уксусной кислоты и хлороформа (2:1 по объему), прибавляют 5 мл насыщенного раствора йодистого калия, сосуд укупоривают пробкой и ставят в темное место на 10 мин., после чего доливают 50 мл дистиллированной воды и оттитровывают выделившийся йод 0,002 н раствором тиосульфата (индикатор – крахмал). Одновременно проводят также контрольное определение (без масла).

Перекисное число *п.ч.* (количество граммов йода, выделенное перекисями, содержащимися в 100 г масла) рассчитывают по формуле

$$п.ч. = \frac{(с - о) \kappa 0,0002538 \cdot 100}{n},$$

где *с* – количество 0,002 н раствора тиосульфата, израсходованное при контрольном определении, мл; *о* – количество 0,002 н раствора тиосульфата, израсходованное при титровании опытного образца, мл;  $\kappa$  – поправочный коэффициент раствора тиосульфата; 0,0002538 – титр 0,001 н раствора тиосульфата по йоду (1 мл раствора соответствует 0,0002538 г йода); *n* – навеска масла, г.

**Задание 3:** Определить расчетным путем йодное число триглицерида линолевой кислоты. Сделать вывод о способности к самовозгоранию.

**Задание 4:** Определить йодное число триглицерида линоленовой кислоты. Сделать вывод о способности к самовозгоранию.

**Задание 5:** Рассчитать йодное число касторового масла имеющего следующий состав:

Трипальмеат – 3%

Тристеарат – 4%

Триомат – 5%

Тримномат – 6%

Тририцилат – 82%

Для справки:

Пальмитиновая кислота  $C_{15}H_{31}COOH$

Стеариновая кислота  $C_{17}H_{35}COOH$

Линолевая кислота  $C_{17}H_{31}COOH$

Линоленовая кислота  $C_{17}H_{29}COOH$

Рицинолевая кислота  $C_{17}H_{31}COOH$

Триглицераты кислот:

пальмитиновой,

стеариновой,

олеиновой,

линолевой,

линоленовой

### **Задание 6:** Определение температуры самовоспламенения

1. Определить объем воздуха, необходимого для 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.
2. Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2-диметилгексана.
3. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.
4. Рассчитать температуру самовоспламенения 1 метил-4-этилбензола.
5. Рассчитать температуру самовоспламенения органического вещества 2,2 диметил-бутанола.
6. Рассчитать температуру самовоспламенения 1,4 диизопропил бензола.
7. Рассчитать температуру самовоспламенения 4 – бутанола, вторичного бутилового спирта и третичного бутилового спирта. Сделать вывод о влиянии разветвления углеродной цепи на температуру воспламенения.
8. Определить температуру воспламенения этана, бутана, гексана, декана. Построить график зависимости T<sub>св</sub> от положения веществ в гомологическом ряду.
9. Определить T<sub>св</sub> толуола, 1,4-ди изопропилбензола и сделать вывод о влиянии боковой цепи на сравнительную пожарную опасность ароматических соединений.
10. Определить T<sub>св</sub> октана, октанола – 1 и этилбензола. Сделать вывод о влиянии строения вещества на их сравнительную пожарную опасность.

### **Практическая работа № 5**

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕГО И ВЕРХНЕГО КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

**Цель работы:** ознакомиться с методами расчета нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ) и верхнего концентрационного предела воспламенения (ВКПВ) горючих веществ.

#### **Общие положения:**

1. Для индивидуальных горючих веществ расчет производится по формуле:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{a \cdot n + b}$$

где  $\varphi_{н(в)}$  - концентрационные пределы (нижний (н) или верхний (в)) в объемных процентах;

Возможно применять для обозначения концентрационных пределов C<sub>н(в)</sub> в г/м<sup>3</sup>.

$n$  – число атомов кислорода, необходимых для полного сгорания горючего (стеохимический коэффициент при кислороде в уравнении реакции)

$a$  и  $b$  – эмпирические константы, приведенные в таблице:

| Параметры            | Константы |       |
|----------------------|-----------|-------|
|                      | $a$       | $b$   |
| Нижний предел $C_n$  | 4,342     | 4,679 |
| Верхний предел $C_v$ |           |       |
| при $n \leq 15$      | 0,775     | 0,560 |
| при $n > 15$         | 0,384     | 6,554 |

2. Для расчета КПВ смеси горючих веществ используют формулу Ле Шателье:

$$\varphi_n = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{\varphi_{n(1)}} + \frac{\varphi_2}{\varphi_{n(2)}} + \dots + \frac{\varphi_n}{\varphi_{n(n)}}}$$

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  – концентрация горючих компонентов, % об.

$\varphi_{n(1)}, \varphi_{n(2)}, \dots, \varphi_{n(n)}$  – соответствующее КПВ компонентов смеси, % об.

3. НКПВ возможно определять по предельной теплоте сгорания. Экспериментально установлено, что 1 м<sup>3</sup> большинства газозвоздушных смесей на НКПВ выделяет постоянное среднее количество теплоты  $\approx 1830$  кДж (предельная теплота горения). Тогда:

$$\varphi_n (\text{НКПВ смеси}) = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot 100}{Q_n}$$

где  $Q_n$  – низшая теплота горения горючего вещества, кДж/м<sup>3</sup> (табл).

### **Задачи:**

1. Вычислить НКПВ метана; этана; бутана. Сравнить их пожаровзрывоопасность.
2. Вычислить НКПВ смеси пропана и бутана, если пропана 80% об, бутана 20% об.
3. По предельной теплоте горения рассчитать НКПВ бутана в воздухе.
4. Определить НКПВ и ВКПВ этана, бутана, гексана. Сравнить их пожаровзрывоопасность.
5. Вычислить НКПВ и ВКПВ метана, этилена, ацетилен.
6. Определить НКПВ и ВКПВ уксусной кислоты и уксусного альдегида и проанализировать возможности образования взрывоопасных концентраций.

7. Определить КПВ газовой смеси, состоящей из 50% бутана, 10% пропилена и 40% этилена.

8. Вычислить НКПВ смеси этана и пропана, если этана 78%, а пропана 22%.

9. Вычислить НКПВ смеси пропана и бутана, если пропана 90%, бутана – 10%.

10. По предельной теплоте сгорания ( $Q_{пр}$ ) определить, как изменится НКПВ от положения предельных углеводородов (этан, пропан, бутан, гептан, гексан) в гомологическом ряду. Построить график зависимости НКПВ от молярной массы горючего.

11. Рассчитать КПВ парогазовой смеси, состоящей из 20% этана, 60% этилена, 20% паров этилового спирта.

Примечание:

Возможно сравнение результатов с табличными данными и определение ошибки приближенных расчетов.

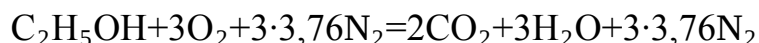
## Практическая работа № 6 ОСНОВНЫЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

**Цель работы:** ознакомиться с методами расчета стехиометрических показателей.

Стехиометрическая концентрация – это мольная доля (% об)

Задача 1. Определить стехиометрическую концентрацию паров этилового спирта в воздухе при  $t=20^{\circ}\text{C}$  и  $p=760$  мм рт.ст.

1. Уравнение реакции горения этилового спирта в воздухе



2. Находим мольную долю горючего ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) в газовой смеси

$$X_{\text{гор.стех.}} = \frac{1}{1 + 3 + 3 \cdot 3,76} = 6,5 \text{ моль \%}$$

или  $\varphi_{\text{сх}} = \frac{100}{4,76\beta + 1}$ , % об; где  $\beta$  - коэффициент при кислороде.

$$\varphi_{\text{сх}} = X_{\text{гор.стех.}}, \% \text{ об.}$$

3. Если стехиометрическая концентрация рассчитывается в кислороде, то

$$\varphi_{\text{сх}} = X_{\text{гор.стех.}} = \frac{1}{\beta + 1} = \frac{1}{4} = 0,25 = 25 \% \text{об.}$$

4. Моль  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  = 46 г/моль = 46 кг/кмоль.

5. Кмоль газа при н.у. = 22,4 м<sup>3</sup>, приводим к заданным условиям:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

$$V = \frac{T p_0 V_0}{p T_0} = \frac{273 + 20 \cdot 760 \cdot 22,4}{760 \cdot 273} = 24 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

Для горючих веществ, состоящих из атомов C H O N S Si P F Cl Br J, стехиометрическая концентрация в процентах объемных определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{ст}} = \frac{100}{4,84\beta + 1}$$

где  $\beta = m_{\text{C}} + m_{\text{S}} + m_{\text{Si}} + 2,5m_{\text{P}} + 0,25(m_{\text{H}} - m_{\text{X}}) - 0,5m_{\text{O}}$

где  $m_{\text{C},\text{S},\text{Si},\text{P},\text{H},\text{O}}$  – число атомов углерода, серы, кремния, фосфора, водорода и кислорода в молекуле горючего;  $m_{\text{X}}$  – суммарное число атомов F, Cl, Br, J в молекуле горючего.

### **Задачи:**

1. Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров этилового спирта с воздухом в объемных процентах.

2. Рассчитать стехиометрическую концентрацию н-бутанола в объемных процентах.

3. Сколько диэтилового эфира должно испариться в помещении объемом 200 м<sup>3</sup>, чтобы образовалась стехиометрическая концентрация при  $t = 10^\circ\text{C}$  и давлении 750 мм рт.ст.

4. Рассчитать, при какой концентрации температура самовоспламенения ацетилена в воздухе будет самой низкой.

5. Рассчитать стехиометрическую концентрацию паров пентана в воздухе при  $t = 18^\circ\text{C}$  и давлении 750 мм рт.ст.

6. Рассчитать стехиометрическую концентрацию бутана с воздухом в г/м<sup>3</sup>,  $t = 30^\circ\text{C}$ ,  $p = 97$  кПа.

7. Сколько карбида кальция должно прореагировать с водой, чтобы в помещении объемом 480 м<sup>3</sup> образовалась стехиометрическая концентрация ацетилена в воздухе (н.у.)?

## Практическая работа № 7

### ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ. АТМОСФЕРА

**Цель работы:** изучение физических и химических процессов, происходящих в атмосфере, и их влияние на жизнь на Земле.

*Атмосфера* - это относительно тонкий слой газа (воздуха), простирающийся до высоты примерно 100 км над поверхностью Земли. Если Землю представить себе в виде воздушного шарика, то его резиновая оболочка как раз и будет соответствовать по толщине земной атмосфере. Этот тонкий слой, однако, оказывает огромное влияние на состояние Земли.

Две наиболее химически важные области атмосферы – это тропосфера и стратосфера. Обратите внимание, как меняется с высотой температура (рис. 2.). При подъеме вверх плотность атмосферного воздуха уменьшается. Примерно 90% всех молекул, составляющих земную атмосферу, приходится на тропосферу. В тропосфере хорошо происходит перемешивание газов, так как в результате конвекции теплый газ из нижних слоев атмосферы поднимается вверх, а более холодный опускается. В стратосфере отрицательный градиент температур препятствует вертикальному перемешиванию, однако горизонтальное перемешивание происходит очень интенсивно, особенно при широтной циркуляции.

В таблице 1 приведены типичные данные по составу воздуха тропосферы.

Объемная концентрация некоторых из указанных веществ дана в частях на миллион (миллионных долях, млн.<sup>-1</sup>). Эта единица часто применяется при измерении низких концентраций; концентрация в 353 млн.<sup>-1</sup> соответствует 0,0353%.

Таблица 1

#### Состав воздуха (сухого) в тропосфере над незагрязненной территорией

| Газ                                                                            | Концентрация, % (об.) для первых трех газов<br>или млн. <sup>-1</sup> (об.) для остальных |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Азот                                                                           | 78                                                                                        |
| Кислород                                                                       | 21                                                                                        |
| Аргон                                                                          | 1                                                                                         |
| Диоксид углерода                                                               | 0,0353%                                                                                   |
| Неон                                                                           | 18,0                                                                                      |
| Гелий                                                                          | 5,0                                                                                       |
| Метан                                                                          | 1,7 <sup>a</sup>                                                                          |
| Криптон                                                                        | 1,1                                                                                       |
| Водород                                                                        | 0,5                                                                                       |
| Гемииоксид, N <sub>2</sub> O                                                   | 0,3 <sup>a</sup>                                                                          |
| Оксид углерода                                                                 | 0,1 <sup>a</sup>                                                                          |
| Ксенон                                                                         | 0,09                                                                                      |
| Оксид и диоксид азота $\left. \begin{matrix} NO \\ NO_2 \end{matrix} \right\}$ | 0,003 <sup>a</sup>                                                                        |

Атмосфера не всегда имела такой состав. Первичная атмосфера была утрачена Землей на ранних стадиях развития Солнечной системы. Возникшая затем новая атмосфера представляла собой смесь диоксида углерода, метана и аммиака, которые поступали из недр Земли.

Три миллиарда лет тому назад в атмосфере было очень мало кислорода. Появившиеся на Земле первые растения стали производить кислород в процессе фотосинтеза, однако, за период примерно в миллиард лет только малая часть этого кислорода оказалась в атмосфере. Почти весь кислород также быстро, как образовывался, расходовался на окисление соединений серы, железа и других веществ в земной коре. Только когда этот процесс в основном завершился, кислород стал накапливаться в атмосфере.

Когда концентрация кислорода достигла примерно 10%, этого оказалось достаточно для появления первых животных, потреблявших кислород при дыхании. В конце концов, поступление в атмосферу свободного кислорода в результате фотосинтеза и связывание его и в других процессах уравнились друг друга. С этого времени концентрация кислорода в атмосфере оставалась примерно на уровне 21%.

Обратитесь вновь к данным таблицы 1. Все указанные там газы попали в атмосферу в результате природных процессов. Деятельность человека влияет на состав атмосферного воздуха. Некоторые из газов, например, диоксид углерода, существовали в атмосфере и раньше; мы только увеличиваем их концентрацию. Другие, подобно хлорфторуглеродам (ХФУ), оказались в атмосфере исключительно в результате человеческой деятельности.

Но газы, помещенные в один сосуд, всегда полностью перемешиваются вследствие диффузии. В атмосфере этот самопроизвольный процесс сильно ускоряется воздушными потоками, так что со временем примесные газы распространяются по всей атмосфере. Загрязнение атмосферы – это глобальная проблема, которая касается нас всех. С этих позиций остановимся на двух процессах: разрушение озонового слоя и глобальное потепление вследствие парникового эффекта.

### ***Задание 1.***

Используйте данные таблицы 1 и ответьте на следующие вопросы:

1. Сколько аргона (в млн.<sup>-1</sup> об.) в обычном образце тропосферного воздуха?
2. а) Каков объем метана, содержащегося в 1л тропосферного воздуха?  
б) Рассчитайте процентное содержание молекул метана в этом же образце.
3. Для каждого из газов в табл. 1, содержание которых в атмосфере может изменяться, приведите один пример антропогенного воздействия, приводящего к росту концентрации данного газа?
4. Составьте секторную диаграмму по первым трем заданиям.

### ***Защита от солнечных лучей.***

В прежние времена люди, которым приходилось заниматься тяжелым трудом на открытом воздухе, не могли избежать появления загара. Те же, чье общественное положение было более "приличным", предпочитали выделяться из "массы", оставаясь бледными. Но в двадцатые годы французский модельер Коко Шанель ввела моду на солнечные ванны.

По мере того как расширяются наши знания о действии солнечного излучения на живую материю, мы все больше понимаем, что это была не лучшая идея.

Солнце излучает в широком спектре энергии. Часть спектра солнечного излучения соответствует энергиям, необходимым для разрыва химических связей. Солнечный свет, таким образом, может разорвать связи в молекулах, включая такие жизненно важные молекулы, как ДНК. Это может привести к генетическим нарушениям и возникновению рака кожи. В менее серьезных случаях это может повредить белки в соединительных тканях под кожей, которая при длительном пребывании на солнце из-за этого становится морщинистой. Даже короткое действие солнечного излучения может вызвать раздражение кровеносных сосудов кожи и, как результат, покраснение и ожог.

### ***Химические средства защиты от солнечного излучения***

Действие солнечного излучения различных областей спектра на кожу человека проиллюстрировано (рис. 1).



Рис. 1. Действие солнечного излучения на кожу

Очевидно, что наиболее опасна ультрафиолетовая область солнечного спектра. К счастью, есть вещества, которые поглощают большую часть излучения в ультрафиолетовой области.

Вы, наверное, задавали себе вопрос, почему люди не загорают в помещении? Вы можете часами сидеть у окна в солнечный день, но загар у вас не появится. Оконное стекло поглощает вредное ультрафиолетовое излучение, и оно не достигает кожи. (Плексиглас частично пропускает солнечный свет, так что через него можно загореть.)

Химики нашли материалы, которые действуют аналогично стеклу и которые можно нанести на кожу. Их называют *солнцезащитными*, и их тоннами продают ежегодно.

Однако наилучшую защиту от солнца создали не химики. Она всегда была с нами. Это атмосфера.

### **Атмосфера - хороший солнцезащитный экран**

Некоторые атмосферные газы очень сильно поглощают ультрафиолетовое излучение. Они выполняют роль глобального солнцезащитного экрана, из-за

которого большая часть жесткого солнечного излучения не достигает поверхности Земли.

Поглощение, в основном, происходит в верхних слоях атмосферы, в стратосфере. Особенно важную роль играет **озон**, который поглощает ультрафиолетовое излучение в диапазоне  $10, 10^{14}$  Гц -  $14,0 \cdot 10^{14}$  Гц. Излучение этого диапазона особенно плохо действует на кожу. (Посмотрите на рис. 1, который показывает действие на кожу излучений различной частоты). Большая часть вредного ультрафиолетового излучения поглощается озоном стратосферы.

В стратосфере нет жизни, так как мощное ультрафиолетовое из-

лучение разрушает хрупкие молекулы живой материи. В стратосфере разрушаются даже простые молекулярные образования. При разрыве некоторых ковалентных связей образуются фрагменты молекул (атомы или группы атомов), называемые *радикалами*.

Еще выше, выше стратосферы, излучение настолько мощное, что способно оторвать электроны от атомов, молекул или радикалов. Образуются ионы, а отсюда название этой части атмосферы – *ионосфера*.

### **Задание 2.**

Посмотрите на рис. 2, где обозначены различные слои атмосферы. Какие *виды* химических частиц - атомы, молекулы, радикалы или ионы - могут быть обнаружены в:

- тропосфере,
- стратосфере,
- ионосфере?

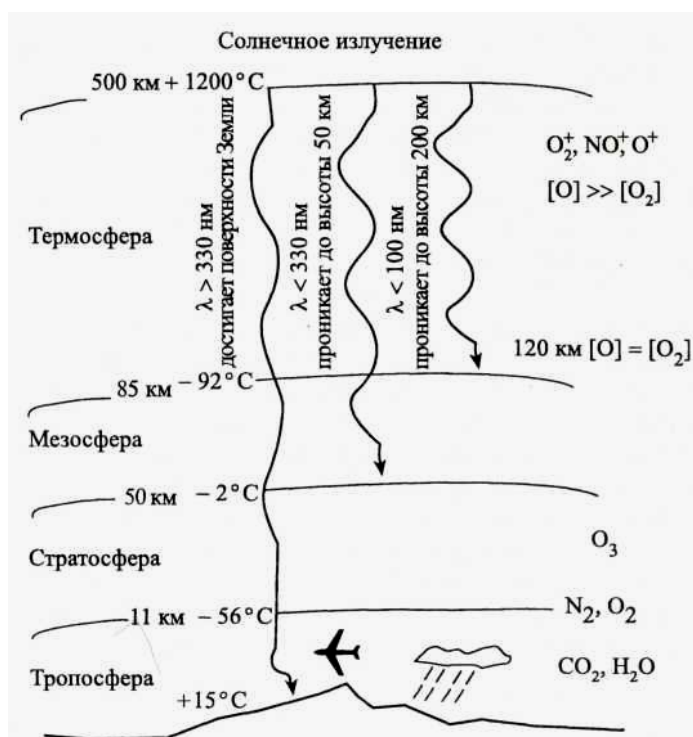


Рис. 2. Строение атмосферы

## ***Атмосферный озон***

Озон присутствует в атмосфере в очень небольших количествах, будучи рассеянным среди других атмосферных газов. Если можно было бы собрать весь атмосферный озон в слой вблизи земной поверхности при атмосферном давлении, то этот слой имел бы толщину всего 3 мм.

На больших высотах, в стратосфере, озон защищает нас, поглощая жесткое ультрафиолетовое излучение; однако внизу, в тропосфере, он может принести большие неприятности.

Озон, содержащийся в приземном слое атмосферы, оказывает отрицательное воздействие на здоровье человека. Гибель деревьев в лесах Северной Европы в какой-то мере также объясняется повышенной концентрацией озона. Это очень активный в химическом отношении газ и сильный окислитель. Он взаимодействует со многими синтетическими материалами, такими, как пластмассы, красители; вызывает, например, разрушение резины шин автомобилей.

Нет ничего удивительного в том, что озона мало в атмосфере: он реагирует с другими веществами так быстро, что не накапливается. Зная это, уместно спросить, почему озон вообще не исчезает? Очевидно, в атмосфере должны протекать реакции, продуктом которых является озон.

## ***Образование озона в атмосфере***

Озон образуется, когда атом кислорода (это пример радикала) взаимодействует с молекулой кислорода  $O_2$ :

Один из путей появления атомарного кислорода – расщепление (*диссоциация*) кислородной молекулы. Эта реакция требует достаточно много энергии. Энергия связи кислород – кислород в молекуле кислорода составляет +498 кДж/моль. Такая энергия может быть обеспечена за счет ультрафиолетового излучения или в электрическом разряде.

Как только атомы кислорода образуются, они реагируют с кислородными молекулами, которые всегда присутствуют в воздухе. Вы часто можете ощущать резкий запах озона вблизи включенных электромоторов или действующих светокопировальных установок. Электрические разряды в воздухе, возникающие внутри электрических машин, вызывают диссоциацию молекул кислорода. Вы также, должно быть, видели ультрафиолетовые лампы, применяемые для дезинфекции (уничтожения бактерий) в воздушной среде? Возле них вы тоже можете ощущать запах озона.

Часть озона в тропосфере образуется в результате сложной последовательности реакций в условиях фотохимического смога. Этот процесс происходит при ярком солнечном свете в крупных городах, атмосфера которых сильно загряз-

нена выхлопными газами автомобилей. Атомы кислорода в этом случае образуются под действием солнечного излучения на газ – загрязнитель диоксид азота.

В стратосфере атомы кислорода образуются в результате *фотодиссоциации* молекулярного кислорода. Это происходит, когда молекула кислорода поглощает ультрафиолетовое излучение определенной частоты.

### **Задание 3.**

1. Какова энергия связи кислород - кислород (в джоулях на 1 молекулу) в молекуле  $O_2$ ?

2. Используя выражение  $E = h\nu$ , вычислите частоту излучения, способного разорвать эту связь.

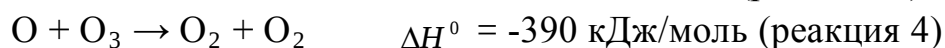
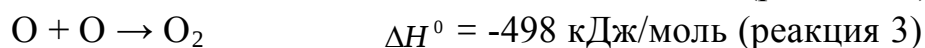
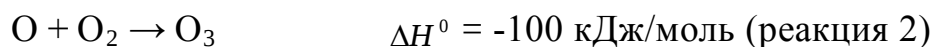
Уравнение реакции диссоциации молекулы кислорода на атомы записывается следующим образом:



В этой реакции величина  $h\nu$  – это энергия фотона ультрафиолетового излучения, поглощаемого молекулой кислорода..

Образующиеся при диссоциации атомы кислорода сталкиваются с другими частицами, и это может иметь различные последствия. Менее всего интересен случай, когда после столкновения частицы просто снова разлетаются. Но даже в том случае, когда атомы кислорода сталкиваются с частицами, с которыми они могут взаимодействовать, не всегда это приводит к реакции.

Более интересен случай, когда атом кислорода присоединяется к частице, с которой сталкивается. Такими частицами могут быть  $O_2$ , другой атом  $O$  или  $O_3$ . Возможные результаты такого взаимодействия показаны ниже:



Реакция 2 - это реакция образования озона.

Когда озон поглощает излучение в диапазоне частот  $10,1 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$  -  $14,0 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ , происходит фотодиссоциация  $O_3 + h\nu \longrightarrow O_2 + O$  (реакция 5)

Это как раз та реакция, которая обеспечивает защитные свойства озонового слоя, поскольку происходит поглощение жесткого солнечного излучения.

### **Задание 4.**

Обратитесь к реакциям 1-5.

1. Какая из реакций выводит озон из атмосферы?
2. В какой реакции (или реакциях) поглощается ультрафиолетовое излучение?
3. Какая реакция (или реакции) является экзотермической?

4. Какая связь между

а) реакциями 1 и 3?

б) реакциями 2 и 5?

5. Объясните, почему под действием ультрафиолетового излучения происходит нагревание стратосферы (как результат этих реакций), и почему стратосфера имеет более высокую температуру в верхних слоях и более низкую – в нижних?

### ***Вещества, разрушающие озон***

Мы уже говорили, что озон химически очень активен и взаимодействует с атомами кислорода. Кислородные атомы, однако, не единственные радикалы, которые можно обнаружить в стратосфере. Есть там и другие частицы - радикалы, которые могут вступать в реакцию с озоном, тем самым уменьшая его концентрацию.

Одним из важных радикалов в этом смысле является **атом хлора Cl**. Небольшие количества хлорметана  $\text{CH}_3\text{Cl}$  достигают стратосферы в результате природных процессов (рис. 3). Попавший в стратосферу хлорметан расщепляется под действием солнечной радиации с образованием атомов хлора.

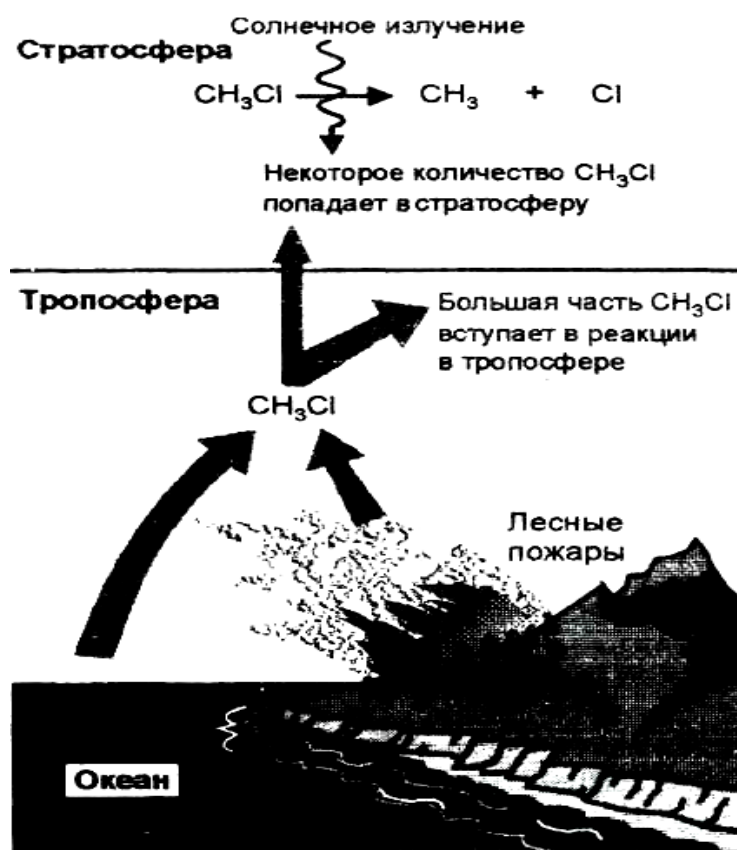
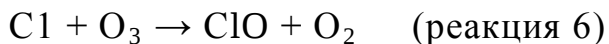


Рис.3. Хлорметан  $\text{CH}_3\text{Cl}$  образуется в океане, а также на суше при горении древесины. Он ответствен за присутствие небольших количеств хлора природного происхождения в стратосфере

Другие хлорсодержащие соединения, достигающие стратосферы, причем в более высоких концентрациях, являются продуктом человеческой деятельности. Они также поглощают высокоэнергетичное солнечное излучение и распадаются, образуя атомарный хлор.

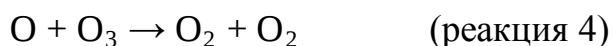
Атомы хлора реагируют с озоном следующим образом:



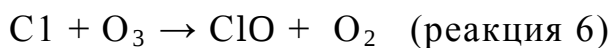
Образующийся при этом радикал ClO является химически активным и может взаимодействовать с атомами кислорода:



Таким образом, в стратосфере протекают две конкурирующие реакции, в результате которых уменьшается содержание озона:



и



Концентрация атомов хлора Cl много меньше, чем атомов кислорода O. Насколько велико влияние реакции 6 на состав стратосферы?

### **Задание 5.**

1. Атомы хлора особенно эффективны в разрушении молекул озона. Один атом хлора выводит из стратосферы до 1 млн. молекул озона.

Сложите уравнения 6 и 7. Вы получите уравнение суммарной реакции, вызванной атомами хлора.

Прокомментируйте результат. Какую роль играют атомы хлора в суммарной реакции?

В ситуациях, подобных этой, очень важно знать, с какими скоростями протекают реакции.

Реакция O<sub>3</sub> с атомами хлора Cl не имела бы большого значения, если бы ее скорость была много меньше скорости реакции O<sub>3</sub> с атомами O.

Химики измерили скорости этих двух реакций в лаборатории в различных условиях **и установили, что при температурах и давлениях, аналогичных естественным условиям** стратосферы, реакция O<sub>3</sub> с Cl более чем в 1500 раз **быстрее** реакции O<sub>3</sub> с атомами O.

Даже если учесть тот факт, что концентрация атомов Cl в стратосфере существенно меньше концентрации атомов O, ясно, что реакция атомов Cl с O<sub>3</sub> дает очень большой вклад в потерю озона.

Более того, атомы С1 регенерируются в **каталитическом цикле** (реакции 6 и 7) и могут вступать в реакцию с большим числом молекул озона. Вы видите теперь, почему действие атомов хлора может быть таким разрушительным.

### **Задание 6.**

1. В городе 50000 избирателей. Приближаются выборы, и политики и их помощники борются за голоса. У Оранжевой партии 100 агитаторов, а у Лиловой только 2. Работа агитаторов организована по-разному. Сторонник Оранжевой партии может за час убедить только 10 человек голосовать за нее, в то время как его конкурент, выступая перед большой аудиторией, способен склонить на свою сторону 15000.

а) В пользу какой партии закончатся выборы в этом городе?

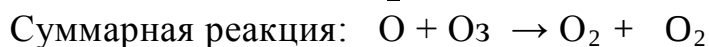
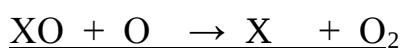
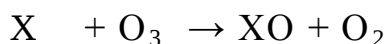
б) Эта вымышленная история приведена здесь как аналогия той ситуации, в которой находится озон в атмосфере в присутствии атомов С1 и О. Каким химическим частицам соответствуют в этой аналогии

1) избиратели в городе?

2) агитаторы Оранжевой партии?

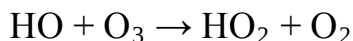
3) агитаторы Лиловой партии?

Атомы хлора – не единственные радикалы из присутствующих в стратосфере, которые могут разрушать озон в каталитических реакциях типа рассмотренных выше. Запишем реакции 6 и 7 в обобщенном виде, обозначив радикал символом X:

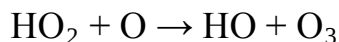


Ниже мы расскажем о двух других важных радикалах, которые могут разрушать озон.

Гидроксильные радикалы, образующиеся при взаимодействии атомов кислорода с молекулами воды в стратосфере, реагируют с озоном следующим образом:



Радикалы  $HO_2$  затем вступают в реакцию с атомами кислорода:



Таким образом, *это* еще один пример каталитического цикла, и высвобождающиеся радикалы HO снова могут реагировать с озоном.

### **Оксид азота NO**

Оксид азота взаимодействует с озоном с образованием диоксида и молекулярного кислорода. Диоксид азота может затем реагировать с атомарным ки-

слородом; при этом образуются монооксид азота и кислород, и таким образом реакционный цикл замыкается.

NO и NO<sub>2</sub> - необычные радикалы: они относительно устойчивы и их можно получить и накопить, как обычные молекулярные соединения (таким образом, их можно рассматривать и как радикалы, и как молекулы).

### ***Задание 7.***

а) Напишите уравнение реакции образования радикалов NO из атомов O и молекул воды.

б) Напишите уравнения реакций, показывающие, каким образом оксид азота может разрушать озон в каталитическом цикле.

### ***Оксид азота в стратосфере, источники.***

Оксид азота NO в стратосфере, в основном, образуется в реакции гемиоксида азота атомарным кислородом  $N_2O + O \rightarrow 2NO$

Из оксидов азота гемиоксид азота наиболее распространен в атмосфере (см. табл. 1). Он образуется из азотсодержащих соединений в результате биологических процессов (некоторые почвенные бактерии, а также микроорганизмы, живущие в морях и океанах, разлагают соединения азота) и частично проникает в стратосферу. Но стратосферный гемиоксид азота не весь чисто природного происхождения: к увеличению содержания этого соединения в атмосфере приводит применение азотных удобрений.

Рассмотренные выше радикалы Cl, HO, NO относятся к числу наиболее важных, но ими перечень радикалов, содержащихся в атмосфере, не ограничивается. Предположительно, сотни реакций влияют на содержание газов в стратосфере.

Большинство из них имели место задолго до появления человека на Земле. Но человеческая деятельность может оказывать серьезное влияние на некоторые ключевые реакции и приводить к драматическим изменениям концентрации озона в стратосфере.

Уже в течение многих лет химики обеспокоены тем, что некоторые вещества, попадающие в атмосферу в результате антропогенной деятельности, могут приводить к разрушению озонового слоя. В начале семидесятых годов наибольшую тревогу вызывали полеты высотных реактивных самолетов. Реактивные двигатели выбрасывают газовую смесь, содержащую оксиды. Может ли это сильно повлиять на содержание оксидов азота в стратосфере и, таким образом, повредить озоновому слою Земли? В конце концов выяснилось, что эта проблема не является существенной - число самолетов, совершающих полеты

на таких больших высотах, недостаточно велико, чтобы их выбросы могли заметно повлиять на содержание оксидов азота.

### ***ХФУ - очень полезные химические соединения***

В 1930 году американский инженер Томас Мидгли демонстрировал новый хладагент в Американском химическом обществе. Мидгли вдыхал в себя дифтордихлорметан ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) и задувал им свечу.

Именно таким впечатляющим способом Мидгли хотел охарактеризовать два важных свойства  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  - нетоксичность и негорючесть. В то время в качестве хладагента в основном использовали аммиак. Температура кипения аммиака, равная  $-37^\circ\text{C}$ , позволяет легко сжижать его с помощью компрессора. К сожалению, аммиак токсичен и обладает резким запахом.

Т. Мидгли получил задание найти заменитель аммиаку, то есть найти соединение, которое имело бы подобную температуру кипения, но было химически неактивным и потому безопасным. Мидгли нашел  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ .

$\text{CCl}_2\text{F}_2$  принадлежит к классу хлорфторуглеродов (ХФУ). Эти соединения содержат в молекуле хлор, фтор и углерод. К этому классу относятся несколько соединений с разными температурами кипения. Именно это свойство сыграло важную роль при их применении. Среди ХФУ всегда можно найти вещество, отвечающее требованиям по температуре кипения.

Другие важные свойства ХФУ: они химически неактивны, имеют низкую горючесть и низкую токсичность.

Томас Мидгли и другие химики, синтезировавшие ХФУ, сделали свою работу слишком хорошо. Был найден класс крайне нереакционноспособных соединений, из-за чего они великолепно подходили для указанных выше применений. Сложность в том, что эти соединения оказались *слишком* неактивными.

Время жизни ХФУ в тропосфере оценивается примерно в 100 лет. Эти соединения располагают очень большим временем для того, чтобы достичь стратосферы, где они уже не будут более химически инертными.

По мере того как люди все больше узнают о влиянии ХФУ на стратосферный озон, они начинают все настойчивее требовать замены этих соединений на более безопасные. Это важная задача и поставлена сейчас перед химической промышленностью.

Прогресс в этом направлении был достигнут очень быстро. В качестве заменителей используются хлорфторуглеводороды (ХФУВ) и фторуглеводороды (ФУВ). Отличие этих веществ от ХФУ состоит в том, что их молекулы имеют связь Н-С и разрушаются в тропосфере.

К сожалению, однако, это пока не лучшее решение. И ХФУ, и их заменители — парниковые газы, и они приводят к глобальному потеплению климата. Есть так-

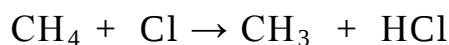
же опасения, что некоторые из продуктов распада этих соединений могут быть токсичны.

### ***Метан во спасение***

Атомы хлора – неблагоприятный компонент стратосферы. Они взаимодействуют с озоном и разрушают его. Они настолько химически активны, что быстро разрушили бы почти весь озон, если бы в стратосфере не было других веществ. К счастью, в стратосфере есть и другие молекулы, которые реагируют с хлором.

Метан  $\text{CH}_4$  - одна из таких молекул. Метан образуется на Земле в больших количествах в результате жизнедеятельности живых организмов. Большая часть метана окисляется в тропосфере, но значительное количество газа в конце концов достигает стратосферы.

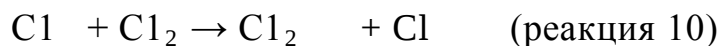
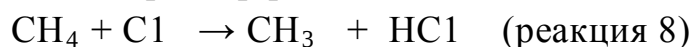
Попавший в стратосферу метан выводит атомарный хлор, взаимодействуя с ним по реакции



Образующийся по этой реакции хлорид водорода может, опускаясь вниз, попадать в тропосферу и выпадать с осадками. Таким образом часть атомов хлора уходит из стратосферы. К сожалению, того количества метана, которое присутствует в стратосфере, недостаточно, чтобы концентрация атомарного хлора там не увеличивалась.

### ***Задание 8.***

Ниже приведены три реакции с участием хлора, которые могут происходить в стратосфере:



1. Для каждой из реакций ответьте на следующие вопросы:

а) Разрыв какой связи происходит во время реакции? Используя справочные таблицы, найдите энергию этой связи.

б) Какая новая связь образуется в реакции? Найдите по таблицам энергию этой связи.

в) Зная энергии этих связей, найдите  $\Delta H$  реакции.

2. Решить задачи № 10, 11, 14, 15.

### ***Излучение приходящее, излучение уходящее***

Нагретые тела испускают электромагнитное излучение. Чем выше температура объекта, тем больше энергия излучения.

Поверхность Солнца имеет температуру около 6000 К, и это значит, что Солнце излучает в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах.

Земля нагревается солнечным излучением. Средняя температура земной поверхности 285 К, это гораздо меньше, чем у Солнца, но достаточно для того, чтобы Земля имела собственное электромагнитное излучение. Из-за более

низкой, чем у Солнца, температуры Земля излучает, в основном, в инфракрасной области спектра (рис. 4).

Основная доля энергии излучения Солнца сосредоточена в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Частично солнечная энергии поглощается Землей и ее атмосферой, а частично отражается в космическое пространство. Поглощенная энергия нагревает Землю, и, как нагретое тело, Земля излучает энергию в космос. Устанавливается стационарное состояние, при котором Земля отдает энергию в окружающее пространство с такой же скоростью, с какой поглощает солнечную энергию. В этих условиях (рис.4) средняя

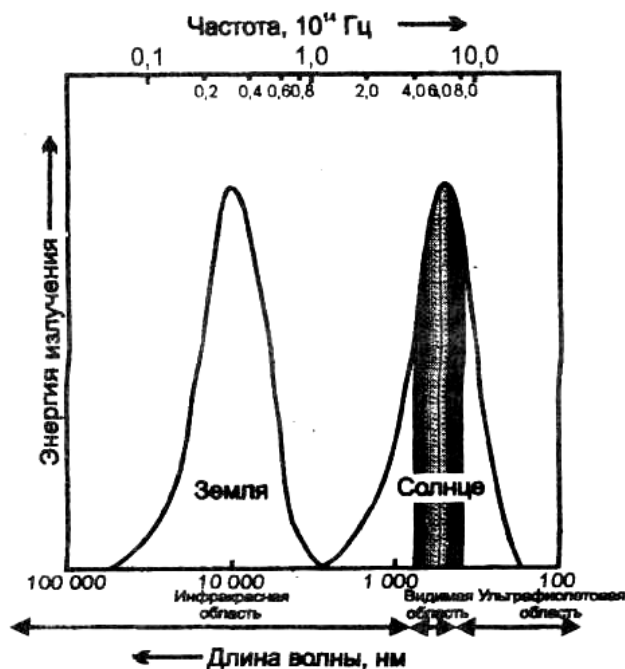


Рис. 4 Излучение Солнца, достигающее внешних слоев атмосферы, и излучение поверхности Земли (частоты и длины волн даны в логарифмическом масштабе)

температура Земли остается постоянной.

Как и в любой стационарной системе, равновесие может быть *нарушено вследствие* каких-то изменений в системе. В данном случае, это может произойти, например, из-за изменения содержания различных атмосферных газов, в частности, метана.

### Задание 9.

На рис. 4 приведены энергетические спектры излучения Солнца и Земли.

Метан поглощает излучение в диапазонах частот

$$0,39 \cdot 10^{14} \text{ Гц} - 0,46 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$0,85 \cdot 10^{14} \text{ Гц} - 1,03 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

1. Поглощает ли метан в земной атмосфере *приходящее* солнечное излучение?

2. Поглощает ли метан *испускаемое* Землей излучение?

3. Какое влияние может оказать изменение содержания метана в атмосфере на: а) энергетическое равновесие Земли, устанавливающееся в результате поглощения солнечной энергии и испускания инфракрасного (теплового) излучения?

б) температуру Земли?

## Термодинамические величины органических соединений

| № по пор.               | Вещество                                                                | $\Delta H_f^{298}$<br>кдж/моль | $S_{298}$<br>дж/моль·град | Теплоемкость, дж/моль·град             |                |                |                | $C_p^{298}$<br>дж/моль·град |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|
|                         |                                                                         |                                |                           | Коэффициенты уравнения<br>$C_p = f(T)$ |                |                |                |                             |
|                         |                                                                         |                                |                           | $a$                                    | $b \cdot 10^3$ | $c \cdot 10^6$ | $d \cdot 10^9$ |                             |
| Органические соединения |                                                                         |                                |                           |                                        |                |                |                |                             |
| Углеводороды            |                                                                         |                                |                           |                                        |                |                |                |                             |
| 1                       | CH <sub>4</sub> (г.) метан . . .                                        | -74,85                         | 186,19                    | 17,45                                  | 60,46          | -1,117         | -7,20          | 35,79                       |
| 2                       | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (г.) ацетилен . . .                       | 226,75                         | 200,8                     | 23,46                                  | 85,77          | -58,34         | 15,87          | 43,93                       |
| 3                       | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (г.) этилен . . .                         | 52,28                          | 219,4                     | 4,196                                  | 154,59         | -81,09         | 16,82          | 43,63                       |
| 4                       | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (г.) этан . . .                           | -84,67                         | 229,5                     | 4,494                                  | 182,26         | -74,86         | 10,8           | 52,70                       |
| 5                       | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> (г.) пропadiен . . .                      | 192,1                          | 234,9                     | 13,07                                  | 175,3          | -71,17         | —              | 58,99                       |
| 6                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (г.) пропилен . . .                       | 20,41                          | 226,9                     | 3,305                                  | 235,86         | -117,6         | 22,68          | 63,89                       |
| 7                       | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (г.) пропан . . .                         | -103,9                         | 269,9                     | -4,80                                  | 307,3          | -160,16        | 32,75          | 73,51                       |
| 8                       | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (г.) 1,3-бутадиен . . .                   | 111,9                          | 278,7                     | -2,96                                  | 340,08         | -223,7         | 56,53          | 79,54                       |
| 9                       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> (г.) 1-бутилен . . .                      | 1,17                           | 307,4                     | -2,54                                  | 344,9          | -191,28        | 41,66          | 89,33                       |
| 10                      | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> (г.) цис-2-бутилен . . .                  | -5,70                          | 300,8                     | -2,72                                  | 307,1          | -111,3         | —              | 78,91                       |
| 11                      | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> (г.) транс-2-бутилен . . .                | -10,06                         | 296,5                     | 8,38                                   | 307,54         | -148,26        | 27,28          | 87,82                       |
| 12                      | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> (г.) 2-метилпропилен . . .                | -13,99                         | 293,6                     | 7,08                                   | 321,63         | -166,07        | 33,50          | 89,12                       |
| 13                      | n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (г.) n-бутан . . .                     | -124,7                         | 310,0                     | 0,469                                  | 385,38         | -198,88        | 39,97          | 97,78                       |
| 14                      | изо-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (г.) изобутан . . .                  | -131,6                         | 294,64                    | -6,84                                  | 409,64         | -220,55        | 45,74          | 96,82                       |
| 15                      | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> (г.) циклопентан . . .                   | -77,24                         | 292,9                     | -54,39                                 | 545,8          | -307,7         | 66,59          | 82,93                       |
| 16                      | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> (ж.) циклопентан . . .                   | -105,9                         | 204,1                     | —                                      | —              | —              | —              | 126,73                      |
| 17                      | n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (г.) n-пентан . . .                    | -146,4                         | 348,4                     | 1,44                                   | 476,5          | -250,4         | 51,24          | 122,6                       |
| 18                      | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (г.) 2-метилбутан . . .                  | -154,5                         | 343,0                     | -9,29                                  | 517,7          | -292,9         | 64,78          | 120,6                       |
| 19                      | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (ж.) 2-метилбутан . . .                  | -179,3                         | 260,4                     | —                                      | —              | —              | —              | 164,9                       |
| 20                      | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (г.) 2,2-диметилпропан (неопентан) . . . | -166,0                         | 306,4                     | -15,10                                 | 548,6          | -322,9         | 73,54          | 121,63                      |
| 21                      | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (г.) бензол . . .                         | 82,93                          | 269,2                     | -33,90                                 | 471,87         | -298,34        | 70,84          | 81,67                       |
| 22                      | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (ж.) бензол . . .                         | 49,04                          | 173,2                     | 59,50                                  | 255,02         | —              | —              | 136,1                       |
| 23                      | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (г.) циклогексан . . .                   | -123,1                         | 298,2                     | -51,72                                 | 598,8          | -230,0         | —              | 106,3                       |
| 24                      | n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (г.) n-гексан . . .                    | -167,19                        | 386,8                     | 3,08                                   | 565,8          | -300,4         | 62,06          | 146,7                       |
| 25                      | n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (ж.) n-гексан . . .                    | -198,8                         | 296,0                     | —                                      | —              | —              | —              | 195,0                       |
| 26                      | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (г.) толуол . . .                         | 50,00                          | 319,7                     | -33,88                                 | 557,0          | -342,4         | 79,87          | 103,8                       |
| 27                      | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (ж.) толуол . . .                         | 8,08                           | 219                       | —                                      | —              | —              | —              | 166                         |
| 28                      | n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (г.) n-гептан . . .                    | -187,82                        | 425,3                     | 5,02                                   | 653,76         | -348,7         | 72,32          | 170,8                       |
| 29                      | n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (ж.) n-гептан . . .                    | -224,4                         | 328,0                     | —                                      | —              | —              | —              | 224,7                       |
| 30                      | o-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (г.) o-ксилол . . .                    | 19,0                           | 352,8                     | -14,81                                 | 591,1          | -339,6         | 74,70          | 133,3                       |
| 31                      | o-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (ж.) o-ксилол . . .                    | -24,4                          | 246,0                     | —                                      | —              | —              | —              | 188,8                       |
| 32                      | m-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (г.) m-ксилол . . .                    | 17,24                          | 357,2                     | -27,38                                 | 620,9          | -363,9         | 81,38          | 127,6                       |
| 33                      | m-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (ж.) m-ксилол . . .                    | -25,42                         | 252,2                     | —                                      | —              | —              | —              | 183,2                       |
| 34                      | p-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (г.) p-ксилол . . .                    | 17,95                          | 352,4                     | -25,92                                 | 609,7          | -350,6         | 76,88          | 126,9                       |
| 35                      | p-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (ж.) p-ксилол . . .                    | -24,34                         | 247,4                     | —                                      | —              | —              | —              | 183,8                       |
| 36                      | n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (г.) n-октан . . .                     | -208,4                         | 463,7                     | 6,91                                   | 741,9          | -397,3         | 82,64          | 194,9                       |
| 37                      | C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> (кр.) нафталин . . .                     | 75,44                          | 167,4                     | —                                      | —              | —              | —              | 165,7                       |
| 38                      | C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> (кр.) дифенил . . .                     | 96,65                          | 206                       | —                                      | —              | —              | —              | 195                         |
| 39                      | C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> (кр.) антрацен . . .                    | 128,0                          | 207,5                     | —                                      | —              | —              | —              | 209                         |
| 40                      | C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> (кр.) фенантрен . . .                   | 113                            | 211,7                     | —                                      | —              | —              | —              | 231                         |

| № по пор.                     | Вещество                                                                        | $\Delta H_f^{298}$<br>кДж/моль | $S^{298}$<br>дж/моль·град | Теплоемкость, дж/моль·град             |                |                |                | $C_p^{298}$<br>дж/моль·град |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|
|                               |                                                                                 |                                |                           | Коэффициенты уравнения<br>$C_p = f(T)$ |                |                |                |                             |
|                               |                                                                                 |                                |                           | $a$                                    | $b \cdot 10^3$ | $c \cdot 10^6$ | $d \cdot 10^9$ |                             |
| Кислородсодержащие соединения |                                                                                 |                                |                           |                                        |                |                |                |                             |
| 41                            | CH <sub>2</sub> O (г.) муравьиный альдегид . . . . .                            | -115,9                         | 218,8                     | 18,82                                  | 58,38          | -15,61         | —              | 35,34                       |
| 42                            | CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ж.) муравьиная кислота . . . . .                | -422,8                         | 129,0                     | —                                      | —              | —              | —              | 99,0                        |
| 43                            | CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (г.) муравьиная кислота . . . . .                | -376,7                         | 251,6                     | 19,4                                   | 112,8          | -47,5          | —              | 48,7                        |
| 44                            | CH <sub>4</sub> O (ж.) метиловый спирт . . . . .                                | -238,7                         | 126,7                     | —                                      | —              | —              | —              | 81,6                        |
| 45                            | CH <sub>4</sub> O (г.) метиловый спирт . . . . .                                | -201,2                         | 239,7                     | 15,28                                  | 105,2          | -31,04         | —              | 43,9                        |
| 46                            | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (кр.) щавелевая кислота . . . . .  | -826,8                         | 120,1                     | —                                      | —              | —              | —              | 109                         |
| 47                            | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O (г.) уксусный альдегид . . . . .                | -166,0                         | 264,2                     | 13,00                                  | 153,5          | -53,7          | —              | 54,64                       |
| 48                            | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O (г.) окись этилена . . . . .                    | -51,0                          | 243,7                     | -9,60                                  | 232,1          | -140,5         | 32,90          | 48,5                        |
| 49                            | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> (ж.) уксусная кислота . . . . .    | -484,9                         | 159,8                     | —                                      | —              | —              | —              | 123,4                       |
| 50                            | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> (г.) уксусная кислота . . . . .    | -437,4                         | 282,5                     | 5,56                                   | 243,5          | -151,9         | 36,8           | 66,5                        |
| 51                            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (ж.) этиловый спирт . . . . .                   | -277,6                         | 160,7                     | —                                      | —              | —              | —              | 111,4                       |
| 52                            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (г.) этиловый спирт . . . . .                   | -235,3                         | 282,0                     | 19,07                                  | 212,7          | -108,6         | 21,9           | 73,6                        |
| 53                            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (г.) диметиловый эфир . . . . .                 | -185,4                         | 266,6                     | —                                      | —              | —              | —              | 65,94                       |
| 54                            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> (ж.) этиленгликоль . . . . .       | -454,9                         | 179,5                     | —                                      | —              | —              | —              | 151                         |
| 55                            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> (г.) этиленгликоль . . . . .       | -397,9                         | 323,5                     | —                                      | —              | —              | —              | —                           |
| 56                            | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O (ж.) ацетон . . . . .                           | -247,7                         | 200                       | —                                      | —              | —              | —              | 125                         |
| 57                            | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O (г.) ацетон . . . . .                           | -216,4                         | 294,9                     | 22,47                                  | 201,8          | -63,5          | —              | 74,9                        |
| 58                            | n-C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (ж.) n-пропиловый спирт . . . . .             | -306,6                         | 192,9                     | —                                      | —              | —              | —              | 148,6                       |
| 59                            | n-C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (г.) n-пропиловый спирт . . . . .             | -260,4                         | 317,6                     | —                                      | —              | —              | —              | —                           |
| 60                            | изо-C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (ж.) изопропиловый спирт . . . . .          | -318,7                         | 180                       | —                                      | —              | —              | —              | 153,4                       |
| 61                            | изо-C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (г.) изопропиловый спирт . . . . .          | -275,4                         | 306,3                     | —                                      | —              | —              | —              | —                           |
| 62                            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> (ж.) глицерин . . . . .            | -659,4                         | 207,9                     | —                                      | —              | —              | —              | 223,0                       |
| 63                            | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> (кр.) малеиновая кислота . . . . . | -787,8                         | 159                       | —                                      | —              | —              | —              | 137                         |
| 64                            | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> (кр.) фумаровая кислота . . . . .  | -811,0                         | 166                       | —                                      | —              | —              | —              | 142                         |
| 65                            | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> (ж.) масляная кислота . . . . .    | -524,3                         | 255                       | —                                      | —              | —              | —              | 178                         |

| № по пор. | Вещество                                               | $\Delta H_f^{298}$<br>кДж/моль | $S_{298}^0$<br>Дж/моль·град | Теплоемкость, Дж/моль·град               |                |                |                |                             |
|-----------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|
|           |                                                        |                                |                             | Коэффициенты уравнения<br>$C_p^0 = f(T)$ |                |                |                | $C_p^{298}$<br>Дж/моль·град |
|           |                                                        |                                |                             | a                                        | $b \cdot 10^3$ | $c \cdot 10^6$ | $d \cdot 10^9$ |                             |
| 66        | $C_4H_8O_2$ (ж.) уксусно-этиловый эфир . . . .         | -469,5                         | 259                         | —                                        | —              | —              | —              | 170                         |
| 67        | $C_4H_8O_2$ (ж.) 1,4-диоксан . . . . .                 | -400,8                         | 196,6                       | —                                        | —              | —              | —              | 152,9                       |
| 68        | $C_5H_{10}O$ (ж.) циклопентанол . . . . .              | -300,2                         | 206                         | —                                        | —              | —              | —              | 184                         |
| 69        | $n-C_5H_{12}O$ (ж.) <i>n</i> -амиловый спирт . . . . . | -360,1                         | 254,8                       | —                                        | —              | —              | —              | 209,2                       |
| 70        | $n-C_5H_{12}O$ (г.) <i>n</i> -амиловый спирт . . . . . | -307,2                         | 381,6                       | —                                        | —              | —              | —              | —                           |
| 71        | $C_6H_6O$ (кр.) фенол . . .                            | -162,8                         | 142                         | —                                        | —              | —              | —              | 134,7                       |
| 72        | $C_6H_6O_2$ (кр.) гидрохинон . . . . .                 | -363,0                         | —                           | —                                        | —              | —              | —              | 142                         |
| 73        | $C_6H_4O_2$ (кр.) хинон . . .                          | -186,8                         | —                           | —                                        | —              | —              | —              | 132                         |
| 74        | $C_7H_6O_2$ (кр.) бензойная кислота . . . . .          | -385,2                         | 167,6                       | —                                        | —              | —              | —              | 146,8                       |
| 75        | $C_7H_8O$ (ж.) бензиловый спирт . . . . .              | -161,0                         | 216,7                       | —                                        | —              | —              | —              | 217,8                       |
| 76        | $C_8H_4O_3$ (кр.) ангидрид фталевой кислоты . . . . .  | -460,4                         | 179,5                       | —                                        | —              | —              | —              | 161,8                       |
| 77        | $C_8H_6O_4$ (кр.) фталевая кислота . . . . .           | -781,9                         | 207,9                       | —                                        | —              | —              | —              | 188,2                       |
| 78        | $C_{12}H_{10}O_4$ (кр.) хингидрон . . . . .            | (-581,6)                       | —                           | —                                        | —              | —              | —              | —                           |
| 79        | $C_{12}H_{22}O_{11}$ (кр.) сахароза . . . . .          | -2221                          | 360                         | —                                        | —              | —              | —              | 425                         |

## Галогенсодержащие соединения

|    |                                              |        |       |       |       |        |      |       |
|----|----------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| 80 | $CH_3F$ (г.) фтористый метил . . . . .       | -247   | 222,8 | 9,75  | 97,3  | -29,10 | —    | 37,40 |
| 81 | $CH_3Cl$ (г.) хлористый метил . . . . .      | -82,0  | 233,5 | 15,57 | 92,74 | -28,31 | —    | 40,71 |
| 82 | $CH_3Br$ (г.) бромистый метил . . . . .      | -35,6  | 245,8 | 18,53 | 89,40 | -27,28 | —    | 42,4  |
| 83 | $CH_3I$ (ж.) иодистый метил . . . . .        | -8,4   | 162,7 | —     | —     | —      | —    | 127,2 |
| 84 | $CH_3I$ (г.) иодистый метил . . . . .        | 20,5   | 253,0 | 19,67 | 92,67 | -32,28 | —    | 44,1  |
| 85 | $CH_2F_2$ (г.) дифторметан . . . . .         | -441,6 | 246,0 | 11,39 | 118,2 | -46,0  | —    | 43,0  |
| 86 | $CH_2Cl_2$ (ж.) дихлорметан . . . . .        | -117,1 | 178,6 | —     | —     | —      | —    | 100,0 |
| 87 | $CH_2Cl_2$ (г.) дихлорметан . . . . .        | -87,9  | 270,2 | 16,10 | 144,4 | -98,60 | 25,2 | 51,1  |
| 88 | $CHF_3$ (г.) трифторметан . . . . .          | -680,3 | 259,5 | 18,80 | 127,9 | -55,78 | —    | 51,09 |
| 89 | $CHCl_3$ (ж.) трихлорметан (хлороформ) . . . | -131,8 | 202,9 | —     | —     | —      | —    | 116,3 |

| № по пер.                 | Вещество                                                                                         | $\Delta H_f^{298}$<br>кДж/моль | $S_{298}^0$<br>дж/моль·град | Теплоемкость, дж/моль·град             |                     |                     |                     | $C_p^{298}$<br>дж/моль·град |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
|                           |                                                                                                  |                                |                             | Коэффициенты уравнения<br>$C_p = f(T)$ |                     |                     |                     |                             |
|                           |                                                                                                  |                                |                             | a                                      | b · 10 <sup>3</sup> | c · 10 <sup>6</sup> | d · 10 <sup>9</sup> |                             |
| 90                        | CHCl <sub>3</sub> (г.) трихлор-<br>метан (хлороформ)                                             | -100,4                         | 295,6                       | 81,38                                  | 16,0                | -18,7 *             | —                   | 65,7                        |
| 91                        | CF <sub>4</sub> (г.) тетрафторме-<br>тан (четырёхфто-<br>ристый углерод)                         | -908                           | 262,0                       | 85,67                                  | 15,9                | -26,3 *             | —                   | 61,2                        |
| 92                        | CCl <sub>3</sub> (ж.) тетрахлор-<br>метан (четырёх-<br>хлористый углерод)                        | -139,3                         | 214,4                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 131,7                       |
| 93                        | CCl <sub>4</sub> (г.) тетрахлор-<br>метан (четырёх-<br>хлористый углерод)                        | -106,7                         | 309,7                       | 97,65                                  | 9,62                | -15,06 *            | —                   | 83,4                        |
| 94                        | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> F (г.) фторис-<br>тый этил . . . . .                               | -297                           | 364,8                       | 8,39                                   | 190,2               | -67,83              | —                   | 58,6                        |
| 95                        | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl (г.) хлори-<br>стый этил . . . . .                              | -105,0                         | 274,8                       | 13,07                                  | 188,5               | -71,94              | —                   | 62,3                        |
| 96                        | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> F (ж.) фторбензол                                                  | -145,4                         | 205,9                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 146,4                       |
| 97                        | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> F (г.) фторбензол                                                  | -109,7                         | 323,5                       | -34,2                                  | 532,0               | -375,8              | 98,0                | 94,4                        |
| 98                        | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl (ж.) хлорбен-<br>зол . . . . .                                  | 10,65                          | 194,1                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 150,1                       |
| 99                        | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl (г.) хлорбен-<br>зол . . . . .                                  | 52,13                          | 313,2                       | -33,9                                  | 558,0               | -445,2              | 139,4               | 97,1                        |
| 100                       | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> F <sub>3</sub> (ж.) фенил-<br>трифторметан                         | -618,6                         | 271,5                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 188,4                       |
| 101                       | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> F <sub>3</sub> (г.) фенил-<br>трифторметан                         | -581,0                         | 372,6                       | -33,4                                  | 681,3               | -490,5              | 129,0               | 130,4                       |
| Азотсодержащие соединения |                                                                                                  |                                |                             |                                        |                     |                     |                     |                             |
| 102                       | CH <sub>5</sub> N (г.) метиламин                                                                 | -28,03                         | 241,6                       | 16,34                                  | 130,6               | -38,45              | —                   | 51,7                        |
| 103                       | CH <sub>2</sub> N <sub>2</sub> (г.) диазометан                                                   | 192                            | 238,7                       | 54,02                                  | 31,5                | -13,16 *            | —                   | 48,85                       |
| 104                       | CH <sub>6</sub> N <sub>2</sub> (ж.) метилги-<br>дразин . . . . .                                 | —                              | 165,9                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 134,9                       |
| 105                       | CH <sub>6</sub> N <sub>2</sub> (г.) метилги-<br>дразин . . . . .                                 | —                              | 278,7                       | 25,30                                  | 179,0               | -56,4               | —                   | 71,13                       |
| 106                       | C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N (г.) диметил-<br>амин . . . . .                                  | -27,61                         | 273,1                       | -3,10                                  | 263,1               | -152,2              | 32,0                | 69,04                       |
| 107                       | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N (г.) триметил-<br>амин . . . . .                                 | -46,02                         | 288,8                       | -11,95                                 | 414,2               | -245,8              | 56,8                | 91,76                       |
| 108                       | C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N (ж.) пиридин                                                     | 99,95                          | 177,9                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 132,7                       |
| 109                       | C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N (г.) пиридин                                                     | 140,2                          | 282,8                       | -38,60                                 | 479,5               | -326,6              | 83,1                | 78,12                       |
| 110                       | C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N (ж.) анилин                                                      | 29,7                           | 192                         | —                                      | —                   | —                   | —                   | 191                         |
| 111                       | C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N (г.) анилин                                                      | 82,4                           | 301                         | —                                      | —                   | —                   | —                   | —                           |
| 112                       | CH <sub>4</sub> ON <sub>2</sub> (кр.) моче-<br>вина . . . . .                                    | -333,1                         | 104,6                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 93,14                       |
| 113                       | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N (кр.) ами-<br>ноуксусная кис-<br>лота (гликоколь) | -524,9                         | 109,2                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 100,3                       |
| 114                       | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N (ж.) нитро-<br>бензол . . . . .                   | 11,2                           | 224,3                       | —                                      | —                   | —                   | —                   | 187,3                       |

\* Эта величина представляет собой коэффициент  $c' \cdot 10^{-6}$  уравнения  $C_p = a + bT + \frac{c'}{T^2}$ .

## Физико-химические константы горючих веществ

Таблица 1

Показатели пожарной опасности некоторых  
твердых горючих материалов

| Название                           | $T_{св}, K$ | $T_v, K$ | $Q_H, кДж/кг$ | $u_{max},$<br>кг/(м <sup>3</sup> · мин) |
|------------------------------------|-------------|----------|---------------|-----------------------------------------|
| Антрацит                           | 773         | —        | 31 425        | —                                       |
| Винипласт                          | 723         | 623      | 18 105        | —                                       |
| Волокно ацетатное                  | 708         | 628      | —             | —                                       |
| Волокно вискозное                  | 718         | 593      | 15 511,9      | —                                       |
| Волокно лавсан                     | 713         | 663      | 22 584,1      | —                                       |
| Волокно капрон                     | 713         | 663      | 30 754,6      | —                                       |
| Древесина сосновая ( $W = 9 \%$ )  | 568         | 528      | 12 570—14 665 | —                                       |
| Картон гофрированный               | 704         | 531      | —             | —                                       |
| Каучук натуральный                 | —           | 402      | 44 833        | 0,8                                     |
| Линолеум релин                     | 683         | 581      | —             | —                                       |
| Пенопласт ПВХ                      | 774         | 701      | —             | —                                       |
| Парафин                            | 503         | 431—468  | —             | —                                       |
| ДВП (древесноволокнистая<br>плита) | 618         | 495      | —             | —                                       |
| Пенополиуретан                     | 753         | 713      | 24 352        | 0,88—0,92                               |
| Сено ( $W = 7,8 \%$ )              | (477)       | 477      | —             | —                                       |
| Полистирол ПСБ-С                   | —           | —        | 38 967        | 0,86                                    |
| Полиэтилен низкого давления        | 694         | 583      | 47 137,5      | 0,62                                    |
| Стекло органическое                | 733         | 533      |               | 0,86                                    |
| Торф фрезерный                     | (498)       | —        | 10 454        | 0,18<br>(в караванах)                   |
| Хлопок ( $W = 4,5 \%$ )            | (478)       | 483      | 15 712,5      | 0,24<br>(разрыхл.)                      |

## Количество и состав продуктов горения

| Горючее вещество                            | Состав продуктов горения, м <sup>3</sup> /кг |                  |                | Кол-во продуктов горения |                    |                                |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|----------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                             | CO <sub>2</sub>                              | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | кг/кг                    | м <sup>3</sup> /кг | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| Акриловая кислота                           | 0,96                                         | 0,62             | 3,50           | 6,76                     | 5,08               | —                              |
| Амилацетат                                  | 1,20                                         | 1,20             | 6,16           | 11,03                    | 8,56               | —                              |
| Амиловый спирт                              | 1,27                                         | 1,53             | 7,20           | 12,72                    | 10,00              | —                              |
| Аммиак                                      | —                                            | 1,97             | 3,71           | 6,21                     | 5,68               | 4,32                           |
| Анилин                                      | 1,44                                         | 0,84             | 7,06           | 12,34                    | 9,34               | —                              |
| Ацетилен                                    | 1,73                                         | 0,86             | 8,11           | 14,20                    | 10,70              | 12,40                          |
| Ацетон                                      | 1,16                                         | 1,16             | 5,82           | 10,48                    | 8,14               | —                              |
| Бензин                                      | 1,58                                         | 1,67             | 9,10           | 5,83                     | 12,35              | —                              |
| Бензол                                      | 1,73                                         | 0,86             | 8,11           | 4,20                     | 10,70              | —                              |
| Битум                                       | 1,49                                         | 1,16             | 7,74           | 6,88                     | 10,39              | —                              |
| Бумага, хлопок, хлоп-<br>чатобумажные ткани | 0,83                                         | 0,69             | 3,12           | 6,17                     | 4,64               | —                              |
| Бутан                                       | 1,54                                         | 1,93             | 9,44           | 16,38                    | 12,91              | 33,44                          |
| Бутилацетат                                 | 1,16                                         | 1,16             | 5,82           | 10,48                    | 8,14               | —                              |
| Бутиловый спирт                             | 1,21                                         | 1,51             | 6,80           | 12,10                    | 9,52               | —                              |
| Водород                                     | —                                            | 11,20            | 21,00          | 34,97                    | 32,20              | 2,38                           |
| Гексан                                      | 1,56                                         | 1,82             | 9,33           | 16,18                    | 12,71              | 48,72                          |
| Глицерин                                    | 0,73                                         | 0,97             | 3,20           | 6,21                     | 4,90               | —                              |
| Дизельное топливо<br>(солярное масло)       | 1,60                                         | 1,50             | 8,85           | 15,41                    | 11,95              | —                              |
| Диэтиловый эфир                             | 1,21                                         | 1,51             | 6,83           | 12,54                    | 9,55               | —                              |
| Древесина<br>при W = 10 %                   | 0,84                                         | 0,74             | 3,28           | 6,35                     | 4,86               | —                              |
| Древесина<br>при W = 20 %                   | 0,74                                         | 0,75             | 2,93           | 5,73                     | 4,42               | —                              |
| Древесина<br>при W = 30 %                   | 0,65                                         | 0,78             | 2,56           | 5,10                     | 3,99               | —                              |
| Капролактан                                 | 1,20                                         | 7,10             | 6,24           | 11,50                    | 8,54               | —                              |
| Каучук натуральный                          | 1,50                                         | 1,35             | 7,91           | 13,79                    | 10,76              | —                              |
| Каучук синтетический                        | 1,61                                         | 1,18             | 8,03           | 14,16                    | 10,82              | —                              |
| Керосин                                     | 1,61                                         | 1,70             | 8,98           | 15,74                    | 12,29              | —                              |

Продолжение табл. 2

| Горючее вещество             | Состав продуктов горения, м <sup>3</sup> /кг |                  |                | Кол-во продуктов горения |                    |                                |
|------------------------------|----------------------------------------------|------------------|----------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------|
|                              | CO <sub>2</sub>                              | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | кг/кг                    | м <sup>3</sup> /кг | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| Кинопленка нитро-целлюлозная | 0,80                                         | 0,60             | 2,92           | 5,71                     | 4,43               | —                              |
| Кинопленка триацетатная      | 0,91                                         | 0,64             | 3,42           | 6,58                     | 4,97               | —                              |
| Мазут                        | 1,65                                         | 1,40             | 8,81           | 15,40                    | 11,86              | —                              |
| Метан                        | 1,40                                         | 2,80             | 10,52          | 18,15                    | 14,72              | 10,52                          |
| Метиловый спирт              | 0,70                                         | 1,42             | 3,94           | 7,40                     | 6,06               | 8,64                           |
| Нефть                        | 1,57                                         | 1,57             | 8,72           | 15,25                    | 11,86              | —                              |
| Пентан                       | 1,55                                         | 1,87             | 9,36           | 16,27                    | 12,78              | —                              |
| Полистирол                   | 1,72                                         | 0,86             | 8,10           | 14,15                    | 10,68              | —                              |
| Полипропилен                 | 1,60                                         | 1,60             | 9,02           | 15,74                    | 12,22              | —                              |
| Полиэтилен                   | 1,60                                         | 1,60             | 9,02           | 15,74                    | 12,22              | —                              |
| Пенополиуретан               | 1,06                                         | 0,79             | 4,69           | 8,58                     | 6,55               | —                              |
| Скипидар                     | 1,65                                         | 1,32             | 8,66           | 15,11                    | 11,63              | —                              |
| Стирол                       | 1,72                                         | 0,86             | 8,10           | 14,15                    | 10,68              | —                              |
| Толуол                       | 1,86                                         | 1,06             | 9,02           | 15,00                    | 11,94              | —                              |
| Торф при W = 10 %            | 0,98                                         | 0,67             | 4,01           | 7,41                     | 5,66               | —                              |
| Торф при W = 20 %            | 0,87                                         | 0,71             | 3,56           | 6,74                     | 5,14               | —                              |
| Торф при W = 30 %            | 0,76                                         | 0,74             | 3,12           | 5,99                     | 4,62               | —                              |
| Этиловый спирт               | 0,98                                         | 1,46             | 5,50           | 9,97                     | 7,94               | —                              |
| Этиленгликоль                | 0,72                                         | 1,08             | 3,25           | 6,35                     | 5,06               | —                              |

Таблица 3

## Теоретическое количество воздуха

| Горючее вещество       | Количество воздуха |                    |                                |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
|                        | кг/кг              | м <sup>3</sup> /кг | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| Акриловая кислота      | 5,74               | 4,44               | —                              |
| Акриловометиловый эфир | 7,72               | 5,58               | —                              |
| Амилцетат              | 10,10              | 7,80               | —                              |
| Амиловый спирт         | 11,76              | 9,10               | —                              |
| Аммиак                 | 6,10               | 4,70               | 3,57                           |

Продолжение табл. 3

| Горючее вещество                      | Количество воздуха |                    |                                |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
|                                       | кг/кг              | м <sup>3</sup> /кг | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| Анилин                                | 11,50              | 8,90               | —                              |
| Ацетилен                              | 13,27              | 10,25              | 11,90                          |
| Ацетон                                | 9,50               | 7,35               | —                              |
| Бензин                                | 15,00              | 11,60              | —                              |
| Бензол                                | 13,27              | 10,25              | —                              |
| Битум                                 | 13,19              | 9,45               | —                              |
| Бумага, хлопок, хлопчатобумажн. ткани | 5,10               | 3,95               | —                              |
| Бутан                                 | 15,45              | 11,94              | 30,94                          |
| Бутилацетат                           | 9,50               | 7,35               | —                              |
| Бутиловый спирт                       | 11,10              | 8,64               | —                              |
| Водород                               | 34,50              | 26,60              | 2,38                           |
| Гексан                                | 15,20              | 11,79              | 45,22                          |
| Глицерин                              | 5,24               | 4,06               | —                              |
| Дизельное топливо (солярное масло)    | 14,60              | 11,5               | —                              |
| Диэтиловый эфир                       | 11,08              | 8,65               | —                              |
| Древесина при $W = 10 \%$             | 5,43               | 4,20               | —                              |
| Древесина при $W = 20 \%$             | 4,84               | 3,74               | —                              |
| Древесина при $W = 30 \%$             | 4,58               | 3,54               | —                              |
| Капролактан                           | 10,00              | 7,76               | —                              |
| Каучук натуральный                    | 12,93              | 10,00              | —                              |
| Каучук синтетический                  | 13,15              | 10,16              | —                              |
| Керосин                               | 14,70              | 11,36              | —                              |
| Кинопленка нитроцеллюлозная           | 4,68               | 3,62               | —                              |
| Кинопленка триацетатная               | 6,05               | 4,34               | —                              |
| Мазут                                 | 14,60              | 11,30              | —                              |
| Метан                                 | 17,20              | 13,32              | 9,52                           |
| Метиловый спирт                       | 6,47               | 4,99               | 7,14                           |
| Нефть                                 | 14,60              | 11,80              | —                              |
| Пентан                                | 15,30              | 11,85              | —                              |

Окончание табл. 3

| Горючее вещество     | Количество воздуха |                    |                                |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
|                      | кг/кг              | м <sup>3</sup> /кг | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> |
| Полистирол           | 14,30              | 10,25              | —                              |
| Полипропилен         | 15,90              | 11,42              | —                              |
| Полиэтилен           | 15,90              | 11,42              | —                              |
| Пенополиуретан       | 7,77               | 6,00               | —                              |
| Скипидар             | 14,20              | 10,96              | —                              |
| Стирол               | 15,30              | 11,85              | —                              |
| Толуол               | 13,50              | 10,46              | —                              |
| Торф при $W = 10 \%$ | 6,60               | 6,01               | —                              |
| Торф при $W = 20 \%$ | 5,86               | 4,54               | —                              |
| Торф при $W = 30 \%$ | 5,14               | 3,96               | —                              |
| Этиловый спирт       | 9,00               | 6,95               | —                              |
| Этиленгликоль        | 5,37               | 4,16               | —                              |

Таблица 4

## Атомный вес некоторых элементов

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

Таблица 5

## Теплота горения некоторых веществ

| Горючее вещество<br>или материал               | Низшая теплота<br>горения $Q_H^p$ ,<br>кДж/кг | Горючее вещество<br>или материал | Низшая теплота<br>горения $Q_H^p$ ,<br>кДж/кг |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| Амилацетат                                     | 33 533,5                                      | Каучук натуральный               | 44 833,0                                      |
| Амиловый спирт                                 | 39 046,6                                      | Каучук синтетический             | 45 252,0                                      |
| Анилин                                         | 34 777,0                                      | Керосин                          | 43 157,01                                     |
| Ацетилен                                       | 56 000,0                                      | Киноплёнка нитроцеллю-<br>лозная | 15 084,0                                      |
| Ацетон                                         | 30 969,0                                      |                                  |                                               |
| Бензин                                         | 43 576,0                                      | Киноплёнка<br>триацетатная       | 18 779,6                                      |
| Бензол                                         | 40 807,0                                      | Мазут                            | 41 900,0                                      |
| Битум                                          |                                               | Масло соляровое                  | 43 069,0                                      |
|                                                |                                               | Метан                            | 35 800,0                                      |
| Бумага, хлопок,<br>хлопчатобумаж-<br>ные ткани | 13 408,0                                      | Нефть                            | 46 090,0                                      |
| Бутан                                          | 45 800                                        | Полистирол                       | 38 967,0                                      |
| Бутиловый спирт                                | 36 144,9                                      | Полиэтилен                       | 47 137,5                                      |
| Древесина при<br>влажности, %                  |                                               | Пенополиуретан                   | 243 012,0                                     |
| $W = 10$                                       | 16 500,0                                      | Резина                           | 335 120,0                                     |
| $W = 20$                                       | 14 400,0                                      | Толуол                           | 42 355,4                                      |
| $W = 30$                                       | 12 200,0                                      | Торф влажностью $W = 19 \%$      | 16 613,3                                      |
| Линолеум                                       | 33 520                                        | Хлопок                           | 15 700,0                                      |

Таблица 6

## Теплота образования и горения некоторых веществ

| Вещество         | Теплота образования,<br>кДж/моль | Теплота горения,<br>кДж/моль |
|------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Альдегид         |                                  |                              |
| муравьиный (ж)   | 121,1                            | 561,5                        |
| уксусный (ж)     | 166,3                            | 1173,2                       |
| Аммиак (газ)     | 46,1                             | 384,2                        |
| Анилин (ж)       | 29,7                             | 3484,0                       |
| Антрацен (тв)    | –101,4                           | 7102,0                       |
| Ацетилен (газ)   | –224,6                           | 1307,3                       |
| Ацетон (ж)       | 248,1                            | 1789,0                       |
| Бензол (ж)       | –34,8                            | 3282,4                       |
| Бутадиен-1,3 (ж) | –104,3                           | 2547,9                       |
| н-Бутан (газ)    | 132,4                            | 2882,3                       |
| н-Бутан (ж)      | 153,8                            | 2863,0                       |
| Бутен-1 (газ)    | 6,3                              | 2723,9                       |
| Винилхлорид (ж)  | –37,7                            | 1259,9                       |
| Винилхлорид (ж)  | –17,2                            | 1239,4                       |
| Вода (ж)         | 286,6                            | —                            |
| Вода (газ)       | 242,2                            | —                            |
| н-Гексан (ж)     | 167,2                            | 4150,6                       |
| н-Гептан (ж)     | 239,7                            | 4814,3                       |
| Глицерин (ж)     | 675,4                            | 1658,8                       |
| Двуокись         |                                  |                              |
| серы (газ)       | 297,5                            | —                            |
| углерода (газ)   | 396,6                            | —                            |
| Диоксан (ж)      | 375,4                            | 2354,8                       |
| Дифенил (тв)     | –80,4                            | 6258,2                       |
| Изобутан (ж)     | 159,2                            | 2857,6                       |
| Кислота          |                                  |                              |
| бензойная (тв)   | 394,3                            | 3233,8                       |
| масляная (ж)     | 525,0                            | 2178,8                       |
| муравьиная (ж)   | 419,0                            | 263,1                        |
| олеиновая (тв)   | 625,1                            | 11183,1                      |
| пропионовая (ж)  | 458,4                            | 1589,3                       |
| стеариновая (тв) | 937,7                            | 11304,6                      |
| уксусная (ж)     | 485,6                            | 942,7                        |

| Вещество              | Теплота образования,<br>кДж/моль | Теплота горения,<br>кДж/моль |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Метан (газ)           | 75,0                             | 891,5                        |
| Мочевина (тв)         | —                                | 636,9                        |
| Нафталин (тв)         | –62,8                            | 5161,2                       |
| Нитроэтан (ж)         | 144,1                            | 1364,3                       |
| Оксись углерода (газ) | 112,7                            | 283,2                        |
| н-Пентан (ж)          | 184,4                            | 3515,0                       |
| Пропан (газ)          | 109,4                            | 2223,2                       |
| Пропан (ж)            | 125,3                            | 2209,0                       |
| Сероводород (газ)     | 201,1                            | 338,5                        |
| Сероуглерод (ж)       | –88,0                            | 979,6                        |
| Спирт                 |                                  |                              |
| н-амиловый (ж)        | 359,1                            | 3297,5                       |
| н-бутиловый (ж)       | 341,5                            | 2677,4                       |
| н-гексиловый (ж)      | 385,1                            | 3996,8                       |
| метиловый (ж)         | 239,0                            | 726,6                        |
| пропиловый (ж)        | 307,1                            | 2019,6                       |
| этиловый (ж)          | 278,2                            | 1374,3                       |
| Тиофен (ж)            | –81,7                            | 2536,2                       |
| Тетралин (тв)         | 81,7                             | 5597,4                       |
| Толуол (ж)            | 4,19                             | 3921,8                       |
| Фенол (тв)            | 171,4                            | 3067,1                       |
| Этан (газ)            | 88,4                             | 1562,0                       |
| Этилбензол (ж)        | 33,1                             | 4567,5                       |
| Этилен (газ)          | –48,6                            | 1391,1                       |
| Этиленгликоль (ж)     | 455,4                            | 1152,2                       |
| Эфир                  |                                  |                              |
| диметиловый (ж)       | 207,8                            | 1443,9                       |
| диэтиловый (ж)        | 283,2                            | 2730,6                       |
| уксусноамиловый (ж)   | 594,7                            | 4189,8                       |
| уксуснобутиловый (ж)  | 542,2                            | 3551,4                       |
| уксуснометиловый (ж)  | 411,9                            | 1635,8                       |
| уксусноэтиловый (ж)   | 480,2                            | 2256,3                       |

Таблица 7

## Значение констант уравнения Антуана

| Вещество          | Химическая формула                            | M       | Константы уравнения Антуана |                     |                    |                                     |      |
|-------------------|-----------------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------|------|
|                   |                                               |         | A                           | B                   | C                  | D <sub>0</sub> , см <sup>2</sup> /с | n    |
| 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            | 0,19                                | 1,90 |
| Бензол            | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                 | 78,113  | 6,48898<br>6,98426          | 902,275<br>1252,776 | 178,099<br>225,178 | 0,0775                              | 1,86 |
| Бутадиен 1,3      | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>                 | 54,091  | —                           | —                   | —                  | 0,0806                              | 1,82 |
| н-Бутан           | 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 |

Продолжение табл. 7

| Вещество           | Химическая формула                | M       | Константы уравнения Антуана |          |         |                             |      |
|--------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------------|----------|---------|-----------------------------|------|
|                    |                                   |         | A                           | B        | C       | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | n    |
| н-Гексан           | $\text{C}_6\text{H}_{14}$         | 86,177  | 6,87024                     | 1166,274 | 223,661 | 0,0663                      | 1,55 |
| н-Гексиловый спирт | $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$ | 102,176 | 7,27800                     | 1420,273 | 165,469 | 0,0588                      | 1,87 |
| н-Гептан           | $\text{C}_7\text{H}_{16}$         | 100,203 | 6,95154                     | 1295,405 | 219,819 | 0,0609                      | 1,54 |
| Гидразин           | $\text{N}_2\text{H}_4$            | 32,045  | 8,87325                     | 2266,447 | 266,316 | 0,167                       | 1,86 |
| Глицерин           | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$  | 92,094  | 9,05297                     | 3074,220 | 214,712 | 0,08                        | 1,9  |
| н-Декан            | $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$      | 142,284 | 7,39530                     | 1809,975 | 227,700 | 0,0502                      | 1,45 |
| Дивиниловый эфир   | $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$    | 70,091  | 6,98810                     | 1055,259 | 228,589 | 0,0765                      | 1,84 |
| Диметиловый эфир   | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$    | 46,069  | —                           | —        | —       | 0,108                       | 1,85 |
| Диметилформамид    | $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$   | 73,094  | 7,03446                     | 1482,985 | 204,342 | 0,0898                      | 1,87 |
| Диоксан-1,4        | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 88,106  | 7,51611                     | 1632,425 | 250,725 | 0,0758                      | 1,85 |
| Дифтордихлорметан  | $\text{CF}_2\text{Cl}_2$          | 120,914 | —                           | —        | —       | 0,0806                      | 1,81 |
| 1,2-Дихлорэтан     | $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ | 98,960  | 7,66135                     | 1640,179 | 259,715 | 0,845                       | 1,86 |
| Диэтиламин         | $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$ | 73,138  | 7,22314                     | 1267,557 | 236,329 | 0,0756                      | 1,85 |
| Диэтиловый эфир    | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ | 74,122  | 6,99790                     | 1098,945 | 232,372 | 0,0772                      | 2,14 |
| н-Додекан          | $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$      | 170,337 | 8,17081                     | 2463,739 | 253,884 | 0,0399                      | 1,88 |
| Изобутан           | $\text{C}_4\text{H}_{10}$         | 58,123  | —                           | —        | —       | 0,0819                      | 1,87 |
| Изобутелен         | $\text{C}_4\text{H}_8$            | 56,11   | —                           | —        | —       | 0,0801                      | 1,82 |
| Изобутиловый спирт | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ | 74,122  | 8,70512                     | 2058,392 | 245,642 | 0,0756                      | 1,87 |
| Изопентан          | $\text{C}_5\text{H}_{12}$         | 72,150  | 6,79306                     | 1022,551 | 233,493 | 0,0700                      | 1,76 |

| Вещество            | Химическая формула             | M       | Константы уравнения Антуана |                      |                    |                             |      |
|---------------------|--------------------------------|---------|-----------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|------|
|                     |                                |         | A                           | B                    | C                  | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | n    |
| Изопропилбензол     | $\text{C}_9\text{H}_{12}$      | 120,194 | 6,93773                     | 1460,668             | 207,652            | 0,0615                      | 1,87 |
| Изопропиловый спирт | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ | 60,096  | 8,38,562                    | 1733,000             | 232,380            | 0,831                       | 1,92 |
| м-Ксилол            | $\text{C}_8\text{H}_{10}$      | 106,167 | 7,00849                     | 1461,925             | 215,073            | 0,0671                      | 1,87 |
| о-Ксилол            | $\text{C}_8\text{H}_{10}$      | 106,167 | 6,99891                     | 1474,679             | 213,686            | 0,0671                      | 1,88 |
| п-Ксилол            | $\text{C}_8\text{H}_{10}$      | 106,167 | 6,99184                     | 1454,328             | 215,411            | 0,0671                      | 1,87 |
| Метан               | $\text{CH}_4$                  | 16,0426 | —                           | —                    | —                  | 0,196                       | 1,76 |
| Метиловый спирт     | $\text{CH}_4\text{O}$          | 32,042  | 8,22777                     | 1660,454             | 245,818            | 0,129                       | 2,08 |
| Метилэтилкетон      | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ | 72,107  | 7,02453                     | 1292,791             | 232,340            | 0,0760                      | 1,86 |
| Нафталин            | $\text{C}_{10}\text{H}_8$      | 128,173 | 10,55455<br>7,67291         | 3123,337<br>2206,690 | 243,569<br>245,127 | 0,0622                      | 1,89 |
| н-Нонан             | $\text{C}_9\text{H}_{20}$      | 128,257 | 7,05283                     | 1510,695             | 211,502            | 0,0499                      | 1,57 |
| Окись углерода      | CO                             | 28,0104 | —                           | —                    | —                  | 0,149                       | 1,72 |
| Окись этилена       | $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ | 44,0530 | —                           | —                    | —                  | 0,110                       | 1,83 |
| н-Октан             | $\text{C}_8\text{H}_{18}$      | 114,230 | 6,96903                     | 1379,556             | 211,896            | 0,0503                      | 1,77 |
| н-Гептадекан        | $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$   | 212,418 | 6,94237                     | 1739,084             | 157,545            | 0,0358                      | 1,90 |
| н-Пентан            | $\text{C}_5\text{H}_{12}$      | 72,150  | 6,84715                     | 1062,555             | 231,805            | 0,0729                      | 1,83 |
| *-Пиколин           | $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$ | 93,128  | 7,30064                     | 1632,315             | 224,787            | 0,0754                      | 1,88 |
| *Пиродин            | $\text{C}_4\text{H}_5\text{N}$ | 79,101  | 6,78610                     | 1217,730             | 196,342            | 0,0828                      | 1,87 |
| Пропан              | $\text{C}_3\text{H}_8$         | 44,096  | —                           | —                    | —                  | 0,0977                      | 1,80 |

| Вещество             | Химическая формула               | M       | Константы уравнения Антуана |          |         |                             |      |
|----------------------|----------------------------------|---------|-----------------------------|----------|---------|-----------------------------|------|
|                      |                                  |         | A                           | B        | C       | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | n    |
| Пропилен             | $\text{C}_3\text{H}_6$           | 42,080  | —                           | —        | —       | 0,0962                      | 1,82 |
| н-Пропиловый спирт   | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$   | 60,096  | 8,31708                     | 1751,981 | 225,125 | 0,085                       | 1,88 |
| Сероводород          | $\text{H}_2\text{S}$             | 34,076  | —                           | —        | —       | 0,141                       | 1,82 |
| Сероуглерод          | $\text{CS}_2$                    | 76,131  | 7,00048                     | 1202,471 | 245,616 | 0,0890                      | 1,69 |
| Стирол               | $\text{C}_8\text{H}_8$           | 104,161 | 7,94049                     | 2113,057 | 272,986 | 0,0674                      | 1,88 |
| Тетрагидрофуран      | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$   | 72,107  | 5,99964                     | 753,805  | 175,793 | 0,0588                      | 1,84 |
| н-Тетрадекан         | $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$     | 198,391 | 7,27514                     | 1950,497 | 190,513 | 0,0370                      | 1,89 |
| Толуол               | $\text{C}_7\text{H}_8$           | 92,140  | 6,95508                     | 1345,087 | 219,516 | 0,0753                      | 1,65 |
| н-Тридекан           | $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$     | 184,364 | 7,96895                     | 2468,910 | 250,310 | 0,0384                      | 1,89 |
| 2.2.4-Триметилпентан | $\text{C}_8\text{H}_{18}$        | 114,230 | 6,81171                     | 1259,150 | 221,085 | 0,0427                      | 1,86 |
| Уксусная кислота     | $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ | 60,052  | —                           | —        | —       | —                           | 2    |
| н-Ундекан            | $\text{C}_{11}\text{H}_{24}$     | 153,311 | 7,68008                     | 2102,959 | 242,574 | 0,0417                      | 1,88 |
| Формальдегид         | $\text{CH}_2\text{O}$            | 30,026  | 6,28480                     | 607,399  | 197,626 | 0,146                       | 1,81 |
| Фталевый ангидрид    | $\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3$ | 148,118 | 7,99959                     | 2879,067 | 277,501 | 0,0616                      | 1,87 |
| Фтортрихлорметан     | $\text{CCl}_3\text{F}$           | 137,368 | —                           | —        | —       | 0,0603                      | 1,83 |
| Хлорбензол           | $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$  | 112,558 | 7,26112                     | 1607,316 | 235,351 | 0,0628                      | 2,09 |
| Хлорэтан             | $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$  | 64,514  | 6,82723                     | 954,119  | 229,554 | 0,0981                      | 1,82 |
| Циклогексан          | $\text{C}_6\text{H}_{12}$        | 84,161  | 6,64788                     | 1095,531 | 210,064 | 0,0648                      | 1,89 |
| Этан                 | $\text{C}_2\text{H}_6$           | 30,069  | —                           | —        | —       | 0,121                       | 1,78 |

| Вещество                                    | Химическая формула                  | M       | Константы уравнения Антуана |          |         |                             |      |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|---------|-----------------------------|----------|---------|-----------------------------|------|
|                                             |                                     |         | A                           | B        | C       | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | n    |
| Этилацетат                                  | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$    | 88,106  | 6,992409                    | 1200,297 | 214,262 | 0,0733                      | 1,89 |
| Этилбензол                                  | $\text{C}_8\text{H}_{10}$           | 106,167 | 6,95904                     | 1425,464 | 213,345 | 0,0671                      | 1,87 |
| Этилен                                      | $\text{C}_2\text{H}_4$              | 28,054  | —                           | —        | —       | 0,109                       | 1,80 |
| Этиленгликоль                               | $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$    | 62,068  | 9,01261                     | 2753,183 | 252,009 | 0,099                       | 1,87 |
| Этиловый спирт                              | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$      | 76,069  | 8,68665                     | 1918,508 | 252,125 | 0,110                       | 1,51 |
| Этилцеллозольв                              | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$ | 90,122  | 8,74133                     | 2392,56  | 273,15  | 0,0721                      | 1,86 |
| Бензин АИ-72 (зимний) ГОСТ 2084—67          | $\text{C}_{6,991}\text{H}_{13,108}$ | 97,2    | 5,07020                     | 682,876  | 222,066 | -60/85                      | 2    |
| Бензин АИ-93 (летний) ГОСТ 2084—67          | $\text{C}_{7,024}\text{H}_{13,706}$ | 98,2    | 4,99831                     | 664,976  | 221,695 | -60/95                      | 2    |
| Бензин АИ-93 (зимний) ГОСТ 2084—67          | $\text{C}_{6,911}\text{H}_{12,168}$ | 95,3    | 5,14031                     | 695,019  | 223,220 | -60/90                      | 2    |
| Бензин авиационный Б-70 ГОСТ 1012—72        | $\text{C}_{7,267}\text{H}_{14,796}$ | 102,2   | 8,41944                     | 2629,65  | 384,195 | -40/110                     | 2    |
| Дизельное топливо «З» ГОСТ 305—73           | $\text{C}_{12,343}\text{H}_{23,88}$ | 172,3   | 5,95338                     | 1255,73  | 199,523 | 40/210                      | 2    |
| Дизельное топливо «Л» ГОСТ 305—73           | $\text{C}_{14,511}\text{H}_{29,12}$ | 203,6   | 5,87629                     | 1314,04  | 192,473 | 60/240                      | 2    |
| Керосин осветительный КО-20<br>ГОСТ 4753—68 | $\text{C}_{13,595}\text{H}_{26,86}$ | 191,7   | 5,69697                     | 1211,73  | 194,677 | 40/240                      | 2    |
| Керосин осветительный КО-22<br>ГОСТ 4753—68 | $\text{C}_{10,914}\text{H}_{21,83}$ | 153,1   | 6,47119                     | 1394,72  | 204,260 | 40/190                      | 2    |
| Керосин осветительный КО-25<br>ГОСТ 4753—68 | $\text{C}_{11,054}\text{H}_{21,75}$ | 154,7   | 6,00016                     | 1223,85  | 203,341 | 40/90                       | 2    |
| Ксилол (смесь изомеров) ГОСТ 9410—71        | $\text{C}_{7,99}\text{H}_{9,98}$    | 106,0   | 7,05479                     | 1478,16  | 220,535 | 0/50                        | 2    |

| Вещество                                                                                                                                                    | Химическая формула                                                | M     | Константы уравнения Антуана |          |          |                             |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------|----------|----------|-----------------------------|---|
|                                                                                                                                                             |                                                                   |       | A                           | B        | C        | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | n |
| Уайт-спирит ГОСТ 3134—52*                                                                                                                                   | $\text{C}_{10.5}\text{H}_{21.0}$                                  | 147,3 | 8,01130                     | 2218,3   | 273,15   | 20/80                       |   |
| Масло трансформаторное ГОСТ 10121—76                                                                                                                        | $\text{C}_{21.74}\text{H}_{42.28}\text{S}$                        | 303,9 | 7,75932                     | 2524,17  | 174,010  | 164/343                     | 2 |
| Масло АМТ-300 ТУ 38-1Г-1—68                                                                                                                                 | $\text{C}_{21.74}\text{H}_{42.28}\text{S}_{0.04}$                 | 312,9 | 6,99959                     | 2240,001 | 167,85   | 170/376                     | 2 |
| Масло АМТ-300Т ТУ 38 101242—72                                                                                                                              | $\text{C}_{19.04}\text{H}_{24.58}\text{S}_{0.196}\text{N}_{0.07}$ | 260,3 | 6,49540                     | 2023,77  | 2023,77  | 171/396                     | 2 |
| Растворитель М (н-бутилацетат-30; этилацетат-5; этиловый спирт-60; изобутиловый спирт-5)                                                                    | $\text{C}_{2.761}\text{H}_{7.147}\text{O}_{1.187}$                | 59,4  | 8,93202                     | 2083,566 | 2083,566 | 0/50                        | 2 |
| Растворитель Р-4 (ксилол-15; толуол-70; ацетон-15)                                                                                                          | $\text{C}_{6.231}\text{H}_{7.798}\text{O}_{0.223}$                | 86,3  | 7,15273                     | 1415,199 | 1415,199 | -15/100                     | 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) | $\text{C}_{4.791}\text{H}_{8.318}\text{O}_{0.971}$                | 81,5  | 8,07751                     | 1761,043 | 1761,043 | 0/50                        | 2 |
| Растворитель РМЛ ТУКУ 467—56 (тулуол-10; этиловый спирт-64; н-бутиловый спирт-10; этилцеллозольв-16)                                                        | $\text{C}_{2.645}\text{H}_{5.910}\text{O}_{1.038}$                | 55,2  | 9,57161                     | 2487,728 | 2487,728 | 0/50                        | 2 |
| Растворитель РМЛ-215 ТУ 6-10-1013—70 (н-бутилацетат-18; ксилол-25; толуол-25; этиловый спирт-16; н-бутиловый спирт-15; этилцеллозольв-17)                   | $\text{C}_{5.962}\text{H}_{9.779}\text{O}_{0.845}$                | 95,0  | 7,71160                     | 1699,687 | 1699,687 | 0/50                        | 2 |
| Растворитель Р-4 (н-бутилацетат-12; толуол-62; ацетон-26)                                                                                                   | $\text{C}_{5.452}\text{H}_{7.606}\text{O}_{0.535}$                | 81,7  | 7,17192                     | 1373,667 | 1373,667 | -15/100                     | 2 |

## Концентрационные пределы воспламенения

| Вещество             | Пределы воспламенения, % об. |         |
|----------------------|------------------------------|---------|
|                      | нижний                       | верхний |
| Метан                | 5,00                         | 15,00   |
| Этан                 | 3,22                         | 12,45   |
| Пропан               | 2,10                         | 9,50    |
| Бутан                | 1,80                         | 8,41    |
| изо-Бутан            | 1,86                         | 8,44    |
| изо-Пентан           | 1,32                         | —       |
| Гексан               | 1,25                         | 6,90    |
| Гептан               | 1,00                         | 6,00    |
| Октан                | 0,95                         | —       |
| Нонан                | 0,83                         | —       |
| Декан                | 0,67                         | —       |
| Этилен               | 2,75                         | 28,60   |
| Пропилен             | 2,00                         | 11,10   |
| Бутилен              | 1,70                         | 9,00    |
| Амилен               | 1,60                         | —       |
| Ацетилен             | 2,50                         | 80,00   |
| Бензол               | 1,41                         | 6,75    |
| Толуол               | 1,27                         | 6,75    |
| о-Ксилол             | 1,00                         | 6,00    |
| Циклопропан          | 2,40                         | 10,40   |
| Циклогексан          | 1,33                         | 8,35    |
| Метилциклогексан     | 1,15                         | —       |
| Метиловый спирт      | 6,72                         | 36,50   |
| Этиловый спирт       | 3,28                         | 18,95   |
| Пропиловый спирт     | 2,55                         | —       |
| изо-Пропиловый спирт | 2,65                         | —       |
| Бутиловый спирт      | 1,70                         | —       |
| изо-Бутиловый спирт  | 1,68                         | —       |
| Амиловый спирт       | 1,19                         | —       |
| изо-Амиловый спирт   | 1,20                         | —       |
| Ацетальдегид         | 3,97                         | —       |

| Вещество         | Пределы воспламенения, % об. |         |
|------------------|------------------------------|---------|
|                  | нижний                       | верхний |
| Метиловый эфир   | 2,00                         | 10,10   |
| Этиловый эфир    | 1,85                         | 36,50   |
| Виниловый эфир   | 1,70                         | 27,00   |
| Ацетон           | 2,55                         | 12,80   |
| Метилэтилкетон   | 1,81                         | 9,50    |
| Метилбутилкетон  | 1,55                         | 8,15    |
| Метилформиат     | 5,05                         | 22,70   |
| Этилформиат      | 2,75                         | 16,40   |
| Метилацетат      | 3,15                         | 15,60   |
| Этилацетат       | 2,18                         | 11,40   |
| Пропилацетат     | 2,05                         | —       |
| Изо-Пропилацетат | 2,70                         | —       |
| Бутилацетат      | 1,70                         | —       |
| Амилацетат       | 1,10                         | —       |
| Водород          | 4,00                         | 74,20   |
| Оксид углерода   | 12,50                        | 74,20   |
| Аммиак           | 15,50                        | 27,00   |
| Оксид этилена    | 3,00                         | 80,00   |
| Оксид пропилена  | 2,00                         | 22,00   |
| Диоксан          | 1,97                         | 22,25   |
| Диэтилпероксид   | 2,34                         | —       |
| Сероуглерод      | 1,25                         | 50,00   |
| Сероводород      | 4,30                         | 45,50   |
| Хлористый метил  | 8,25                         | 18,70   |
| Хлористый винил  | 4,00                         | 21,70   |
| Хлористый этил   | 4,00                         | 14,80   |
| Хлористый амил   | 1,40                         | —       |
| Ацетилендихлорид | 9,70                         | 12,80   |
| Этилендихлорид   | 6,20                         | 15,90   |
| Бромистый метил  | 13,50                        | 14,50   |
| Бромистый этил   | 6,75                         | 11,25   |

Таблица 9

## Показатели пожарной опасности некоторых газов

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

Таблица 10

## Показатели пожарной опасности некоторых жидкостей

| Жидкость          | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Температура самовоспламенения, 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     | —                                         | —       |

| Жидкость                      | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Темпера-<br>тура само-<br>воспламе-<br>нения, К | Температурные<br>пределы воспламе-<br>нения, К |         | Концентрационные<br>пределы воспламе-<br>нения, % |           |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------|-----------|
|                               |                                 |                                                 | нижний<br>(темпера-<br>тура<br>вспышки)        | верхний | нижний                                            | верхний   |
| Кислота уксусная<br>(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       |
| Толуол                        | 866                             | 809                                             | 273                                            | 303     | 1,3                                               | 6,7       |
| Этиленгликоль                 | 1114                            | 653                                             | 385                                            | 397     | 3,8                                               | 6,35      |
| Эфир диэтиловый               | 713                             | 437                                             | 228                                            | 386     | 1,7                                               | 49        |
| Эфир уксусно-<br>изоамиловый  | 870                             | 703                                             | 276                                            | 330     | 0,2                                               | 4,35      |
| Бензин                        | 722—806                         | 528—765                                         | 228—239                                        | 249—269 | 0,76—0,79                                         | 5,16—8,12 |
| Нефть<br>(бибизбатская)       | 730—1040                        | 533                                             | 296                                            | 323     | 1,4                                               | —         |
| Нефть карагад-<br>ская        | 730—1040                        | 593                                             | 252                                            | 292     | 1,3                                               | —         |
| Уайт-спирит                   | 760—790                         | 523                                             | 306                                            | 341     | 0,7                                               | 5,6       |
| Скипидар                      |                                 | 573                                             | 578                                            | 599     | 0,8                                               | —         |
| Керосин трак-<br>торный       |                                 | 523                                             | 589                                            | 632     | 1,4                                               | 7,8       |

Таблица 11

Величина параметров  $r$  и  $l$  для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей

| Гомологический ряд       | Формула<br>$n = 1, 2, 3, 4, \dots$                     | 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 | $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$                | $\frac{0,5476}{0,6928}$ | $\frac{33,7}{15,0}$ |
| 2-Метилкарбинолы         | $(\text{CH}_3)_2\text{CH}-(\text{CH}_2)_n-\text{OH}$   | $\frac{0,6582}{0,7278}$ | $\frac{44,1}{21,5}$ |
| н-Алкилформиаты          | $\text{HCOO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$              | $\frac{0,5359}{0,6050}$ | $\frac{47,6}{25,0}$ |
| н-Алкилацетаты           | $\text{CH}_3\text{COO}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$    | $\frac{0,5940}{0,7761}$ | $\frac{50,9}{40,8}$ |

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

Таблица 12

Физические параметры сухого воздуха  
при атмосферном давлении ( $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ )

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{ кг/м}^3$ | $C_p, \text{ кДж} \cdot \text{ кг}^{-1} \cdot \text{ К}^{-1}$ | $\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-1} \cdot \text{ К}^{-1}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{ Па} \cdot \text{ с}$ |
|---------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| -40                 | 1,515                  | 1,013                                                         | 2,12                                                                       | 15,21                                        |
| -20                 | 1,329                  | 1,009                                                         | 2,28                                                                       | 16,91                                        |
| 0                   | 1,295                  | 1,005                                                         | 2,44                                                                       | 17,17                                        |
| 20                  | 1,205                  | 1,005                                                         | 2,59                                                                       | 18,15                                        |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $C_p, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\lambda \cdot 10^2, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$ |
|---------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 40                  | 1,128                 | 1,005                                                | 2,76                                                              | 19,13                                      |
| 60                  | 1,060                 | 1,005                                                | 2,90                                                              | 20,11                                      |
| 80                  | 1,000                 | 1,009                                                | 3,05                                                              | 21,09                                      |
| 100                 | 0,946                 | 1,009                                                | 3,21                                                              | 21,88                                      |
| 120                 | 0,898                 | 1,009                                                | 3,24                                                              | 22,86                                      |
| 140                 | 0,854                 | 1,013                                                | 3,49                                                              | 23,74                                      |
| 160                 | 0,815                 | 1,017                                                | 3,64                                                              | 24,52                                      |
| 180                 | 0,779                 | 1,022                                                | 3,78                                                              | 25,31                                      |
| 200                 | 0,776                 | 1,026                                                | 3,94                                                              | 26,00                                      |
| 250                 | 0,674                 | 1,038                                                | 4,27                                                              | 27,37                                      |
| 300                 | 0,615                 | 1,047                                                | 4,61                                                              | 29,72                                      |
| 350                 | 0,566                 | 1,059                                                | 4,91                                                              | 31,39                                      |
| 400                 | 0,524                 | 1,068                                                | 5,21                                                              | 33,06                                      |
| 500                 | 0,456                 | 1,093                                                | 5,74                                                              | 36,20                                      |
| 600                 | 0,404                 | 1,114                                                | 6,22                                                              | 39,14                                      |
| 700                 | 0,362                 | 1,135                                                | 6,71                                                              | 41,79                                      |
| 800                 | 0,329                 | 1,156                                                | 7,18                                                              | 44,34                                      |
| 900                 | 0,301                 | 1,172                                                | 7,63                                                              | 46,05                                      |
| 1000                | 0,277                 | 1,185                                                | 8,07                                                              | 51,21                                      |

Таблица 13

## Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

| $t, ^\circ\text{C}$ | Теплосодержание, кДж/кмоль |                |           |                 |                  |                 |
|---------------------|----------------------------|----------------|-----------|-----------------|------------------|-----------------|
|                     | 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               |
| 100                 | 2956,0                     | 2917,5         | 2917,5    | 3814,1          | 1281,7           | 4081,1          |
| 200                 | 5991,7                     | 5849,3         | 5866,0    | 8019,6          | 6829,7           | 8505,7          |
| 300                 | 9125,8                     | 8819,9         | 8861,8    | 12 536,5        | 10 378,6         | 13 223,6        |
| 400                 | 12 360,5                   | 11 849,3       | 11 924,7  | 17 313,1        | 14 044,9         | 18 167,8        |
| 500                 | 15 678,9                   | 14 945,7       | 15 058,8  | 22 303,4        | 17 828,4         | 23 275,4        |
| 600                 | 19 072,9                   | 18 104,9       | 18 255,8  | 27 473,8        | 21 733,5         | 28 533,9        |
| 700                 | 22 521,2                   | 21 331,3       | 21 524,0  | 32 795,1        | 25 772,7         | 33 876,1        |
| 800                 | 26 019,9                   | 24 616,2       | 24 842,5  | 38 237,9        | 29 937,5         | 39 285,5        |
| 900                 | 29 564,6                   | 27 955,7       | 28 211,3  | 43 785,5        | 34 232,3         | 44 799,5        |
| 1000                | 33 142,9                   | 31 337,0       | 31 621,9  | 49 442,0        | 38 648,5         | 50 321,9        |
| 1100                | 36 750,5                   | 34 760,2       | 35 074,5  | 55 440,4        | 43 198,9         | 55 907,2        |
| 1200                | 40 391,6                   | 38 221,2       | 38 560,6  | 60 922,6        | 47 807,9         | 61 492,4        |
| 1300                | 44 036,9                   | 41 719,8       | 42 067,6  | 66 788,6        | 52 584,5         | 67 161,5        |
| 1400                | 47 724,1                   | 45 252,0       | 45 629,1  | 72 654,6        | 57 403,0         | 72 797,1        |
| 1500                | 51 453,2                   | 48 771,6       | 49 190,6  | 78 562,5        | 62 347,2         | 78 436,8        |
| 1600                | 55 182,3                   | 52 375,0       | 52 794,0  | 84 554,2        | 67 333,3         | 84 135,2        |
| 1700                | 58 953,3                   | 55 936,5       | 56 397,4  | 90 545,9        | 72 445,1         | 89 821,0        |
| 1800                | 62 766,2                   | 59 539,9       | 60 000,8  | 96 579,5        | 77 598,8         | 95 557,1        |
| 1900                | 66 579,1                   | 63 143,3       | 63 646,1  | 102 613,1       | 82 794,4         | 101 184,3       |
| 2000                | 70 392,0                   | 66 788,6       | 67 333,3  | 108 646,7       | 88 073,8         | 107 012,6       |
| 2100                | 74 246,8                   | 70 433,9       | 71 0120,5 | 114 722,2       | 93 395,1         | 112 715,2       |
| 2200                | 78 101,6                   | 74 131,1       | 74 707,7  | 120 839,6       | 98 758,3         | 118 451,3       |
| 2300                | 81 998,3                   | 77 766,4       | 78 394,9  | 126 915,1       | 104 163,4        | 124 220,9       |
| 2400                | 85 936,9                   | 81 453,6       | 82 124,0  | 133 032,5       | 109 631,3        | 130 024,1       |
| 2500                | 89 875,5                   | 85 140,8       | 85 853,1  | 139 149,9       | 115 141,1        | 135 756,0       |
| 2600                | 94 015,2                   | 89 003,9       | 89 330,8  | 145 325,9       | 119 398,2        | 141 513,0       |
| 2700                | 97 857,4                   | 92 653,5       | 93 105,9  | 151 481,1       | 124 782,4        | 147 295,2       |
| 2800                | 101 833,7                  | 96 437,0       | 96 789,0  | 157 560,7       | 130 342,5        | 152 985,3       |
| 2900                | 06124,2                    | 100 488,7      | 100 488,7 | 163 795,5       | 135 848,2        | 158 813,6       |
| 3000                | 110 113,2                  | 103 828,2      | 104 205,3 | 169 946,4       | 141 161,1        | 164 667,0       |

## Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

| t, °C | Теплосодержание $\Delta H$ , кДж/м <sup>3</sup> |                |        |                 |                  |                 |
|-------|-------------------------------------------------|----------------|--------|-----------------|------------------|-----------------|
|       | 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               |
| 100   | 131,8                                           | 130,1          | 130,1  | 170,1           | 150,6            | 181,4           |
| 200   | 267,2                                           | 260,9          | 261,6  | 357,7           | 304,7            | 377,9           |
| 300   | 407,1                                           | 393,6          | 395,4  | 559,7           | 463,0            | 587,0           |
| 400   | 551,4                                           | 528,7          | 532,1  | 772,6           | 626,8            | 824,6           |
| 500   | 669,3                                           | 666,6          | 672,0  | 925,1           | 786,2            | 1034,9          |
| 600   | 850,6                                           | 807,8          | 814,5  | 1225,6          | 969,5            | 1269,6          |
| 700   | 1004,7                                          | 951,9          | 960,3  | 1463,1          | 1149,7           | 1507,5          |
| 800   | 1160,6                                          | 1098,2         | 1108,2 | 1706,2          | 1335,3           | 1746,4          |
| 900   | 1319,0                                          | 1246,9         | 1258,7 | 1953,8          | 1527,2           | 1994,8          |
| 1000  | 1478,6                                          | 1398,2         | 1410,7 | 2205,2          | 1724,2           | 2237,4          |
| 1100  | 1639,5                                          | 1551,1         | 1564,9 | 2460,4          | 1926,5           | 2488,8          |
| 1200  | 1802,1                                          | 1705,3         | 1720,4 | 2718,5          | 2133,9           | 2735,2          |
| 1300  | 1965,1                                          | 1861,2         | 1877,5 | 2979,1          | 2345,5           | 2979,5          |
| 1400  | 2129,8                                          | 2010,0         | 2035,5 | 3241,4          | 2560,9           | 3238,0          |
| 1500  | 2295,7                                          | 2176,7         | 2194,7 | 3505,7          | 2781,3           | 3488,2          |
| 1600  | 2462,4                                          | 2335,5         | 2355,2 | 3771,4          | 3004,2           | 3747,5          |
| 1700  | 2630,5                                          | 2495,9         | 2515,7 | 4039,6          | 3231,7           | 4003,1          |
| 1800  | 2799,7                                          | 2656,4         | 2678,2 | 4307,3          | 3461,3           | 4261,2          |
| 1900  | 2969,4                                          | 2818,2         | 2840,4 | 4579,7          | 3693,5           | 4529,8          |
| 2000  | 3140,8                                          | 2979,9         | 3004,2 | 4847,8          | 3928,5           | 4667,6          |
| 2100  | 3311,7                                          | 3142,9         | 3167,6 | 5118,2          | 4166,1           | 5059,4          |
| 2200  | 3497,8                                          | 3306,3         | —      | 3332,3          | 4405,8           | 5337,2          |
| 2300  | 3659,1                                          | 3469,3         | 3497,4 | 5660,7          | 4667,1           | 5608,7          |
| 2400  | 3834,3                                          | 3633,1         | 3663,3 | 5933,0          | 4890,9           | 5892,8          |
| 2500  | 4009,8                                          | 3797,4         | 3828,8 | 6209,6          | 5136,5           | 6169,8          |
| 2600  | 4184,9                                          | 3953,9         | 3988,4 | 6487,4          | 5387,1           | 6460,1          |
| 2700  | 4368,9                                          | 4135,9         | 4156,5 | 6761,8          | 5639,3           | 6753,8          |
| 2800  | 4546,1                                          | 4304,4         | 4320,7 | 7033,3          | 5897,8           | 7050,9          |
| 2900  | 4729,2                                          | 4469,0         | 4484,9 | 7311,1          | 6159,3           | 7351,3          |
| 3000  | 4914,9                                          | 4634,5         | 4652,1 | 7589,7          | 6425,8           | 7655,1          |

**Температура воспламенения, К, некоторых предельных углеводородов  
в зависимости от средней углеродной цепи**

| $l_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}$ | $l_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}$ | $l_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}$ | $l_{\text{ср}}$ | $T_{\text{с}}$ |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 3               | 743            | 6               | 507            | 9               | 481            | 12              | 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               | 686            | 7               | 496            | 10              | 479            | 13              | 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             | 93             | 10,4            | 478            | 13,4            | 477            |
| 4,5             | 643            | 7,5             | 492            | 10,5            | 478            | 13,5            | 476            |
| 4,6             | 631            | 7,6             | 491            | 10,6            | 478            | 13,6            | 476            |
| 4,7             | 617            | 7,7             | 490            | 10,7            | 478            | 13,7            | 476            |
| 4,8             | 601            | 7,8             | 489            | 10,8            | 478            | 13,8            | 476            |
| 4,9             | 581            | 7,9             | 489            | 10,9            | 478            | 13,9            | 476            |
| 5               | 560            | 8               | 488            | 11              | 478            | 14              | 476            |
| 5,1             | 547            | 8,1             | 487            | 11,1            | 478            | 14,1            | 476            |
| 5,2             | 535            | 8,2             | 486            | 11,2            | 478            | 14,2            | 476            |
| 5,3             | 528            | 8,3             | 486            | 11,3            | 478            | 14,3            | 476            |
| 5,4             | 522            | 8,4             | 485            | 11,4            | 478            | 14,4            | 476            |
| 5,5             | 517            | 8,5             | 484            | 11,5            | 478            | 14,5            | 476            |
| 5,6             | 513            | 8,6             | 484            | 11,6            | 477            | 14,6            | 476            |
| 5,7             | 511            | 8,7             | 483            | 11,7            | 477            | 14,7            | 476            |
| 5,8             | 509            | 8,8             | 483            | 11,8            | 477            | 14,8            | 476            |
| 5,9             | 508            | 8,9             | 482            | 11,9            | 477            | 14,9            | 476            |

Таблица 16

Температура самовоспламенения, К, некоторых предельных  
одноатомных спиртов в зависимости от средней 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            | 4,9             | 592            | 7,3             | 537            | 9,7             | 514            |
| 2,6             | 725            | 5,0             | 588            | 7,4             | 536            | 9,8             | 513            |
| 2,7             | 721            | 5,1             | 585            | 7,5             | 535            | 9,9             | 513            |
| 2,8             | 716            | 5,2             | 582            | 7,6             | 534            | 10,0            | 512            |
| 2,9             | 711            | 5,3             | 579            | 7,7             | 533            | 10,5            | 509            |
| 3,0             | 706            | 5,4             | 577            | 7,8             | 531            | 11,0            | 507            |
| 3,1             | 696            | 5,5             | 574            | 7,9             | 530            | 11,5            | 506            |
| 3,2             | 693            | 5,6             | 572            | 8,0             | 529            | 12,0            | 505            |
| 3,3             | 686            | 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            |

Таблица 17

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              | 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             | 71,8           | 2,7             | 699            |
| -1,2            | 837            | 0,8             | 715            | 2,8             | 698            |
| -1,1            | 836            | 0,9             | 713            | 2,9             | 698            |
| -1              | 835            | 1               | 712            | 3               | 697            |
| -0,9            | 835            | 1,1             | 711            | 3,1             | 697            |
| -0,8            | 834            | 1,2             | 710            | 3,2             | 697            |
| -0,7            | 833            | 1,3             | 709            | 3,3             | 697            |
| -0,6            | 832            | 1,4             | 708            | 3,4             | 696            |
| -0,5            | 831            | 1,5             | 707            | 3,5             | 696            |
| -0,4            | 830            | 1,6             | 706            | 3,6             | 696            |
| -0,3            | 829            | 1,7             | 705            | 3,7             | 696            |
| -0,2            | 827            | 1,8             | 704            | 3,8             | 696            |
| -0,1            | 824            | 1,9             | 703            | 3,9             | 696            |
| 0               | 819            | 2               | 703            | 4               | 695            |

Таблица 18

Значение параметров для расчета минимальной флегматизирующей концентрации инертных газов

| Параметр         | Значения параметров при разбавлении смеси |                       |                       |
|------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | азотом                                    | водяным паром         | диоксидом углерода    |
| $H_f$ , моль/кДж | $0,864 \cdot 10^{-5}$                     | $0,800 \cdot 10^{-5}$ | $0,735 \cdot 10^{-5}$ |
| $H_{\Phi}$       | 1,256                                     | 0,780                 | 0,579                 |
| $H_C$            | 2,5277                                    | 1,651                 | 1,251                 |

| Параметр    | Значения параметров при разбавлении смеси |               |                    |
|-------------|-------------------------------------------|---------------|--------------------|
|             | азотом                                    | водяным паром | диоксидом углерода |
| $h'_H$      | 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              |
| $h''_F$     | 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                  |

Таблица 19

## Физико-химические константы горючих веществ

| Наименование вещества                                  | Состояние | Теплота образования ( $\Delta H$ ) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{K}$ | Теплота горения ( $\Delta H_r$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{K}$ | Теплоемкость ( $C_p$ ) при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{K})}$ | Теплота испарения ( $\Delta H_{\text{исп}}$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|--------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| н-Амиловый спирт $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{OH}$ | Г         | -36,39                                                                                                        | 3377,70                                                                                        | —                                                                                                | 46,05                                                                           |
| Анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$               | Ж         | -29,70                                                                                                        | 3396,2                                                                                         | 199,6                                                                                            | —                                                                               |
| Антрацен ( $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ )              | Тв        | —                                                                                                             | -7117,87                                                                                       | 207,04                                                                                           | —                                                                               |
| Ацетон ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ )                  | Г         | -210,96                                                                                                       | —                                                                                              | 75,3                                                                                             | 32,29                                                                           |
| Ацетон                                                 | Ж         | -248,23                                                                                                       | 1789,77                                                                                        | 124,73                                                                                           | —                                                                               |
| Ацетальдегид ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ )               | Г         | -106,36                                                                                                       | 1167,89                                                                                        | 62,8                                                                                             | 27,00                                                                           |
| Ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )                    | Г         | 226,748                                                                                                       | 1299,618                                                                                       | 43,928                                                                                           | 48,14                                                                           |
| Бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )                      | Г         | +82,927                                                                                                       | 3301,51                                                                                        | 81,67                                                                                            | 78,284                                                                          |

| Наименование вещества                                   | Состояние | Теплота образования ( $\Delta H$ ) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{К}$ | Теплота горения ( $\Delta H_f$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{К}$ | Теплоемкость ( $C_p$ ) при постоянном давлении, Дж/(моль · К) | Теплота испарения ( $\Delta H_{\text{исп}}$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|---------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Бензол                                                  | Ж         | +49,627                                                                                                       | —                                                                                              | 130,77                                                        | —                                                                               |
| Бензофенон ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$ )        | Тв        | −32,91                                                                                                        | 7515,98                                                                                        | —                                                             | —                                                                               |
| н-Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )                   | Г         | 126,15                                                                                                        | 2878,05                                                                                        | 97,45                                                         | —                                                                               |
| Нафталин ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ )                  | Тв        | +75,44                                                                                                        | 5245,0                                                                                         | 165,3                                                         | —                                                                               |
| н-Гексан ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )                  | Г         | −167,19                                                                                                       | 4197,7                                                                                         | 143,09                                                        | 28,88                                                                           |
| н-Гексан                                                | Ж         | −198,82                                                                                                       | —                                                                                              | 194,93                                                        | —                                                                               |
| Гептан ( $\text{C}_7\text{H}_{16}$ )                    | Г         | −187,82                                                                                                       | —                                                                                              | 165,98                                                        | —                                                                               |
| Гептан                                                  | Ж         | −224,39                                                                                                       | 4856,7                                                                                         | 138,9                                                         | —                                                                               |
| Глицерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$            | Ж         | −059,71                                                                                                       | 1661,84                                                                                        | 223,11                                                        | 76,05                                                                           |
| Двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ )                     | Г         | −393,501                                                                                                      | —                                                                                              | 37,15                                                         | 6,031                                                                           |
| Дибензил ( $\text{C}_{12}\text{H}_{14}$ )               | Тв        | —                                                                                                             | —                                                                                              | 251,18                                                        | —                                                                               |
| Диметиламин $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$                  | Г         | −24,6                                                                                                         | —                                                                                              | 69,37                                                         | —                                                                               |
| Диоксан ( $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ )            | Ж         | −397,81                                                                                                       | —                                                                                              | 152,7                                                         | 31,77                                                                           |
| Дифенил ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ )                | Тв        | −102,69                                                                                                       | 6272,66                                                                                        | 197,17                                                        | 48,02                                                                           |
| 1,1-Дихлорэтан ( $\text{CHCl}_2\text{—CH}_3$ )          | Г         | —                                                                                                             | 1118,08                                                                                        | 76,27                                                         | 30,56                                                                           |
| 1,2-Дихлорэтан ( $\text{CH}_2\text{Cl—CH}_2\text{Cl}$ ) | Г         | —                                                                                                             | 1134,41                                                                                        | 79,53                                                         | 32,23                                                                           |
| Диэтиловый эфир $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$      | Ж         | −273,2                                                                                                        | 2728,54                                                                                        | —                                                             | 26,71                                                                           |
| о-Ксилол $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$          | Г         | +186,995                                                                                                      | 4590,37                                                                                        | 133,26                                                        | —                                                                               |

| Наименование вещества                                         | Состояние | Теплота образования ( $\Delta H$ ) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{K}$ | Теплота горения ( $\Delta H_f$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{K}$ | Теплоемкость ( $C_p$ ) при постоянном давлении, Дж/(моль · К) | Теплота испарения ( $\Delta H_{\text{исп}}$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|---------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| о-Ксилол                                                      | Ж         | -24,439                                                                                                       | —                                                                                              | 187,9                                                         | 36,71                                                                           |
| м-Ксилол<br>$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$             | Г         | +17,238                                                                                                       | 4596,61                                                                                        | 127,57                                                        | 36,84                                                                           |
| м-Ксилол                                                      | Ж         | +25,418                                                                                                       | —                                                                                              | 183,3                                                         | —                                                                               |
| п-Ксилол<br>$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$             | Г         | +17,948                                                                                                       | 4598,31                                                                                        | 126,86                                                        | 36,56                                                                           |
| п-Ксилол                                                      | Ж         | -24,429                                                                                                       | —                                                                                              | 183,7                                                         | —                                                                               |
| Метан ( $\text{CH}_4$ )                                       | Г         | -74,847                                                                                                       | 890,34                                                                                         | 35,715                                                        | —                                                                               |
| Метиловый спирт<br>( $\text{CH}_3\text{OH}$ )                 | Г         | -201,17                                                                                                       | 764,43                                                                                         | 49,4                                                          | 35,28                                                                           |
| Метиловый спирт                                               | Ж         | -238,57                                                                                                       | —                                                                                              | 81,6                                                          | —                                                                               |
| Муравьиная кислота<br>( $\text{HCOOH}$ )                      | Г         | -362,63                                                                                                       | 262,92                                                                                         | 54,4                                                          | —                                                                               |
| Муравьиная кислота                                            | Ж         | -409,20                                                                                                       | —                                                                                              | —                                                             | —                                                                               |
| Этилбензол<br>( $\text{C}_6\text{H}_5-\text{C}_2\text{H}_5$ ) | Ж         | —                                                                                                             | —                                                                                              | —                                                             | 36,31                                                                           |
| Этиленгликоль<br>$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$          | Ж         | —                                                                                                             | —                                                                                              | —                                                             | 56,93                                                                           |
| н-Бутиловый спирт<br>$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$    | Г         | 282,132                                                                                                       | 2721,00                                                                                        | —                                                             | 43,83                                                                           |
| трет-Бутиловый спирт<br>( $\text{CH}_3)_3\text{COH}$          | Ж         | 324,72 г                                                                                                      | 2634,25                                                                                        | —                                                             | —                                                                               |
| Октан ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ )                           | Г         | -208,55                                                                                                       | 5515,7                                                                                         | 188,87                                                        | 34,62                                                                           |
| Пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )                          | Г         | -166,44                                                                                                       | 5064,42                                                                                        | 120,21                                                        | 52,12                                                                           |
| Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )                             | Г         | -103,847                                                                                                      | 22111,516                                                                                      | 73,51                                                         | —                                                                               |
| Этилен                                                        | Г         | —                                                                                                             | —                                                                                              | 43,56                                                         | —                                                                               |

| Наименование вещества                                                | Состояние | Теплота образования ( $\Delta H$ ) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{K}$ | Теплота горения ( $\Delta H_r$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298^\circ\text{K}$ | Теплоемкость ( $C_p$ ) при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{K})}$ | Теплота испарения ( $\Delta H_{\text{исп}}$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Пропан                                                               | Ж         | -125,185                                                                                                      | 2207,281                                                                                       | —                                                                                                | —                                                                               |
| н-Пропиловый спирт<br>$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{—OH}$         | Ж         | -306,98                                                                                                       | 2064,93                                                                                        | 46                                                                                               | 46,15                                                                           |
| изо-Пропиловый спирт<br>$(\text{CH}_3)_2\text{CH—OH}$                | Г         | -268,61                                                                                                       | 1987,41                                                                                        | —                                                                                                | 40,19                                                                           |
| изо-Пропиловый спирт                                                 | Ж         | -320,29                                                                                                       | —                                                                                              | —                                                                                                | —                                                                               |
| Пропилбензол<br>$(\text{C}_6\text{H}_5\text{—C}_3\text{H}_7)$        | Ж         | —                                                                                                             | —                                                                                              | —                                                                                                | —                                                                               |
| изо-Пропилбензол<br>$(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_3)_2)$ | Ж         | —                                                                                                             | —                                                                                              | —                                                                                                | 37,92                                                                           |
| Сахароза<br>$(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11})$              | Тв        | -2222,09                                                                                                      | 5651,43                                                                                        | 43,119                                                                                           | —                                                                               |
| Толуол ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ )                         | Г         | +49,999                                                                                                       | 3930,48                                                                                        | 103,760                                                                                          | 33,53                                                                           |
| Толуол                                                               | Ж         | +11,905                                                                                                       | —                                                                                              | 157,11                                                                                           | —                                                                               |
| Тетрафенилметан<br>$(\text{C}_{25}\text{H}_{20})$                    | Тв        | —                                                                                                             | 12987,58                                                                                       | 368,18                                                                                           | —                                                                               |
| Уксусная кислота<br>$(\text{CH}_3\text{COOH})$                       | Г         | -436,4                                                                                                        | —                                                                                              | —                                                                                                | —                                                                               |
| Уксусная кислота                                                     | Ж         | -487,018                                                                                                      | 871,72                                                                                         | 123,4                                                                                            | 27,2                                                                            |
| Фенонтрен ( $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ )                           | Тв        | —                                                                                                             | —                                                                                              | 234,42                                                                                           | —                                                                               |
| Хлорбензол<br>$(\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl})$                      | Ж         | +116,3                                                                                                        | 7084,81                                                                                        | 145,6                                                                                            | 30,77                                                                           |
| Циклогексан<br>$(\text{C}_6\text{H}_{12})$                           | Ж         | —                                                                                                             | 3954,89                                                                                        | 106,27                                                                                           | 30,73                                                                           |

| Наименование вещества                                       | Состояние | Теплота образования ( $\Delta H$ ) из элементов, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$ | Теплота горения ( $\Delta H_r$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ при $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$ | Теплоемкость ( $C_p$ ) при постоянном давлении, Дж/(моль · К) | Теплота испарения ( $\Delta H_{\text{исп}}$ ), $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|-------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Циклогексанол ( $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}$ )        | Ж         | —                                                                                                                      | 3748,47                                                                                                 | —                                                             | —                                                                               |
| Этиловый спирт ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) (этанол) | Г         | –235,31                                                                                                                | 1410,03                                                                                                 | 71,1                                                          | 38,59                                                                           |
| Этиловый спирт                                              | Ж         | –277,63                                                                                                                | —                                                                                                       | 111,46                                                        | 10,52                                                                           |
| Вода ( $\text{H}_2\text{O}$ )                               | Ж         | –285,838                                                                                                               | —                                                                                                       | 75,25                                                         | —                                                                               |
| Вода                                                        | Г         | —                                                                                                                      | —                                                                                                       | 33,56                                                         | —                                                                               |
| Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )                             | Г         | –84,667                                                                                                                | 1560,92                                                                                                 | 52,65                                                         | —                                                                               |
| Этилацетат ( $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ )         | Ж         | –463,2                                                                                                                 | —                                                                                                       | —                                                             | —                                                                               |
| Сернистый ангидрид ( $\text{SO}_2$ )                        | Г         | –296,9                                                                                                                 | —                                                                                                       | —                                                             | —                                                                               |
| Хлористый водород ( $\text{HCl}$ )                          | Г         | –92,311                                                                                                                | —                                                                                                       | —                                                             | —                                                                               |
| Цианистый водород ( $\text{HCN}$ )                          | Г         | –130,5                                                                                                                 | —                                                                                                       | —                                                             | —                                                                               |
| Кислород                                                    | Г         | —                                                                                                                      | —                                                                                                       | 29,37                                                         | —                                                                               |
| Азот                                                        | Г         | —                                                                                                                      | —                                                                                                       | 29,10                                                         | —                                                                               |
| Водород                                                     | Г         | —                                                                                                                      | –241,6                                                                                                  | —                                                             | —                                                                               |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эткинс, П. Физическая химия: в 3 ч. Ч. 1: Равновесная термодинамика/ П. Эткинс, Дж. де Паула ; пер. с англ. И. А. Успенской и В. А. Иванова; под ред. В. В. Лунина и О. М. Полторака. - М.: Мир, 2007. - 494 с.
2. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва: учебное пособие для вузов по направлению 280100 "Безопасность жизнедеятельности" специальности 280101.65 "Безопасность жизнедеятельности в техносфере"/ П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов. - М.: Юрайт, 2014. - 435 с.
3. Девисилов, В. А. Теория горения и взрыва: практикум: учебное пособие для вузов по направлению "Техносфер. безопасность"/ В. А. Девисилов, Т. И. Дроздова, С. С. Тимофеева ; под общ. ред. В. А. Девисилова. - М.: Форум, 2012. - 351 с.
4. Карякин, Н.В. Основы химической термодинамики: учебное пособие для вузов / Н.В. Карякин. – М.: Академия, 2003. – 464 с.
5. Варнатц, Ю. Горение: физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г. Л. Агафонова; под ред. П. А. Власова . - М. : Физматлит , 2003 . - 352 с.
6. Шароварников, А. Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров: Состав. Свойства. Применение/ А. Ф. Шароварников, С. А. Шароварников. - М.: Пожнаука, 2005. - 334 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ                                                                                                                         | 3  |
| 1. РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ                                                                                                         | 4  |
| 2. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ                                                                                             | 24 |
| 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ                                                                                                           | 31 |
| <b>Практическая работа № 1</b> Стехиометрические расчеты в процессах горения. Определение группы горючести веществ и материалов. | 31 |
| <b>Практическая работа №2</b> Материальный баланс процессов горения.                                                             | 35 |
| <b>Практическая работа №3</b> Тепловой баланс процессов горения                                                                  | 38 |
| <b>Практическо-лабораторная работа № 4</b> Самовозгорание веществ и материалов. Определение температуры самовоспламенения        | 41 |
| <b>Практическая работа № 5</b> Определение нижнего и верхнего концентрационного пределов воспламенения.                          | 45 |
| <b>Практическая работа № 6</b> Основные стехиометрические расчеты                                                                | 46 |
| <b>Практическая работа № 7</b> Оболочки Земли. Атмосфера                                                                         | 48 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ                                                                                                                       | 62 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК                                                                                                         | 96 |

Учебное издание

**Галина Алексеевна Тихановская  
Людмила Михайловна Воропай**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ  
И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**

Методическое пособие

Редактор – И.Т. Куликова

---

Подписано в печать 15.05.2014. Формат 60 × 90/16

Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл.-п.л. 5,9. Тираж экз. Заказ №

---

Отпечатано: РИО, ВоГУ 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15