



Профессиональное образовательное частное учреждение среднего профессионального образования

**«Высший юридический колледж:
экономика, финансы, служба безопасности»**

Пушкинская ул., д. 268, 426008, г. Ижевск. Тел.: (3412) 32-02-32. Тел./факс: 43-62-22. E-mail: mveu@mveu.ru, mveu.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

к выполнению практических работ

при изучении учебной дисциплины

ОП.06 Теория горения и взрыва

для специальности

20.02.04 Пожарная безопасность

Ижевск 2020

Практические работы:

Практическая работа №1

Тема «Расчет параметров газообмена, расхода воздуха и продуктов горения, плоскости равных давлений»

Объем часов: 4

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ.

Задание

Рассчитать объем и массу окислительной среды, необходимые для горения i -го горючего вещества (табл. 1).

Таблица 1

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Метиловый спирт	CH_3OH	2 кг	Воздух	$T=300 \text{ К}$ $P=101325 \text{ Па}$ $\alpha=3$
2	Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	5 кг	$\text{O}_2 - 70\%$ $\text{N}_2 - 30\%$	$T=290 \text{ К}$ $P=90000 \text{ Па}$ $\alpha=2,5$
3	Смесь газов	$\text{CO} - 45\%$ $\text{N}_2 - 15\%$ $\text{C}_4\text{H}_8 - 10\%$ $\text{O}_2 - 30\%$	3 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,8$
4	Нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	30 кг	Воздух	$T=280 \text{ К}$ $P=98000 \text{ Па}$ $\alpha=2,5$
5	Сложное вещество	$\text{C} - 65\%$ $\text{O} - 20\%$ $\text{H} - 5\%$ $\text{S} - 10\%$ C_2H_4	200 г	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,4$
6	Этилен	C_2H_4	5 м ³	$\text{O}_2 - 25\%$ $\text{N}_2 - 75\%$	Нормальные $\alpha=2,5$
7	Сера	S	2 кг	$\text{O}_2 - 60\%$ $\text{N}_2 - 40\%$	$T=350 \text{ К}$ $P=120000 \text{ Па}$ $\alpha=1,8$
8	Сложное вещество	$\text{C} - 90\%$ $\text{O} - 2\%$ $\text{H} - 3\%$ $\text{N} - 5\%$	1 кг	Воздух	$T=300 \text{ К}$ $P=95000 \text{ Па}$ $\alpha=1,5$

9	Смесь газов	CH ₄ – 15% C ₃ H ₈ – 70% O ₂ – 10% H ₂ – 5%	5 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha=1,9$
10	Алюминий	Al	15 кг	O ₂ – 42% N ₂ – 58%	Нормальные $\alpha=2,8$
11	Сплав	Mg – 20% Al – 80%	8 кг	Воздух	T=265 К P=92000 Па $\alpha=1,5$
12	Муравьиная кислота	CH ₂ O ₂	5 кг	Воздух	Нормальные $\alpha=1,2$
13	Диметиловый эфир	(CH ₃) ₂ O	10 кг	Воздух	T=282 К P=101600 Па $\alpha=4,2$
14	Смесь газов	H ₂ S – 25% SO ₂ – 15% CO ₂ – 15% H ₂ – 30% O ₂ – 15%	15 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha=1,4$
15	Сложное вещество	C – 82% H – 8% W – 10%	0,7 г	Воздух	T=260 К P=110000 Па $\alpha=1,4$
16	Глицерин	C ₂ H ₈ O ₃	1 кг	Воздух	T=305 К P=101300 Па $\alpha=1,9$
17	Ацетилен	C ₂ H ₂	150 л	Cl ₂ – 18% N ₂ – 82%	Нормальные $\alpha=1,8$
18	Смесь газов	CH ₄ – 30% N ₂ – 15% H ₂ – 47% O ₂ – 8%	3 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha=3,2$
19	Этиловый эфир уксусной кислоты	C ₄ H ₈ O ₂	5 кг	Воздух	T=270 К P=85000 Па $\alpha=1,5$
20	Метилэтил кетон	C ₄ H ₈ O	5 кг	Воздух	Нормальные $\alpha=1,5$
21	Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	7 кг	Воздух	T=305 К P=1000 Па $\alpha=2,8$
22	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	1 кг	O ₂ – 25 % N ₂ – 75 %	T=280 К P=98000 Па $\alpha=1,4$
23	Смесь газов	NH ₃ – 25 % C ₄ H ₁₀ – 25 % C ₄ H ₈ – 15 % CO ₂ – 30 % O ₂ – 5 %	200 л	Воздух	Нормальные $\alpha=1,8$
24	Бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	4 кг	Воздух	T=265 К P=120000 Па $\alpha=1,8$

25	Дибром-гексан	$C_6H_{12}Br_2$	3 кг	$O_2 - 65 \%$ $N_2 - 35 \%$	$T = 280 \text{ К}$ $P = 98000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
26	Сложное вещество	$C - 70 \%$ $S - 5 \%$ $H - 5 \%$ $O - 20 \%$	15 кг	Воздух	$T = 285 \text{ К}$ $P = 100000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,8$
27	Смесь газов	$C_3H_8 - 10 \%$ $CO - 79 \%$ $H_2 - 5 \%$ $O_2 - 5 \%$ $N_2 - 10 \%$	10 м^3	Воздух	Нормальные $\alpha = 3,5$

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

$$\frac{\varphi_{N_2}}{\varphi_{O_2}} = \frac{79}{21} = 3.76, \quad (1)$$

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

Следовательно, на 1 м^3 (кмоль) кислорода в воздухе приходится $3,76 \text{ м}^3$ (кмоль) азота.

Массовое соотношение азота и кислорода в воздухе составляет 23,3% O_2 и 76,7% N_2 . Его можно определить, исходя из выражения:

$$\frac{\varphi_{N_2} M_{N_2}}{\varphi_{O_2} M_{O_2}} = \frac{79 \cdot 28}{21 \cdot 32} = 3.29, \quad (2)$$

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

Для удобства расчетов горючие вещества разделяют на три типа (табл. 2): индивидуальные химические соединения (метан, уксусная кислота и т.п.), вещества сложного состава (древесина, торф, сланцы, нефть и т.п.), смесь газов (генераторный газ и т.д.).

Таблица 2

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{\text{с}}^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_{\text{Г}}} \quad (3a)$ $V_{\text{с}}^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) V_0}{n_{\text{Г}} M_{\text{Г}}} \quad (3б)$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещества сложного состава	$V_{\text{с}}^0 = 0,269 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) \quad (4)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

Смесь газов	$V_{\text{г}}^0 = \frac{\sum \varphi_{\text{Г}} n_{\text{O}_2 i} - \varphi_{\text{O}_2}}{21} \quad (5)$	$\frac{M^3}{M^3} \quad \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$
-------------	---	---

Здесь $V_{\text{г}}^0$ – теоретическое количество воздуха; $n_{\text{Г}}, n_{\text{O}_2}, n_{\text{N}_2}$ – количество горючего, кислорода и азота, получаемого из уравнения химической реакции горения, кмоль; $M_{\text{Г}}$ – молекулярная масса горючего; V_0 – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях (22,4 м³); C, H, S, O – массовое содержание соответствующих элементов в составе горючего, %; $\varphi_{\text{Г}i}$ – концентрация i -го горючего компонента, % об.; φ_{O_2} – концентрация кислорода в составе горючего газа, % об.; $n_{\text{O}_2 i}$ – количество кислорода, необходимое для окисления одного кмоль i -го горючего компонента, кмоль.

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

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (6)$$

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

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

$$\alpha = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{г}}^0} \quad (7)$$

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

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}} - V_{\text{г}}^0. \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) следует, что

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{г}}^0 (\alpha - 1) \quad (9)$$

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

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{\text{O}_2} \cdot V_{\text{пр}}^0}{V_{\text{г}}^0 (21 - \varphi_{\text{O}_2})}, \quad (10)$$

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

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

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2} + 0,5\varphi_{\text{CO}} + 0,5\varphi_{\text{H}_2} + 2\varphi_{\text{CH}_4}}, \quad (11a)$$

где φ_{O_2} , φ_{CO} , φ_{CH_4} , φ_{H_2} – содержание соответствующих веществ в продуктах горения, % об.

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

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} \cdot V_{пт}^0}{V_{пт}^0 (\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2})} \quad (12)$$

и соответственно формулу (11)

$$\alpha = \frac{\varphi_{O_2}^0}{\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2}}, \quad (13)$$

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

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

$$m_B = V_B \cdot \rho_B, \quad (14)$$

где ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Очевидно, что

$$\rho_B = \frac{\varphi_{N_2} M_{N_2} + \varphi_{O_2} M_{O_2}}{V_0} \cdot \frac{PT_0}{P_0 T_1}. \quad (15)$$

После подстановки постоянных значений в формулу (15) получим

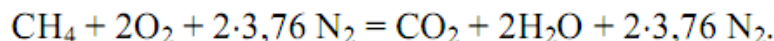
$$\rho_B = 3.47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T}, \quad (16)$$

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

Примеры решений

Пример 1. Определить теоретические массу и объем воздуха, необходимого для горения 1 м³ метана при нормальных условиях.

Решение. Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчета объема воздуха надо пользоваться формулой (3а). Запишем уравнение химической реакции горения CH_4 в воздухе



Из уравнения находим $n_{O_2} = 2$; $n_{N_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,52$; $n_{CH_4} = 1$, тогда

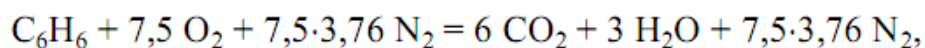
$$V_B^0 = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ или кмоль/кмоль.}$$

По формуле (14) с учетом уравнения (15) рассчитываем массу воздуха

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

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

Решение. Горючее – индивидуальное химическое соединение, поэтому для расчета по формуле (3б) запишем уравнение химической реакции горения



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

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

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

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

Практическая работа №2

Тема «Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения)»

Объем часов: 2

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, условий взрыва горючих газов, паров горючих жидкостей, тепловой энергии при горении, избыточного давления при взрыве.

Задание. Рассчитать концентрационные пределы воспламенения паров i -го вещества в воздухе. Результаты расчета сравнить с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку (табл. 2).

Таблица 2

Вариант	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи
1	Гептан	C_7H_{16}	По предельной теплоте сгорания
2	Смесь газов	$\text{C}_8\text{H}_{18} - 40 \%$, $\text{C}_6\text{H}_{14} - 60 \%$	По формуле Ле-Шателье
3	Ацетилен	C_2H_2	По аппроксимационной формуле
4	Уксусный альдегид	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	По предельной теплоте сгорания
5	Бензол	C_6H_6	По температурным пределам воспламенения
6	Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	По температурным пределам воспламенения
7	Смесь газов	$\text{CH}_4 - 40 \%$, $\text{CO} - 50 \%$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 10 \%$	По формуле Ле-Шателье
8	Амиловый спирт	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	По температурным пределам воспламенения
9	Этан	C_2H_6	По предельной теплоте сгорания

Вариант	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи
10	Толуол	C_7H_8	По температурным пределам воспламенения
11	Смесь газов	$CO - 70 \%,$ $CH_4 - 25 \%,$ $C_2H_6 - 5 \%$	По формуле Ле-Шателье
12	Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	По аппроксимационной формуле
13	Уксусно-этиловый эфир	$C_4H_8O_2$	По температурным пределам воспламенения
14	Глицерин	$C_3H_8O_3$	По аппроксимационной формуле
15	Ацетон	C_3H_6O	По аппроксимационной формуле
16	Смесь газов	$C_3H_8 - 70 \%,$ $CH_4 - 30 \%$	По формуле Ле-Шателье
17	Метиловый спирт	CH_4O	По температурным пределам воспламенения
18	Стирол	C_8H_8	По температурным пределам воспламенения
19	Фенол	C_6H_6O	По предельной теплоте сгорания
20	Гексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	По аппроксимационной формуле
21	Смесь газов	$CO - 12 \%,$ $C_2H_2 - 78 \%,$ $CH_4 - 10 \%$	По формуле Ле-Шателье
22	Диэтиловый спирт	$(C_2H_5)_2O$	По температурным пределам воспламенения
23	Сероуглерод	CS_2	По температурным пределам воспламенения
24	Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	По аппроксимационной формуле
25	Бензиловый спирт	C_7H_8O	По температурным пределам воспламенения
26	Метилэтил кетон	C_4H_8O	По аппроксимационной формуле
27	Анилин	C_6H_7N	По предельной теплоте сгорания

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

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

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

если принять среднее значение $Q_{\text{пр}}$ равным 1830 кДж/м³, то φ_n будет равно

$$\varphi_n = \frac{1830 \cdot 100}{Q_n}$$

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

Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{n(b)} = \frac{100}{an + b}, \quad (2.2)$$

где n – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции; a и b – эмпирические константы, значения которых приведены табл.3.

Таблица 3

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

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

$$\varphi_{n(b)} = \frac{p_{n(b)} 100}{p_0}, \quad (2.3)$$

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

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

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

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

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

$$\varphi_{\text{н(в)}}^{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{\text{н(в)}}i}}, \quad (2.5)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

При разбавлении газозооушной смеси инертными газами (N_2 , CO_2 , H_2O пары и т.п.) область воспламенения сужается: верхний предел снижается, а нижний – возрастает. Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой нижний и верхний пределы воспламенения смыкаются, называется минимальной флегматизирующей концентрацией $\varphi_{\text{ф}}$. Содержание кислорода в такой системе называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода МВСК (φ_{O_2}). Некоторое содержание кислорода ниже МВСК называют безопасным $\varphi_{\text{O}_2\text{без}}$. Расчет указанных параметров проводят по формулам

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

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

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

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

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

- в точке флегматизации горючая смесь имеет предельную температуру горения ~ 1500 К;
- смесь является стехиометрической при окислении углерода до CO, водорода до H₂O.

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

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

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

Из (2.11)

$$n_{\Phi} = \frac{Q_H - (T_{\Gamma}^* - T_0) \sum C_{Pi} \cdot n_{Pi}}{C_{P\Phi} (T_{\Gamma}^* - T_0)} \quad (2.12)$$

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

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

Примеры решений

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

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

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

По формуле (2.1) определим НКПВ

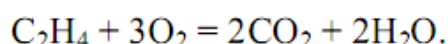
$$\varphi_n = \frac{1830 \cdot 100}{128,7 \cdot 103} = 1,42\%.$$

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

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

П р и м е р 2. Определить концентрационные пределы воспламенения этилена в воздухе.

Р е ш е н и е. Расчет КПВ проводим по аппроксимационной формуле. Определяем значение стехиометрического коэффициента при кислороде



Таким образом, $n = 3$, тогда

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

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

$$\Delta_n = \frac{3,25 - 3,0}{3,0} \approx 8\%; \quad \Delta_v = \frac{18,23 - 32,0}{32} \approx -40\%.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

По формуле (3.3) определим НКПВ

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

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

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

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

$$\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,4}{2,1} + \frac{0,1}{2,2} + \frac{0,5}{1,9}} = 2,0 \%, \quad \varphi_{\text{в}}^{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0,4}{9,5} + \frac{0,1}{10,1} + \frac{0,5}{9,1}} = 9,38 \%.$$

Пример 5. Каково минимальное количество диэтилового эфира, кг, способное при испарении в емкости объемом 350 м³ создать взрывоопасную концентрацию?

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

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

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

Таким образом, для создания НКПВ диэтилового эфира в объеме 350 м³ необходимо ввести 5,95 м³ его паров. Принимая во внимание, что 1 кмоль (74 кг) пара, приведенный к нормальным условиям, занимает объем, равный 22,4 м³, находим количество диэтилового эфира

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

Практическая работа №3

Тема «Расчет объема и состава продуктов горения»

Объем часов: 2

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ.

Задание. Рассчитать объем образующихся продуктов, м^3 , и содержание в них азота (% об.) при горении i -го вещества (табл. 4).

Таблица 4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Диэтиловый спирт	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	1 кг	Воздух	$T_2 = 1500 \text{ К}$ $P = 101400 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
2	Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	5 кг	«	$T_2 = 1200 \text{ К}$ $P = 98000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
3	Сплав	Mg – 20 % Al – 80 %	1 кг	«	$T_2 = 2800 \text{ К}$ $P = 95000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,6$
4	Смесь газов	CH_4 – 20 % C_3H_8 – 65 % O_2 – 15 %	1 м^3	«	$T_2 = 1480 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,4$
5	Октиловый спирт	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	10 кг	«	$T_2 = 1320 \text{ К}$ $P = 102000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
6	Сложное вещество	C – 90 % H – 5 % O – 5 %	1 кг	«	$T_2 = 1320 \text{ К}$ $P = 97000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,6$
7	Смесь газов	NH_3 – 10 % C_4H_{10} – 80 % N_2 – 7 % O_2 – 3 %	1 м^3	«	$T_2 = 1600 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,2$
8	Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	1 кг	«	$T_2 = 1550 \text{ К}$ $P = 94000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
9	Диэтиловый эфир	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	25 кг	«	$T_2 = 1600 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,4$
10	Смесь газов	CO – 70 % C_3H_8 – 25 % O_2 – 5 %	1 м^3	O_2 – 42 % N_2 – 58 %	$T_2 = 1400 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
11	Нитро-бензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	2 кг	Воздух	$T_2 = 1800 \text{ К}$ $P = 87000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,8$

12	Сложное вещество	C – 70 % H – 6 % O – 14 % W – 10 %	1 кг	«	$T_e = 1300 \text{ К}$ $P = 97000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,3$
13	Смесь газов	CH ₄ – 60 % CO ₂ – 30 % H ₂ – 10 %	1 м ³	«	$T_e = 1500 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,2$
14	Диметиловый эфир	(CH ₃) ₂ O	10 кг	O ₂ – 30 % N ₂ – 70 %	$T_e = 1800 \text{ К}$ $P = 87000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,8$
15	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	1 кг	O ₂ – 27 % N ₂ – 73 %	$T_e = 1600 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,1$
16	Сложное вещество	C – 80 % H – 12 % O – 8 %	1 кг	Воздух	$T_e = 1350 \text{ К}$ $P = 99000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,8$
17	Смесь газов	C ₂ H ₆ – 60 % C ₃ H ₈ – 30 % H ₂ – 5 % O ₂ – 5 %	1 м ³	- « -	$T_e = 165 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
18	Метилэтил кетон	C ₄ H ₈ O	1 кг	- « -	$T_e = 1480 \text{ К}$ $P = 91000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
19	Сложное вещество	C – 60 % H – 7 % O – 21 % W – 12 %	4 кг	- « -	$T_e = 1210 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,4$
20	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	2 кг	- « -	$T_e = 1340 \text{ К}$ $P = 100000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
21	Смесь газов	NH ₃ – 40 % C ₃ H ₈ – 40 % H ₂ – 10 % O ₂ – 10 %	1 м ³	- « -	$T_e = 1800 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
22	Дибромгексан	C ₆ H ₁₂ Br ₂	1 кг	O ₂ – 50 % N ₂ – 50 %	$T_e = 1400 \text{ К}$ $P = 92000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,3$
23	Динитробензол	C ₆ H ₄ (NO ₂) ₂	1 кг	Воздух	$T_e = 1650 \text{ К}$ $P = 81000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,1$
24	Сероуглерод	CS ₂	20 кг	- « -	$T = 1270 \text{ К}$ $P = 97000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,6$
25	Дихлор бензол	C ₆ H ₄ Cl	5 кг	- « -	$T = 1320 \text{ К}$ $P = 99000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,4$

26	Муравьиная кислота	C – 70 % S – 5 % H – 5 % O – 20 %	1 кг	O ₂ – 80 % N ₂ – 20 %	$T = 2600 \text{ К}$ $P = 98000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
27	Этилацетат	C ₄ H ₈ O ₂	1 кг	Воздух	$T_e = 1500 \text{ К}$ $P = 100000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,5$

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

В целях упрощения расчета все горючие вещества разделены на три типа: индивидуальные, сложные, смеси горючих газов (табл. 5)

Таблица 5

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{\text{пг}} = \frac{\sum n_{\text{пг}}}{n_{\text{Г}}} \quad (1.17)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$
	$V_{\text{пг}}^0 = \frac{V_0 \sum n_{\text{пг}i}}{n_{\text{Г}} M} \quad (1.18)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещество сложного состава	$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{C}{100} \quad (1.19)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}$
	$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} \quad (1.20)$	
	$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{S}{100} \quad (1.21)$	
	$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 2 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] \quad (1.22)$	
Смесь газов	$V_{\text{пг}}^0 = \sum V_{\text{пг}i} \quad (1.23)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$; $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$
	$V_{\text{пг}i} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{\text{пг}i} \cdot \varphi_{\text{H}i i}}{n_{\text{Г}}} + \sum \varphi_{\text{H}i i} \right]$	

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

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

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_{\text{в}} \quad (1.24)$$

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

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

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

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

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

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

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

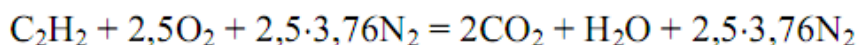
где $V_{\text{N}_2}^0$ – теоретический объем азота в продуктах горения, м³, кмоль,

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

Примеры решений

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

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



Объем продуктов горения при нормальных условиях

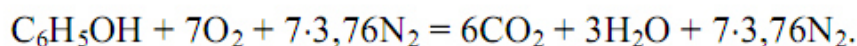
$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{2 + 1 + 2,5 \cdot 3,76}{1} = 12,4 \text{ м}^3.$$

Объем продуктов горения при 1450 К

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

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

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



Молекулярная масса горючего 98.

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем воздуха при нормальных условиях (1.25)

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

Объем продуктов горения при заданных условиях

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

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

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

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

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

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

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

Полный теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях

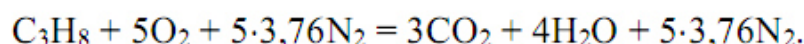
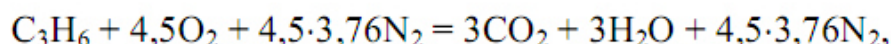
$$V_{\text{пт}} = 6,55 + 0,269 \left(\frac{55}{3} + 5 + \frac{7 - 13}{8} \right) (1,3 - 1) = 6,55 + 1,8 = 8,35 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем продуктов горения при температуре горения

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

Пример 4. Рассчитать объем продуктов горения при сгорании 1 м³ газовой смеси, состоящей из C₃H₆ – 70 %, C₃H₈ – 10 %, CO₂ – 5 %, O₂ – 15 %, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха 2,8. Температура окружающей среды 298 К.

Решение. Горючее - смесь газов (формула 1.23)



Объем продуктов горения определим по формуле (1.23)

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

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

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

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

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

Теоретический объем продуктов горения

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

Практический объем продуктов горения (формулы 1.24, 1.25)

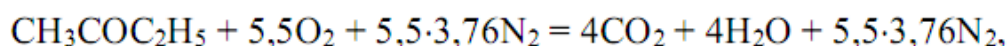
$$V_{\text{пг}} = 18,05 + \frac{4,5 \cdot 70 + 5 \cdot 10 - 15}{21} (2,8 - 1) = 42,05 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов горения при температуре 1300 К

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

Пример 5. Определить состав продуктов горения метил-этилкетона.

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



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

По формуле (1.26) находим состав продуктов горения

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

Практическая работа №4

Тема «Расчет теплоты сгорания веществ»

Объем часов: 2

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, тепловой энергии при горении.

Задание. Рассчитать температуру горения i -го вещества (табл. 6).

Таблица 6

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

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

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

$$Q_v - Q_n = Q_{ис},$$

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

Таблица 7

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

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

Расчет теплоты сгорания газозвоздушных смесей проводят по формуле

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

где $Q_n^{см}$ – теплота сгорания газозвоздушной смеси, кДж/м³, кДж/кмоль; Q_n – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³, кДж/кмоль; $\varphi_{г}$ – концентрация горючего в смеси с окислителем, % об.

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении равна

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

где q – удельная интенсивность тепловыделения кВт/м²; v_m – массовая скорость выгорания, кг/(м²·с).

Скорость тепловыделения при горении теплота пожара равна

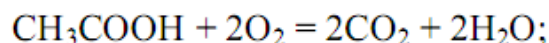
$$q = Q_n v_m \cdot F, \quad (1.35)$$

где q_n – интенсивность тепловыделения, кВт; F – площадь горения, м².

Примеры решений

Пример 1. Определить низшую теплоту сгорания уксусной кислоты, если теплота ее образования 485,6 кДж/моль.

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



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

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

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

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

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

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

Пример 3. Определить низшую теплоту сгорания газовой смеси, состоящей из CH_4 – 40 %, C_4H_{10} – 20 %, O_2 – 15 %, H_2S – 5 %, NH_3 – 10 %, CO_2 – 10 %.

Решение. Для каждого горючего компонента смеси по формуле (1.30) находим теплоту сгорания (табл. 8)

Таблица 8

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

По формуле (1.32) определим теплоту сгорания газовой смеси

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

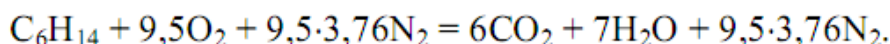
кДж/кмоль.

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

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

П р и м е р 4. Рассчитать теплоту сгорания 1 м³ стехиометрической гексано-воздушной смеси.

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



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

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

Теплоту сгорания 1 м³ гексана определим по формуле (1.30)

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

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

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

Теплоту сгорания 1 м³ стехиометрической гексано-воздушной смеси определим по формуле (1.33)

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

П р и м е р 5. Определить интенсивность тепловыделения на пожаре органической массы (состав в примере 2), если скорость выгорания 0,015 кг/(м²·с), а площадь пожара 150 м².

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

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

Практическая работа №5

Тема «Расчет температуры горения и взрыва»

Объем часов: 2

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, условий взрыва горючих газов, паров горючих жидкостей, тепловой энергии при горении, избыточного давления при взрыве.

Задания.

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

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

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

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

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

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

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

Температура горения и взрыва определяется из уравнения теплового баланса

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

При этом адиабатическая температура горения

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

а действительная температура горения

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

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

При этом

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

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

Расчет температуры горения по формуле (1.37) или (1.38) может быть проведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения (табл. 9)

Таблица 9

№ п/п	Определяемые параметры	Примечание
1	Объем и состав продуктов горения	$V_{\text{пг}i}$ (§1.2) кмоль/кмоль, м ³ /кг
2	Низшая теплота сгорания или количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения (при наличии теплотерь)	$Q_{\text{пг}}$ или Q_H (§ 1.3) кДж/кмоль, кДж/кг
3	Среднее значение энтальпии продуктов горения	$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{H(\text{пг})}}{\sum V_{\text{пг}i}} \quad (1.40)$
4	Температура горения T_1 по средней энтальпии с помощью табл. 1а или 1б, ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5	Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1 (табл. 1а, 1б прил.)	$Q_{\text{пг}}^1 = \sum H_i V_{\text{пг}i} \quad (1.41)$

6	Если $Q'_{\text{пг}} < Q_{\text{н(пг)}}$, то $T_2 > T_1$ (в том случае, если $Q'_{\text{пг}} > Q_{\text{н(пг)}}$, то $T_2 < T_1$)	H_i - энтальпия i -го продукта горения; V_i - объем i -го продукта горения $T_r = T_1 + \frac{(Q_{\text{н(пг)}} - Q'_{\text{пг}})(T_2 - T_1)}{Q''_{\text{пг}} - Q'_{\text{пг}}} \quad (1.42)$
7	$Q''_{\text{пг}}$ по формуле (1.41)	
8	Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{\text{пг}} < Q_{\text{н(пг)}} < Q''_{\text{пг}}$	
9	Температура горения	

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

$$U = C_v T,$$

где C_v – теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(моль·К), кДж/(м³·К).

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

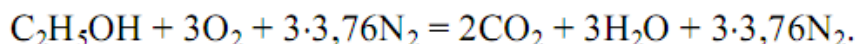
$$T_r = T_0 + \frac{Q_n}{\sum C_{pi}^* V_{\text{пг}i}}, \quad (1.43)$$

Примеры решений

Пр и м е р 1. Определить адиабатическую температуру горения этилового спирта в воздухе.

Р е ш е н и е. Расчет проводим по схеме, приведенной в табл. 1.7.

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



Следовательно, продукты горения состоят из: $V_{\text{CO}_2} = 2$ моля,

$V_{\text{H}_2\text{O}} = 3$ моля, $V_{\text{N}_2} = 11,28$ моля, $V_{\text{пг}} = 16,28$ моля.

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

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

3. Средняя энтальпия продуктов горения

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

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

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

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

6. Сравниваем $Q_{\text{н}}$ и $Q'_{\text{пг}}$, так как $Q'_{\text{пг}} > Q_{\text{н}}$, выбираем температуру горения равной 2000°C .

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2000°C :

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

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

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

П р и м е р 2. Определить адиабатическую температуру горения органической массы, состоящей из С – 60 %, Н – 7 %, О – 25 %, W – 8 %.

Р е ш е н и е. 1. Так как горючее представляет собой сложное вещество, состав продуктов горения рассчитываем по формулам (1.19 – 1.21)

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

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

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

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

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

3. Определим среднюю энтальпию продуктов горения

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

4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м³, первую приближенную температуру выбираем по табл. 1б приложения. Ориентируясь на азот, принимаем $T_1 = 2100^\circ\text{C}$.

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

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

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

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1900 °С

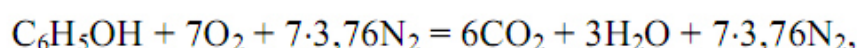
$$Q''_{\text{пр}} = 4579,7 \cdot 1,12 + 3693,5 \cdot 0,88 + 2818,2 \cdot 5,1 = 22498,8 \text{ кДж/кг}.$$

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

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

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

Р е ш е н и е. 1. Определим состав продуктов горения:



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

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

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

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

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

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

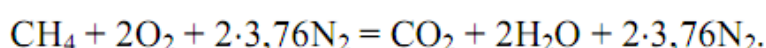
По формуле (1.43) определим действительную температуру горения

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

П р и м е р 4. Рассчитать температуру взрыва метановоздушной смеси стехиометрического состава.

Р е ш е н и е. Расчет проводим по схеме, представленной в табл. 1.7.

1. Объем и состав продуктов горения



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

2. Низшая теплота сгорания:

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

3. Средняя внутренняя энергия продуктов горения

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

4. По табл. 2 приложения принимаем первую приближенную температуру взрыва (по азоту) $T_1 = 2700^\circ\text{C}$.

5. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов горения при T_1 :

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

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

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

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

8. Так как $U_1 > Q_H > U_2$

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

Практическая работа №6

Тема «Расчет максимального давления взрыва»

Объем часов: 2

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты условий взрыва горючих газов, паров горючих жидкостей, тепловой энергии при горении, избыточного давления при взрыве.

Задание.

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

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

Таблица 10

№ варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Масса горючего, кг
1	Диметиловый эфир	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	10
2	Диэтиловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	150
3	Н-бутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	15
4	Нитроэтан	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$	2

№ варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Масса горючего, кг
5	Окись углерода	CO	3
6	Н-пентан	C ₅ H ₁₂	50
7	Пропан	C ₃ H ₈	100
8	Сероводород	H ₂ S	20
9	Этилбензол	C ₈ H ₁₀	15
10	Этилен	C ₂ H ₂	120
11	Толуол	C ₇ H ₈	80
12	Этиленгликоль	C ₂ H ₆ O	5
13	Этан	C ₂ H ₆	60
14	Уксуснобутиловый эфир	C ₆ H ₁₂ O ₂	20
15	Н-гексиловый спирт	C ₆ H ₁₄ O	70
16	Уксусноэтиловый эфир Мети-	C ₄ H ₈ O ₂	30
17	ловый спирт	CH ₄ O	130
18	Пропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	30
19	Метан	CH ₄	10
20	Глицерин	C ₃ H ₅ (OH) ₃	25
21	Этиловый спирт	C ₂ H ₅ OH	75
22	Изобутан	C ₄ H ₁₀	75
23	Аммиак	NH ₃	200
24	Н-гептан	C ₇ H ₁₆	100
25	Анилин	C ₆ H ₇ N	250
26	Н-гексан	C ₆ H ₁₄	30
27	Ацетилен	C ₂ H ₂	2

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

Максимальное давление взрыва – это давление, которое возникает в результате сгорания или детонации парогазовых смесей при условии реализации изобаро-изохорического процесса.

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

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = \frac{P_o \cdot T_{\text{взр}} \cdot n_{\text{пг}}}{n_c \cdot T_o} \quad (4.1)$$

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

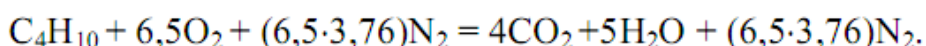
Примеры решений

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

Температура взрыва 2905 К.

Решение.

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



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

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

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

Избыточное давления взрыва ΔP будет равно:

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

Практическая работа №7

Тема «Расчет тротилового эквивалента взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн»

Объем часов: 2

Цель практической работы: научиться осуществлять расчеты условий взрыва горючих газов, паров горючих жидкостей, тепловой энергии при горении, избыточного давления при взрыве.

Задания.

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

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

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

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

Тротиловый эквивалент вещества рассчитывается по формуле:

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

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

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

Из определения тритилового эквивалента взрыва следует, что тритиловый эквивалент взрыва есть условное количество взорвавшегося тритила.

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

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

или с учетом (4.2):

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

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

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

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

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

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

Примеры решений

Пример 1. Рассчитать тротиловый эквивалент взрыва бутана.

Решение.

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

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

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

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

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

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

Решение.

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

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

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

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

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

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

Решение.

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

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

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

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

Практическая работа №8

Тема «Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения)»

Объем часов: 4

Цель практической работы: научить осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, тепловой энергии при горении.

Задания.

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

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

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

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

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

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

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

Существует несколько полуэмпирических методов расчета температурных пределов распространения пламени, однако они мало отличаются

друг от друга по точности.

Температурные пределы воспламенения (ТПВ) жидкостей рассчитывают по температуре кипения

$$t_{\text{н(в)}} = kt_{\text{кип}} - \ell, \quad (3.1)$$

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

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов

$$P_{\text{н(в)}} = \frac{\varphi_{\text{н(в)}} P_0}{100}, \quad (3.2)$$

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

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

Примеры решений

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

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

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

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

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

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{276,6 - 280}{280} 100 = -1,2 \%, \quad \Delta_{\text{в}} = \frac{303 - 312}{312} 100 = -2,9 \%.$$

Следовательно, результаты расчета занижены менее чем на 3 %.

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

Р е ш е н и е. По формуле (3.2) определим давление насыщенного пара ацетона, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения,

$$P_{\text{н}} = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 2230 \text{ Па}; \quad P_{\text{в}} = \frac{13,0 \cdot 101325}{100} = 13172 \text{ Па};$$

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

Из уравнения Антуана (2.4) следует

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

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

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

$$\lg P_{\text{н}} = 1,2235; \quad \lg P_{\text{в}} = 1,9994;$$

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

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

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

Линейной интерполяцией определим ТПВ:

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

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

Практическая работа №9

Тема «Расчет температур вспышки и воспламенения»

Объем часов: 4

Цель практической работы: научить осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, тепловой энергии при горении.

Задание. Рассчитать температуру вспышки (воспламенения) i -го вещества по формуле В.И. Блинова. Значение D_0 взять из справочной литературы или определить по формуле (3.4). Сравнить вычисленные значения температуры вспышки (воспламенения) с имеющимися справочными данными и оценить погрешность расчета (табл. 11).

Таблица 11

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи*
1	Уксусный альдегид	C_2H_4O	Температура вспышки в закрытом тигле
2	Ацетон	C_3H_6O	Температура воспламенения
3	Пропилбензол	C_9H_{12}	Температура вспышки в открытом тигле
4	Окись этилена	C_2H_4O	Температура воспламенения
5	Сероуглерод	CS_2	Температура воспламенения
6	Метиловый спирт	CH_4O	Температура вспышки в закрытом тигле
7	Толуол	C_7H_8	Температура воспламенения
8	Этилбензол	C_8H_{10}	Температура воспламенения
9	Диэтиловый эфир	$(C_2H_5)_2O$	Температура вспышки в открытом тигле
10	Метилэтил кетон	C_4H_8O	Температура воспламенения
11	Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	Температура вспышки в открытом тигле
12	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в открытом тигле
13	Бутиловый спирт (третичный)	$C_4H_{10}O$	Температура воспламенения
14	2-метилбутан	C_5H_{12}	Температура вспышки в закрытом тигле
15	Октан	C_8H_{18}	Температура воспламенения
16	Этилцикло-пентан	C_7H_{14}	Температура воспламенения
17	Уксуснопропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
18	Уксусноэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	Температура воспламенения
19	Пропиловый спирт (вторичный)	C_3H_8O	Температура воспламенения
20	Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	Температура вспышки в открытом тигле
21	Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
22	Бензиловый спирт	C_7H_8O	Температура воспламенения
23	Этиловый спирт	C_2H_6O	Температура вспышки в открытом тигле

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Условие задачи*
24	Ацетон	C_3H_6O	Температура вспышки в закрытом тигле
25	Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	Температура воспламенения
26	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Температура вспышки в закрытом тигле
27	Бромистый бензол	C_6H_5Br	Температура воспламенения

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

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

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

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

где $T_{\text{вс(вп)}}$ – температура вспышки (воспламенения); $P_{\text{нп}}$ – давление насыщенного пара при температуре вспышки (воспламенения); D – коэффициент диффузии паров горючего в воздухе; n – стехиометрический коэффициент при кислороде – количество молей кислорода, необходимое для полного окисления (до CO_2 , H_2O , SO_2) одного моля горючего вещества; A – константа метода определения (табл. 12)

Таблица 12

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

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

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

где D_0 – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; m_i – количество i -го элемента в молекуле горючего вещества; ΔM_i – атомные (элементные) составляющие (табл. 13).

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

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

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

Таблица 13

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

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

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

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

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

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

$$k = 4m_{\text{C}} + m_{\text{H}} + 4m_{\text{S}} + m_{\text{N}} - 2m_{\text{O}} - 2m_{\text{Cl}} - 3m_{\text{F}} - 5m_{\text{Br}},$$

где m_{C} , m_{H} , $4m_{\text{S}}$, m_{N} , m_{O} , m_{Cl} , m_{F} , m_{Br} – количество элементов углерода, водорода, серы, азота, кислорода, хлора, фтора, брома в молекуле горючего вещества.

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

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

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

Примеры решений

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

Решение. 1. Определим значение стехиометрического коэффициента $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH} + 6\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$. Следовательно, $n=6$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Так как $T_2 P_2 > T_{\text{вп}} P_{\text{нп}}$, линейной интерполяцией находим значение температуры воспламенения

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

Справочное значение температуры воспламенения составляет 314 К.

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

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

Решение. Для расчета по формуле (3.5) необходимо знать температуру кипения бензола (C_6H_6) и значений коэффициента k . Температура кипения бензола 353 К или 80 °С. Величину k определим по формуле (4.6)

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

Определим искомую величину температуры вспышки

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

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

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

Результат расчета занижен менее чем на 2 %.

Практическая работа №10

Тема «Расчет стандартной температуры самовоспламенения»

Объем часов: 4

Цель практической работы: научить осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, тепловой энергии при горении.

Задание. Рассчитать стандартную температуру самовоспламенения i -го вещества. Сравнить расчетное значение с имеющимися справочными данными и определить относительную ошибку расчета (табл. 14).

Таблица 14

Вариант	Горючее вещество	Структурная формула
1	1,3-диметил 4-пропил- бензол	$(CH_3)_2C_6H_3(C_3H_7)$
2	2-метил-3-этил- гексан	$C_3H_7-CH-(C_2H_5)CH(CH_3)-CH_3$
3	1-метил-бутанол	$C_3H_7CH(CH_3)OH$
4	Дифенилметан	$CH_2(C_6H_5)_2$
5	Толуол	$CH_3C_6H_5$

Вариант	Горючее вещество	Структурная формула
6	3,3-диметил-пентан	$C_2H_5C(CH_3)_2C_2H_5$
7	Октан	C_8H_{18}
8	1,3-диметил-бутанол-1	$CH_3CH(CH_3)CH_2CH(CH_3)OH$
9	Дифенилэтан	$C_2H_4(C_6H_5)_2$
10	1-метил 2-этил-4-пропилбензол	$(CH_3)(C_2H_5)(C_3H_7)C_6H_3$
11	3,3 диметил-пентанол-1	$C_2H_5C(CH_3)_2C_2H_4OH$
12	2-этил-3-метил-пентанол-1	$C_2H_5CH(CH_3)CH(C_2H_5)CH_2OH$
13	2,2-диметил-гексан	$C_4H_9C(CH_3)_2CH_3$
14	1,2-диметил-4-этилбензол	$C_6H_3(CH_3)_2(C_2H_5)$
15	2,3-диметил-пентан	$CH_3CH(CH_3)CH(CH_3)C_2H_5$
16	Метилдифенил-метан	$(CH_3)CH(C_6H_5)_2$
17	2-метил-пропанол-2	$(CH_3)_3COH$
18	3-метил-пентанол-2	$CH_3CH(OH)CH(CH_3)C_2H_5$
19	2,2,3,3-тетра-метилбутан	$CH_3C(CH_3)_2C(CH_3)_2CH_3$
20	2,3-диметил-октан	$CH_3CH(CH_3)CH(CH_3)C_5H_{11}$
21	4-метил-4-этилгептан	$C_3H_7C(CH_3)(C_2H_5)C_3H_7$
22	3-метил-пентанол-2	$C_2H_5CH(CH_3)CH(OH)CH_3$
23	1,2,3-триметил-гексанол-1	$C_3H_7CH(CH_3)CH(CH_3)CH(CH_3)OH$
24	1,2,3,4-тетра-метилбензол	$C_6H_2(CH_3)_4$
25	2,3,4-триметил-5-этилдекан	$CH_3CH(CH_3)CH(CH_3)CH(CH_3)CH(C_2H_5)C_5H_{11}$
26	3,3,-диметил-4,4,-диэтил-нонан	$C_2H_5C(CH_3)_2C(C_2H_5)_2C_5H_{11}$
27	3,3-диметил-гептанол-2	$CH_3-CH(OH)C(CH_3)_2C_4H_9$
28	2,2,4-триметил-пентан	$CH_3C(CH_3)_2CH_2CH(CH_3)CH_3$
29	3-метил-пентанол-1	$C_2H_5CH(CH_3)CH_2CH_2OH$

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

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

Расчет температуры самовоспламенения проводят в следующей последовательности.

Определяют количество углеродных цепей

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

где $m_{\text{ц}}$ - общее число цепей; M_p - количество функциональных групп в молекуле горючего вещества -CH₃, -ОН, фенил.

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

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

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

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

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

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

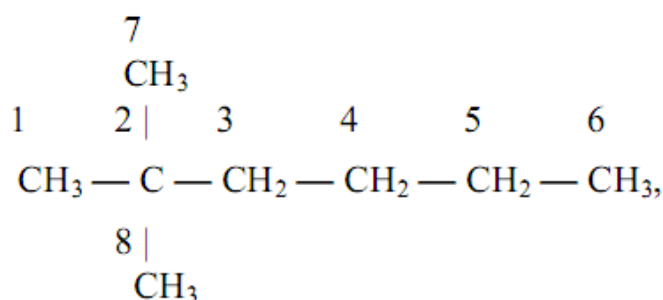
$$t_c = 300 + 116 \sqrt{5 - \ell_{\text{ср}}} \quad \text{при } \ell_{\text{ср}} \leq 5;$$

$$t_c = 300 + 38 \sqrt{\ell_{\text{ср}} - 5} \quad \text{при } \ell_{\text{ср}} > 5.$$

Примеры решений

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

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



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

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

2. Находим длину каждой из шести цепей и среднюю длину

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

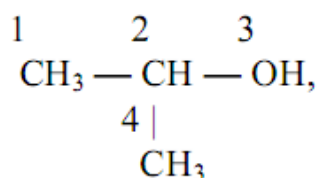
$$\ell_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 6 + 3 \cdot 3}{6} = 4,5.$$

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

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

Пример 2. Рассчитать температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

Решение. Исходя из структурной формулы вещества, определим количество цепей



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

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

2. Находим длину каждой цепи и среднюю длину

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

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

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 3}{3} = 3.$$

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

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

Согласно справочным данным, температура самовоспламенения равна 693 К.

Относительная ошибка расчета с использованием таблицы составляет

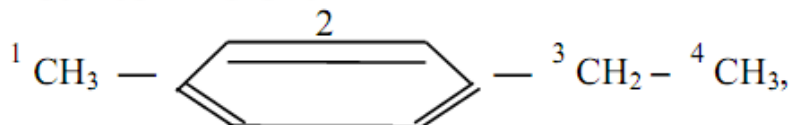
$$\Delta = \frac{706 - 693}{693} 100 = 1,9 \, \%.$$

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

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

Пр и м е р 3. Определить температуру самовоспламенения вещества 1-метил-4-этилбензола.

Р е ш е н и е. 1. Структурная формула вещества



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

2. Определим длину цепей

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

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

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

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

Практическая работа №11

Тема «Расчет интенсивности подачи воды для прекращения горения»

Объем часов: 2

Цель практической работы:

- научить осуществлять расчеты параметров воспламенения и горения веществ, тепловой энергии при горении;
- закрепить механизм огнетушащего действия инертных газов, химически активных ингибиторов, пен, воды, порошков, комбинированных составов;
- научить применять в расчетах теоретическое обоснование параметров прекращения горения газов, жидкостей и твердых материалов

Задание. Найти теоретическую оптимальную интенсивность подачи, требуемый секундный расход огнетушащего вещества, удельный расход и количество стволов, необходимых для тушения пожара древесины на заданной площади. Способ тушения – по поверхности. Исходные данные в таблицах 15 и 16.

Таблица 15

№ п/п	Массовая приведенная скорость выгорания $v_m^{пр}$, кг/(м ² ·с)	Площадь пожара $S_{п}$, м ²	Коэффициент поверхности $K_{п}$	Низшая теплота сгорания $Q_{п}$, кДж/кг	Удельная теплота пиролиза L , кДж/кг
1	0,0075	20	12	18500	2750
2	0,0080	12	10	18700	2780
3	0,0055	25	8	19000	2800
4	0,0060	10	6	19200	2820
5	0,0065	15	5	19500	2840
6	0,0070	8	10	19900	2720
7	0,0085	30	6	20000	2850
8	0,0080	14	12	20300	2880
9	0,0065	35	6	20800	2750
10	0,0060	6	8	21000	2780
11	0,0085	28	4	18500	2800
12	0,0070	15	7	18700	2820
13	0,0075	40	9	19000	2840
14	0,0080	12	12	19200	2720
15	0,0055	25	10	19500	2850
16	0,0060	10	4	19900	2880
17	0,0065	20	6	20000	2750
18	0,0070	12	12	20300	2780
19	0,0085	25	5	20800	2800
20	0,0080	10	8	21000	2820
21	0,0065	15	4	18500	2840
22	0,0060	8	7	18700	2720
23	0,0085	30	9	19000	2850

№ п/п	Массовая приведенная скорость выгорания $v_m^{пр}$, кг/(м ² ·с)	Площадь пожара $S_{п}$, м ²	Коэффициент поверхности $K_{п}$	Низшая теплота сгорания $Q_{н}$, кДж/кг	Удельная теплота пиролиза L , кДж/кг
24	0,0070	14	12	19200	2880
25	0,0055	35	8	19500	2800
26	0,0060	28	6	19900	2820
27	0,0065	6	10	20000	2840
28	0,0070	15	8	20300	2720
29	0,0085	40	6	20800	2850
30	0,0080	12	8	21000	2880

Таблица 16

№ п/п	Время свободного горения, мин	Внешний падающий тепло- вой поток $q_{вн}$, кВт/м ²	Расход ствола, $q_{ств}$, л/с, кг/с	Тип ствола
1	5	36	3,5	РС-50
2	8	38	7,0	РС-70
3	12	40	5,5	РСКО
4	10	42	3,6	РС-50
5	15	35	7,2	РС-70
6	6	32	3,5	РС-50
7	18	40	7,0	РС-70
8	7	36	3,5	РС-50
9	5	34	7,2	РС-70
10	8	35	3,6	РС-50
11	12	45	3,5	РС-50
12	10	32	5,5	РСКО
13	15	36	7,0	РС-70
14	6	38	3,6	РС-50
15	18	30	7,0	РС-70
16	7	32	3,6	РС-50
17	15	35	3,5	РС-50
18	8	40	7,0	РС-70
19	12	45	5,5	РСКО
20	10	42	7,2	РС-70
21	15	38	3,5	РС-50
22	6	30	3,6	РС-50
23	18	45	7,2	РС-70
24	7	38	3,5	РС-50
25	5	36	5,5	РСКО
26	8	28	7,2	РС-70
27	12	40	5,5	РСКО
28	10	45	3,6	РС-50
29	15	35	7,0	РС-70
30	6	42	3,5	РС-50

Методические указания по ходу выполнения работы

Расчетные формулы

Согласно тепловой теории потухания, прекращение пламенного горения наступает в результате понижения температуры пламени до некоторого критического значения, называемого *температурой потухания* $T_{\text{пот}}$. При тушении пожаров, как правило, это достигается применением различных огнетушащих веществ.

При этом одни огнетушащие вещества воздействуют главным образом на процессы, протекающие непосредственно в объеме зоны горения, и практически не затрагивают поверхность конденсированного горючего. Это вещества, применяемые в газообразном, парообразном или аэрозольном состоянии: нейтральные газы, химически активные ингибиторы, аэрозоли и т. д. Другие оказывают косвенное воздействие на процессы, протекающие в газовой фазе. С их помощью уменьшают выход горючих газов путем охлаждения поверхности горючего или ее изолирования от зоны горения (пены, порошки).

Кроме того, некоторые огнетушащие вещества способны работать одновременно в газовой фазе и на поверхности горючего. Например, распыленная вода в зависимости от размера капель может: *полностью испаряться в пламени*, оказывая объемное действие только на зону горения; *частично испаряться в пламени*, оказывая и объемное, и поверхностное действие; *практически не взаимодействовать* с пламенем, оказывая чисто поверхностное действие.

На практике применяются два основных способа подачи огнетушащих веществ: в объем зоны горения («тушение по объему») и на поверхность горючего («тушение по поверхности»).

При объемном тушении огнетушащее вещество может подаваться локально, т. е. непосредственно в зону горения – над локальным очагом пожара, в факел газового фонтана или в объем помещения – тушение методом затопления. В обоих случаях горение прекращается, когда концентрация подаваемого вещества становится равной огнетушащей и температура пламени снижается до температуры потухания.

При тушении по поверхности температура пламени достигает температуры потухания и горение прекращается, когда массовая скорость выгорания падает ниже предельного значения, при котором концентрация горючих газов или паров над поверхностью становится меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР).

В целом процесс тушения для всех видов горючих веществ и материалов характеризуется следующими параметрами:

Время тушения τ_t , с, мин, – время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения.

Интенсивность подачи J , л/(м²·с) – количество огнетушащего вещества, подаваемое на 1 м² площади пожара в секунду.

Удельный расход $q_{уд}$ – количество огнетушащего вещества, л, кг, израсходованное за время тушения в расчете либо на 1 м² площади пожара, либо на 1 м³ объема помещения, либо на 1 м³ фонтанирующего газа.

Время тушения и затраты огнетушащего вещества зависят от интенсивности подачи. Характерные графики зависимости времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи показаны на рис. 4.1. График 1 на данном рисунке называется «кривая тушения».

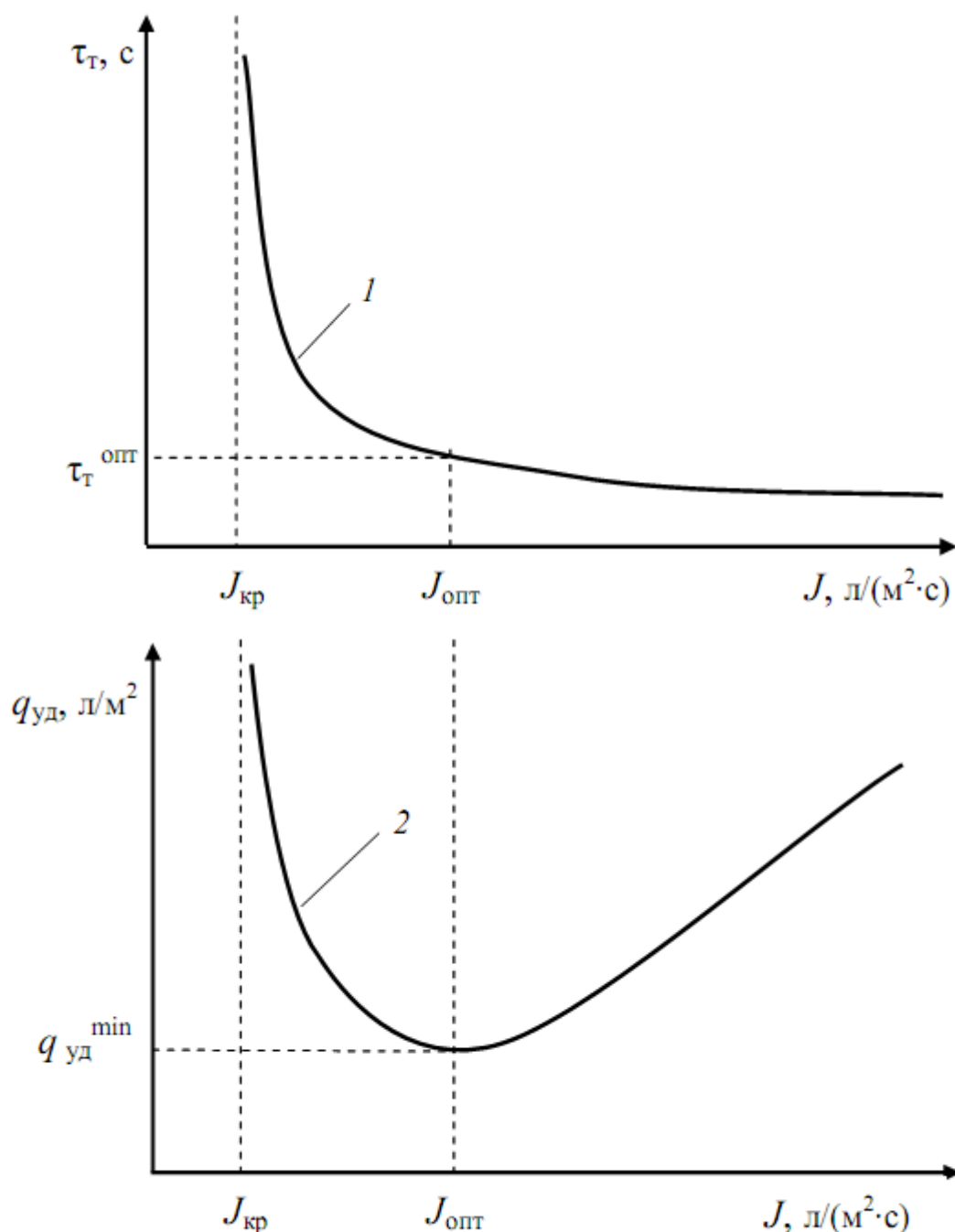


Рис. 4.1. Зависимость времени тушения 1 и удельного расхода 2 от интенсивности подачи огнетушащего вещества

Время тушения зависит от соотношения фактической и критической интенсивности подачи. Если фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества оказывается равной критической, тушение не достигается, $\tau_t \rightarrow \infty$. При тушении пенами критической является интенсивность подачи, равная интенсивности разрушения пены; при тушении газовыми составами и аэрозолями – интенсивность утечки огнетушащего вещества из заполняемого объема помещения; при тушении водой по поверхности – интенсивность подачи, компенсирующая лучистый тепловой поток к горящей поверхности от собственного пламени и внешних источников излучения.

Интенсивность подачи, при которой удельный расход огнетушащего вещества минимален, считается оптимальной $J_{\text{опт}}$.

Эффективность применяемого огнетушащего вещества и способа подачи можно оценить с помощью показателя эффективности тушения $\Pi_{\text{эт}}$ и коэффициента использования $K_{\text{и}}$.

Выбор огнетушащих веществ и способов их подачи зависит от того, какие условия необходимы и достаточны для прекращения горения данного вида горючего вещества в данных условиях пожара.

Прекращение горения газов (газовых фонтанов)

Для прекращения горения газов необходимо и достаточно отобрать непосредственно от зоны горения такое количество теплоты, чтобы температура факела понизилась до температуры потухания. Охлаждать исходное горючее или окислитель в данном случае бесполезно, так как газы воспламеняются и горят при любой реально достижимой температуре. При этом механизмы отбора тепла в объеме пламени зависят от применяемого огнетушащего вещества.

Удельное количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения для снижения температуры пламени до температуры потухания $Q^{\text{треб}}$, кДж/м³, находится по следующим формулам:

$$Q^{\text{треб}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{пг}i} (H_{\text{г}i} - H_{\text{пот}i}); \quad (4.1)$$

$$\text{или} \\ Q^{\text{треб}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{пг}}^{T_{\text{пот}}}, \quad (4.2)$$

где $V_{\text{пг}i}$ – удельный объем i -го продукта горения, м³/м³; $H_{\text{г}i}$ и $H_{\text{пот}i}$ – энтальпия i -го продукта горения при температурах горения и потухания соответственно, кДж/м³; $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания, кДж/м³; $Q_{\text{пг}}^{T_{\text{пот}}}$ – суммарное удельное теплосодержание продуктов горения стехиометрической смеси при температуре потухания, кДж/м³.

За температуру потухания принимается адиабатическая температура горения предельно обедненной газовой смеси – смеси на НКПР. Методика расчета температуры горения изложена в учебных пособиях [1, 2].

Температура горения смеси газов на НКПР находится с учетом избытка воздуха $\Delta V_{\text{в}}, \text{ м}^3/\text{м}^3$, в ее составе, который находится по известной формуле

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0(\alpha_{\text{н}} - 1), \quad (4.3)$$

где $V_{\text{в}}^0$ – теоретический объем воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе.

Здесь

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{100 - \varphi_{\text{н}}}{V_{\text{в}}^0 \varphi_{\text{н}}}, \quad (4.4)$$

где $\varphi_{\text{н}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.).

Температуру потухания можно оценить также по эффективной энергии активации реакции горения:

$$T_{\text{пот}}^0 = T_{\text{г}}^0 \left(1 - \frac{3RT_{\text{г}}^0}{E}\right), \quad (4.5)$$

где $T_{\text{г}}^0$ – адиабатическая температура горения, К; R – универсальная газовая постоянная, $8,31 \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; E – эффективная энергия активации реакции горения данного вещества.

Подавать огнетушащие вещества в зону горения можно различными техническими средствами как извне, так и вместе с потоком горючего или окислителя. Например, на тушение газового фонтана воду можно подавать извне лафетными стволами, автомобилями газоводяного тушения, а также закачкой внутрь фонтанирующей скважины. Наиболее эффективным способом тушения пламени газового фонтана является импульсная (залповая) подача огнетушащего порошка в объем зоны горения.

Прекращение горения жидкостей

Необходимым условием для тушения жидкости также является прекращение горения в газовой фазе. Если удастся создать условия, требуемые для потухания пламени во всем объеме зоны горения одновременно, то (при отсутствии внешних источников зажигания и температуре окружающей среды ниже температуры самовоспламенения) этого будет также и достаточно для тушения пожара. Это достигается подачей огнетушащих веществ объемного или объемно-поверхностного действия (газовых или порошковых составов) различными техническими средствами либо непосредственно в зону горения, либо в объем помещения (газовые или аэрозольобразующие составы).

Вместе с тем прекратить горение жидкости можно уменьшая скорость испарения путем отвода тепла не от пламени, а от поверхностного слоя. По мере уменьшения концентрации горючего в зоне горения температура пламени понижается. Если температуру поверхности понизить до температуры вспышки, концентрация горючего над поверхностью упадет до нижнего концентрационного предела, температура пламени достигнет температуры потухания и горение прекратится.

Условием *необходимым и достаточным* для тушения жидкости охлаждением поверхности является понижение ее температуры от температуры кипения до температуры вспышки. Физически это означает, что массовую скорость выгорания надо уменьшить до такого минимального значения, при котором концентрация пара над поверхностью не превышает нижний концентрационный предел распространения пламени. Для этого интенсивность теплоотвода должна быть не ниже интенсивности теплового потока, затрачиваемого в единицу времени на образование горючей концентрации пара над поверхностью жидкости и формирование прогретого слоя. Для жидкостей данное условие описывается следующим уравнением:

$$q_{\text{отв}}^{\text{треб}} = [c (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r] v_{\text{м}}^{\text{уд}} + Q_{\text{зап}}/\tau_{\text{т}}, \quad (4.6)$$

где c – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К); $T_{\text{кип}}$ и $T_{\text{всп}}$ – температура кипения и вспышки соответственно, °С; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг; $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с); $Q_{\text{зап}}$ – количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое, кДж/м²; $\tau_{\text{т}}$ – время тушения, с.

Тепло $Q_{\text{зап}}$, кДж/м², аккумулируемое прогретым слоем жидкости, находится по формуле

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\lambda \rho}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}), \quad (4.7)$$

где λ – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К); ρ – плотность жидкости, кг/м³; $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с).

Если огнетушащее вещество подается с интенсивностью J , поступает на поверхность прогретого слоя без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность $Q_{\text{охл}}$, то интенсивность теплоотвода будет равна $JQ_{\text{охл}}$. Из уравнения (4.6) получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r] v_{\text{м}}^{\text{уд}}}, \quad (4.8)$$

где $Q_{\text{охл}}$ – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л или кДж/кг.

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества – это максимальное количество тепла, которое может быть отведено единицей объема или массы огнетушащего вещества от 1 м² поверхности горения или 1 м³ объема зоны горения.

Значение интенсивности подачи, при которой знаменатель формулы (4.8) обращается в 0, является критической. В этом случае $\tau_t \rightarrow \infty$ и тушение становится невозможным. Из формулы (4.8) следует, что критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества $J_{кр}$, л/(м²·с) или кг/(м²·с), при таком способе тушения жидкости равна

$$J_{кр} = \frac{[c(T_{кип} - T_{всп}) + r]v_m^{уд}}{Q_{охл}}. \quad (4.9)$$

Выбор конкретного огнетушащего вещества зависит от его способности выполнить все условия, необходимые и достаточные для прекращения горения. Например, очевидно, что охладить гептан водой до температуры вспышки -4 °С физически невозможно. Для этой цели, в данном случае, подходят: жидкий азот, твердая гранулированная углекислота или другие огнетушащие вещества с температурой кипения ниже -4 °С. Если по каким-то причинам они недоступны, следует изолировать зону горения от поверхности жидкости слоем пены. При этом сначала уменьшается скорость испарения, что приводит к понижению температуры пламени до температуры потухания вследствие уменьшения концентрации горючего в зоне химических реакций. Затем выход пара прекращается, и пока слой пены или порошка сохраняет изолирующую способность, повторное воспламенение жидкости становится невозможным.

Прекращение горения твердых горючих материалов

Гомогенное (пламенное) горение твердых горючих материалов (ТГМ) обусловлено образованием горючих газов в результате термического разложения вещества – пиролиза.

Для гомогенного горения необходимо, чтобы скорость выделения газообразных продуктов пиролиза и приток воздуха были достаточны для образования над поверхностью материала горючей смеси, т. е. смеси, в которой концентрация горючего газа не ниже НКПР.

Непрерывное поступление горючих паров и газов в зону горения поддерживается интенсивным тепловым потоком к поверхности ТГМ от собственного пламени и внешних источников.

Пиролиз некоторых ТГМ начинается после плавления и протекает в тонком поверхностном слое. Как правило, это линейные несшитые полимеры (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты). Такие материалы, подобно жидкости, выгорают без остатка. Удельное количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое плавящихся ма-

териалов $Q_{\text{зап}}$, определяется по формуле (4.7).

Горение ряда ТГМ сопровождается образованием углистого слоя. Это древесина, древеснонаполненные пластмассы, материалы на основе целлюлозы, сшитые полимерные материалы – реактопласты. Для них характерны два вида горения – гомогенное (пламенное) и гетерогенное (тление). Их соотношение зависит от интенсивности тепло- и газообмена у поверхности горения. В процессе горения углистый слой аккумулирует значительное количество тепла. Температура его поверхности достигает 600 – 700 °С, что является достаточным для зажигания горючих газовых смесей.

Удельный запас тепла $Q_{\text{зап}}$, кДж/м², накопленный в углистом слое твердого материала за время свободного горения, равен

$$Q_{\text{зап}} = q_{\text{зап}} \tau_{\text{гор}}, \quad (4.10)$$

где $q_{\text{зап}}$ – тепловой поток, аккумулируемый пиролизующимся слоем, кВт/м²; $\tau_{\text{гор}}$ – время свободного горения, с.

Значение $q_{\text{зап}}$, кВт/м², определяется из уравнения теплового баланса горения:

$$q_{\text{вн}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) + q_{\text{зап}} + q_{\text{конв}}, \quad (4.11)$$

где $q_{\text{вн}}$ – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность, кВт/м²; $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с); L – теплота, затрачиваемая на пиролиз (газификацию) материала, кДж/кг; $L_{\text{экз}}$ – экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза, кДж/кг; $q_{\text{конв}}$ – конвективный тепловой поток, исходящий от поверхности, кВт/м².

Откуда

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}}. \quad (4.12)$$

Величина $q_{\text{конв}}$, кВт/м², определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза:

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \quad (4.13)$$

где c_p – средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}$, $c_p \approx 3,7$ кДж/(кг·К); $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности при горении, $T_{\text{пов}} \approx 700$ °С; $T_{\text{пир}}$ – температура пиролиза, $T_{\text{пир}} \approx 200$ °С.

Теплота пиролиза L зависит от вида горючего материала (см. прил. 5). Экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза $L_{\text{экз}}$ присутствует при горении древесины и содержащих ее композиционных материалов. В расчетах $L_{\text{экз}}$ приближенно можно принимать равным 6 % от низшей теплоты сгорания.

В результате для ТГМ снижение температуры горения до температуры потухания без охлаждения прогретого слоя является условием тушения необходимым, но недостаточным, поскольку прогретый слой конденсированной фазы (твердого вещества или расплава) способен в течение некото-

рого времени поставлять нагретые продукты разложения и испарения в зону горения и являться источником их воспламенения. Поэтому при их тушении рассматривают еще одно достаточное условие – снижение температуры прогретого слоя до температуры начала пиролиза или плавления.

Наиболее эффективным способом тушения ТГМ любого типа является принудительное охлаждение непосредственно поверхности горения. Время прекращения горения определяется интенсивностью теплоотвода от поверхности и термическим сопротивлением прогретого слоя.

Условие тушения ТГМ выполняется, если огнетушащее вещество подается на поверхность горения с такой интенсивностью, что за время тушения отбирает тепло, поступающее к поверхности, а также тепло, запасенное в прогретом слое за время горения:

$$Q_{\text{отв}} \geq Q_{\text{треб}} = Q_{\text{пов}} + Q_{\text{зап}}, \quad (4.14)$$

где $Q_{\text{отв}}$ – тепло, отводимое огнетушащим веществом от 1 м² поверхности, кДж/м²; $Q_{\text{пов}}$ – тепло, поступающее к поверхности, кДж/м²; $Q_{\text{зап}}$ – удельное теплосодержание прогретого слоя, кДж/м².

Здесь

$$Q_{\text{пов}} = q_{\text{луч}} \tau_{\text{т}}, \quad (4.15)$$

где $q_{\text{луч}}$ – плотность суммарного теплового потока, падающего от собственного пламени и внешних источников излучения, кВт/м²; $\tau_{\text{т}}$ – время тушения, с.

Если подаваемое огнетушащее вещество поступает к поверхности без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность, количество тепла, отбираемое за время $\tau_{\text{т}}$ от 1 м² поверхности горения $Q_{\text{отв}}$, будет равно

$$Q_{\text{отв}} = J Q_{\text{охл}} \tau_{\text{т}}, \quad (4.16)$$

где J – интенсивность подачи, л/(м²·с) или кг/(м²·с); $\tau_{\text{т}}$ – время подачи огнетушащего вещества, с.

Отсюда теоретическое, минимально возможное, время тушения по механизму отвода тепла от поверхности $\tau_{\text{т}}$, с, равно

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}}. \quad (4.17)$$

При $J = q_{\text{вн}}/Q_{\text{охл}}$, т. е. когда подача огнетушащего вещества на поверхность компенсирует только внешние тепловые потоки, $\tau_{\text{т}} \rightarrow \infty$. Такая интенсивность подачи является критической $J_{\text{кр}}$.

При $J \rightarrow \infty$ время тушения $\tau_{\text{т}} \rightarrow 0$. Однако минимальное время прекращения горения не может быть меньше времени охлаждения всего про-

гретого слоя τ_0 . Это физическое время определяется термическим сопротивлением материала. Например, при охлаждении древесины водой оно составляет примерно 20 с.

Таким образом, теоретическое время прекращения горения при тушении по поверхности определяется по формуле

$$\tau_{\tau} = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0. \quad (4.18)$$

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества зависит от его агрегатного состояния, теплоты фазового перехода, теплоемкости, способа тушения.

Умножив обе части формулы (4.18) на J , получим выражение для удельного расхода:

$$q_{\text{уд}} \geq \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} J + \tau_0 J. \quad (4.19)$$

Оптимальная интенсивность подачи, при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества (см. рис. 4.1), находится дифференцированием уравнения (4.19) по J , л/(м²·с). Приравняв первую производную $dq_{\text{уд}}/dJ$ к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи:

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left(\sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right). \quad (4.20)$$

Огнетушащие вещества

В настоящее время все огнетушащие вещества принято разделять на группы:

- вода и водные растворы;
- пены;
- газовые огнетушащие составы;
- порошковые огнетушащие составы;
- аэрозолеобразующие огнетушащие составы.

Вода и водные растворы являются огнетушащими веществами преимущественно охлаждающего действия. С помощью воды прекращение горения достигают, охлаждая как зону горения, так и горящий материал. Кроме того, водяной пар оказывает дополнительное разбавляющее действие. В результате температура пламени достигает температуры потухания.

Водные растворы содержат различные добавки, снижающие поверхностное натяжение (пенообразователи, смачиватели), уменьшающие или, наоборот, увеличивающие вязкость воды и др. Содержание этих веществ в

рабочих растворах, как правило, не превышает 4 % и их влияние на теплофизические свойства воды можно не учитывать.

Значения основных теплофизических параметров воды, используемые при расчетах, приведены ниже:

температура кипения $T_{\text{кип}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;

плотность $\rho = 1000\text{ кг/м}^3$;

удельная теплоемкость $c = 4,19\text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ в интервале $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$;

теплота парообразования $r = 2260\text{ кДж/кг}$;

средняя удельная теплоёмкость водяного пара – $c_p^{\text{пара}} = 2,30\text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ в интервале $100\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теоретический охлаждающий эффект воды $Q_{\text{охл}}$, кДж/л:

при объёмном тушении

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r + c_p^{\text{пара}}(T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}), \quad (4.21)$$

при тушении по поверхности

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r, \quad (4.22)$$

где $T_{\text{пот}}$ – температура потухания, $^{\circ}\text{C}$.

При тушении по поверхности водой, имеющей $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{\text{охл}} = 4,20(100 - 20) + 2260 = 2596\text{ кДж/л}$. В расчетах принимается $Q_{\text{охл}} = 2600\text{ кДж/л}$.

Разбавляющий эффект воды заключается в том, что при полном ее испарении из 1 л образуется 1720 л пара, который является огнетушащим веществом.

Пены относятся к веществам преимущественно изолирующего действия. Соотношение изолирующей и охлаждающей способности пен зависит от их кратности, а также от природы поверхностно-активного вещества, на основе которого получен пенообразователь. Кратность $K_{\text{пены}}$ – отношение объема пены к объему ее жидкой фазы. По этому показателю пены делятся на низкократные – $K = 4 - 20$, среднекратные – $K = 21 - 200$ и высокократные – K более 200. Системы с кратностью менее 4 относятся к пеноэмульсиям. При прочих равных условиях, чем выше кратность пены, тем больше изолирующая способность и меньше охлаждающая.

При тушении пеной твердых горючих материалов главным является процесс охлаждения. При этом слой пены, нанесенный на поверхность горючего материала, экранирует внешний лучистый тепловой поток, который падает от непотушенных участков, соседних горящих поверхностей и т. п. Постепенно разрушаясь, пена выделяет раствор пенообразователя, который пропитывает горючий материал и понижает его температуру. Поскольку раствор пенообразователя имеет меньшее поверхностное натяжение, чем вода, он обладает большей впитывающей способностью.

Процесс прекращения горения жидкости пеной можно условно разделить на две стадии: растекание пены по зеркалу жидкости и накапливание изолирующего слоя. На обеих стадиях происходит разрушение пены под действием различных факторов. Накопление пены на поверхности горючего может начаться, если интенсивность ее подачи больше интенсивности разрушения. Необходимо помнить, что интенсивность подачи J всегда задается в л/(м²·с) по пенообразующему раствору. Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой, называется *критической* $J_{кр}$.

Очевидно, что объем слоя пены, накопленного за время тушения, равен разности объемов пены, поданной и разрушенной. Соответственно интенсивность накопления пены $J_{нак}$ равна $J - J_{кр}$. Отсюда критическая интенсивность подачи раствора равна

$$J_{кр} = J - J_{нак}. \quad (4.23)$$

Если известен объем пены $V_{нак}$, накопленный за время тушения, величину $J_{нак}$ можно вычислить по формуле

$$J_{нак} = \frac{V_{нак} 10^3}{\tau S_p K_{пены}} = \frac{HS_p 10^3}{\tau S_p K_{пены}} = \frac{H 10^3}{K_{пены}}, \quad (4.24)$$

где H – толщина накопленного слоя пены, м; S_p – площадь зеркала жидкости (резервуара), м²; τ – время подачи пены, с; $K_{пены}$ – кратность пены; коэффициент 10^3 необходим для перевода кубических метров в литры.

Оптимальной является интенсивность подачи $J_{опт}$, при которой удельный расход $q_{уд}$ раствора пенообразователя минимален. Зависимость времени тушения пеной от интенсивности подачи раствора может быть описана уравнением общего вида:

$$\tau_t = B \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}}, \quad (4.25)$$

где B – коэффициент, зависящий от вида пенообразователя и параметров пены, имеющий размерность времени.

Так как $q_{уд} = J\tau_t$, можно записать:

$$q_{уд} = JB \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}}. \quad (4.26)$$

Для определения $J_{опт}$ строят график зависимости $q_{уд} = f(J)$ и находят значение J , при котором $q_{уд}$ минимален. Коэффициент B можно принять равным 1, так как он не влияет на координаты минимума.

Характеристикой изолирующей способности пены является высота тушащего слоя $H_{пены}$, м:

$$H_{пены} = 10^{-3}(J - J_{кр})K_{пены}\tau_t, \quad (4.27)$$

где $J_{кр}$ – критическая интенсивность подачи, л/(м²·с); $K_{пены}$ – кратность пены; 10^{-3} – коэффициент перевода литров в кубические метры.

Газовые огнетушащие составы являются веществами преимущественно объемного действия. Они прекращают горение в газовой фазе. К этому классу огнетушащих веществ относятся нейтральные газы (диоксид углерода, азот, водяной пар, гелий, аргон) и химически-активные ингибиторы – хладоны. Их эффективность при тушении твердых горючих материалов, склонных к тлению, определяется теплоемкостью и способностью ингибировать горение на твердой поверхности.

При тушении пожаров в помещениях методом затопления пламенное горение прекращается, когда концентрация газового состава во всем объеме становится равной огнетушащей $\phi_{огн}$. Материальный баланс процесса заполнения негерметичного помещения, в упрощенном виде, описывается следующим уравнением:

$$v_{гос} d\tau = V_{пом} da + v_{пг} a d\tau, \quad (4.28)$$

где $v_{гос}$ – объемный расход газового огнетушащего состава, м³/с; $v_{пг}$ – расход продуктов горения через проемы, щели и т.п., м³/с; $V_{пом}$ – объем помещения, м³; a – текущее значение объемной доли газового состава, $a = \phi/100$; τ – время, с.

Откуда после ряда преобразований получается зависимость времени тушения пламени в объеме помещения от расхода газового состава:

$$\tau_T = \frac{2V_{пом} a_{огн}}{2v_{гос} - v_{пг} a_{огн}}. \quad (4.29)$$

Здесь

$$v_{пг} = \frac{2}{3} \mu \frac{(S_{пр} - S_1)}{\rho_{пг}} \sqrt{2g(H_{пр} - h_0) \rho_{пг} (\rho_v - \rho_{пг})}, \quad (4.30)$$

где μ – коэффициент сопротивления проема ($\mu \approx 0,65$); $H_{пр}$ – высота проема, м; h_0 – высота плоскости равных давлений относительно нижней отметки проема, м; $\rho_{пг}$ – плотность продуктов горения, кг/м³; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; $S_{пр}$ – площадь проема, м²; S_1 – площадь приточной части проема, м² ($S_1 = B_{пр} h_0$, где $B_{пр}$ – ширина проема, м).

Из формулы (4.29) следует, что критический расход газового состава, при котором $\tau_T \rightarrow \infty$, равен

$$v_{гос}^{кр} = \frac{1}{2} v_{пг} a_{огн}. \quad (4.31)$$

Массовый секундный расход газа $g = v_{\text{гос}} \rho_{\text{гос}}$, кг/с. Удельный расход газа $q_{\text{уд}}$, кг/м³, равен

$$q_{\text{уд}} = g \tau_{\text{г}} / V. \quad (4.32)$$

Для прекращения гетерогенного горения необходимо дополнительно охлаждать поверхность материала до температуры, как минимум, начала пиролиза. На что требуется дополнительное количество газа. Поэтому огнетушащая концентрация газового состава задается больше, чем при тушении нетлеющих материалов.

Огнетушащие концентрации газовых составов, используемые при расчете автоматических установок пожаротушения, даны в прил. 6.

Наибольшей охлаждающей способностью обладают газовые огнетушащие составы, выбрасываемые из подающего устройства в жидком или твердом состоянии.

Диоксид углерода при повышении давления при температурах от +31 до -57 °С сжижается. Ниже -57 °С он переходит в твердое состояние (сухой лед). При обратном переходе в газообразное состояние из 1 кг жидкого диоксида углерода образуется примерно 500 л газа. Теплота парообразования жидкого CO₂ при 0 °С равна 235,1 кДж/кг.

Если выброс газообразного диоксида углерода происходит в режиме дросселирования, он переходит в твердое состояние и выбрасывается в виде хлопьев, похожих на снежные, с температурой -78,5 °С. В очаге пожара они превращаются в газ, минуя жидкую фазу. Такое же превращение испытывает твердый гранулированный диоксид углерода.

Теплота сублимации твердого диоксида углерода 574,0 кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газообразного CO₂ в интервале 0–1000 °С составляет 1,99 кДж/(м³·К) или 1,47 кДж/(кг·К).

Теоретический охлаждающий эффект диоксида углерода $Q_{\text{охл}}$, кДж/кг:

- твердого при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = r + c_p(T_{\text{пот}} - T_0), \quad (4.33)$$

где $r = 574,0$ кДж/кг; $c_p = 1,47$ кДж/(кг·К); $T_0 = -78,5$ °С; $T_{\text{пот}}$ – температура потухания, $T_{\text{пот}} = 900 - 1000$ °С.

- твердого при охлаждении прогретого слоя жидкости:

$$Q_{\text{охл}} = r + c_p(T_{\text{кип}} - T_0), \quad (4.34)$$

где $r = 574,0$ кДж/кг; $c_p = 1,0$ кДж/(кг·К); $T_0 = -78,5$ °С; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости, °С.

- газообразного при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = c_p(T_{\text{пот}} - T_0), \quad (4.35)$$

где $c_p = 1,47$ кДж/(кг·К); $T_0 = -78,5$ °С; $T_{\text{пот}}$ – температура потухания, $T_{\text{пот}} = 900 - 1000$ °С.

Азот сжижается при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. При обратном переходе 1 л жидкого азота, испаряясь и нагреваясь до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, образует 250 л газа. Удельная теплота парообразования жидкого азота при температуре кипения – 199 кДж/кг . Средняя удельная теплоемкость газообразного азота $1,05\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ в интервале $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Порошковые огнетушащие составы (ПОС) по основному назначению делятся на классы: ABC, BC, ABCD и D. Порошковые составы классов ABC и ABCD являются огнетушащими веществами объемно-поверхностного действия, BC – преимущественно объемного, D – поверхностного действия (порошки целевого назначения, предназначены для тушения металлов, металлоорганических соединений). Все ПОС способны прекращать горение электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В.

ПОС класса ABC при нагреве до температуры порядка $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинают плавиться с поглощением тепла. Кроме того, на тлеющей поверхности они образуют вязкую полимерную пленку плава, затрудняющую доступ кислорода. Экспериментальный охлаждающий эффект $Q_{\text{охл}}$ порошков данного класса на основе диаммонийфосфата при нагреве до $600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (что примерно соответствует температуре поверхности древесины при горении) составляет $1769\text{--}2000\text{ кДж/кг}$. На практике показателем огнетушащей способности порошков класса ABC является удельный расход, кг/м^2 , порошка на тушение модельного очага класса А (штабеля из брусков древесины).

ПОС класса BC на горячей поверхности твердых материалов практически не удерживаются, изолирующего и охлаждающего действия не оказывают. Показателем огнетушащей способности порошков класса BC является удельный расход, кг/м^2 , порошка на тушение модельного очага класса В (противня с горючей жидкостью).

Аэрозолеобразующие огнетушащие составы (АОС) относятся к веществам объемного действия. Они представляют собой твердотопливные композиции. Огнетушащий состав образуется в результате их сжигания. Продуктом горения является сложная многокомпонентная смесь, состоящая из газовой фазы, включающей диоксид углерода, азота, и конденсированной фазы, состоящей из мельчайших, размером около 1 мкм , твердых частиц. Огнетушащая способность аэрозолей в несколько раз выше, чем у газовых огнетушащих составов – как нейтральных газов, так и хладонов. Она характеризуется величиной минимального тушащего удельного расхода, кг/м^3 .

Для расчета параметров тушения используют следующие основные формулы.

Интенсивность подачи J , л/(м²·с), кг/(м²·с):

$$J = \frac{g_{\text{ов}}}{S_{\text{п}}}, \quad (4.36)$$

где $g_{\text{ов}}$ – секундный расход огнетушащего вещества, л/с, кг/с; $S_{\text{п}}$ – площадь пожара, м².

Удельный расход $q_{\text{уд}}$, л/м², кг/м², л/м³, кг/м³:

– при тушении по поверхности

$$q_{\text{уд}} = J\tau_{\text{т}} = \frac{g_{\text{ов}}}{S_{\text{п}}} \tau_{\text{т}}; \quad (4.37)$$

– при объемном тушении

$$q_{\text{уд}} = \frac{g_{\text{ов}}}{V_{\text{пом}}} \tau_{\text{т}}, \quad (4.38)$$

где $V_{\text{пом}}$ – объем помещения, м³.

Теоретический удельный расход $q_{\text{уд}}^0$, л/м³, л/м², кг/м², кг/м³:

$$q_{\text{уд}}^0 = \frac{Q^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}}, \quad (4.39)$$

где $Q^{\text{треб}}$ – количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения или поверхности материала для снижения температуры пламени до температуры потухания, кДж/м³, кДж/м²; $Q_{\text{охл}}$ – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л, кДж/кг, кДж/м³.

Теоретическая интенсивность подачи J^0 при тушении пламени над поверхностью, л/(м²·с), кг/(м²·с):

$$J^0 = \frac{q_{\text{отв}}^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}}, \quad (4.40)$$

где $q_{\text{отв}}^{\text{треб}}$ – удельная интенсивность теплоотвода от пламени, требуемая для его охлаждения до температуры потухания, кВт/м²; $Q_{\text{охл}}$ – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л, кДж/кг.

Требуемую интенсивность теплоотвода можно приближенно оценить по формуле

$$q_{\text{отв}}^{\text{треб}} = (1 - f)kq_{\text{п}}', \quad (4.41)$$

где f – коэффициент теплопотерь излучением; k – коэффициент снижения температуры пламени до температуры потухания; $q_{\text{п}}'$ – приведенная теплота пожара, $q_{\text{п}}' = \beta v_{\text{м}}^{\text{пр}} Q_{\text{н}}$, кВт/м².

Для жидкостей $f \approx 0,3$; $k \approx 0,28$. Для твердых материалов $f \approx 0,4$; $k \approx 0,22$.

Показатель эффективности тушения $\Pi_{\text{эт}}$:

$$\Pi_{\text{эт}} = \frac{1}{J \tau_{\text{т}}} = \frac{1}{q_{\text{уд}} \tau}. \quad (4.42)$$

Коэффициент использования огнетушащего вещества $K_{\text{и}}$:

– теоретический

$$K_{\text{и}}^0 = \frac{q_{\text{уд}}^0}{q_{\text{уд}}}, \quad (4.43)$$

где $q_{\text{уд}}^0$ – теоретический удельный расход, л/м²; $q_{\text{уд}}$ – фактический удельный расход, л/м²;

– практический

$$K_{\text{и}} = \frac{q_{\text{уд}}^{\min}}{q_{\text{уд}}}, \quad (4.44)$$

где $q_{\text{уд}}^{\min}$ – минимальный при данной площади пожара удельный расход огнетушащего вещества, полученный при тушении реальных пожаров, л/м².

При тушении ординарных пожаров водой [4]:

$$\lg q_{\text{уд}}^{\min} = 1,1 \lg S_{\text{п}} + 0,302. \quad (4.45)$$

При $S_{\text{п}} \geq 40 \text{ м}^2$

$$q_{\text{уд}}^{\min} = 0,5 S_{\text{п}}. \quad (4.46)$$

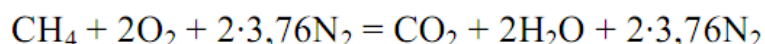
Примеры решений

Пример 1.

Рассчитать температуру потухания метана в воздухе, если эффективная энергия активации химической реакции горения равна 160 кДж/моль.

Решение.

Для оценки температуры потухания по формуле (4.5) необходимо предварительно рассчитать адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси метана в воздухе по методике, изложенной в работах [1; 2]:



Теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кмоль метана, составит:

$$V_{\text{в}}^0 = 2 + 2 \cdot 3,76 = 9,52 \text{ кмоль/кмоль}.$$

Теоретический объём продуктов горения

$$V_{\text{пр}}^0 = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ кмоль/кмоль.}$$

Низшая теплота сгорания метана определяется по закону Гесса [1; 2]:

$$Q_{\text{н}} = V_{\text{CO}_2} H_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} H_{\text{H}_2\text{O}} - H_{\text{CH}_4}.$$

Значения H_{CO_2} , $H_{\text{H}_2\text{O}}$, H_{CH_4} определяются из табл. 4 прил. 3.

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

Среднее теплосодержание продуктов горения составит:

$$H_{\text{ср}} = Q_{\text{н}} / V_{\text{пр}}^0 = 806 / 10,52 = 76,6 \text{ кДж/моль.}$$

Так как в продуктах горения наибольшее содержание азота, в качестве первого приближения T_1 по табл. 2 прил. 3 выбираем температуру 2100 °С и рассчитываем их теплосодержание Q_1 .

Для $T_1 = 2100^\circ\text{C}$:

$$Q_1 = 114,7 \cdot 1 + 93,4 \cdot 2 + 70,4 \cdot 7,52 = 830,9 \text{ кДж/моль.}$$

Так как $Q_1 > Q_{\text{н}}$, находим теплосодержание продуктов горения при более низкой температуре – 2000 °С.

Для $T_2 = 2000^\circ\text{C}$:

$$Q_2 = 108,6 \cdot 1 + 88,1 \cdot 2 + 66,8 \cdot 7,52 = 787,1 \text{ кДж/моль.}$$

Так как $Q_2 < Q_1$, определяем адиабатическую температуру горения методом линейной интерполяции:

$$T_{\text{г}}^0 = 2000 + \frac{(806 - 787,1)(2100 - 2000)}{830,9 - 787,1} = 2043^\circ\text{C} = 2316 \text{ К.}$$

Температура потухания равна

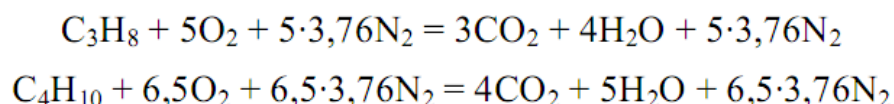
$$T_{\text{пот}}^0 = T_{\text{г}}^0 \left(1 - \frac{3RT_{\text{г}}^0}{E}\right) = 2316 \left(1 - \frac{3 \cdot 8,31 \cdot 2316}{160 \cdot 10^3}\right) = 1480 \text{ К} = 1207^\circ\text{C}.$$

Пример 2.

Рассчитать температуру потухания в воздухе пропан-бутановой смеси, если мольные доли пропана и бутана в смеси составляют 0,6 и 0,4 соответственно, НКПР пропана – 2,3 % (об.), бутана – 1,8 % (об.), низшая теплота сгорания пропана – 2044 кДж/моль, бутана – 2657 кДж/моль.

Решение.

Для определения температуры потухания следует рассчитать объём воздуха, необходимого для горения пропан-бутановой смеси и объём продуктов горения, по методике, рассмотренной в учебном пособии [2]:



Теоретический объём воздуха составит:

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{\sum \varphi_{\text{г}i} n_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21} = \frac{60 \cdot 5 + 40 \cdot 6,5 - 0}{21} = 26,6 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где $\varphi_{\text{г}i}$ – содержание i -го горючего газа в смеси, % (об.); n_i – коэффициент при кислороде в уравнении реакции; φ_{O_2} – содержание кислорода в составе смеси, % (об.).

Для удобства расчёта теоретического объёма продуктов горения составим табл. 17.

Таблица 17

Расчетный состав продуктов горения

Компонент смеси	Содержание компонента в 1 м ³ смеси, м ³	Объём продуктов горения, м ³ /м ³		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
C ₃ H ₈	0,6	0,6·3	0,6·4	0,6·5·3,76
C ₄ H ₁₀	0,4	0,4·4	0,4·5	0,4·6,5·3,76
Итого	1	3,4	4,4	21,06

Теоретический объём продуктов горения $V_{\text{пр}}^0$ равен

$$V_{\text{пр}}^0 = 3,4 + 4,4 + 21,06 = 28,86 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Нижний концентрационный предел распространения пламени для смеси газов определяется по формуле Ле Шателье:

$$\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{\text{н}i}}} = \frac{1}{\frac{0,6}{2,3} + \frac{0,4}{1,8}} = 2,07 \% \text{ (об.)},$$

где μ_i – мольная доля i -го горючего; $\varphi_{\text{н}i}$ – НКПР i -го горючего, % (об.).

Коэффициент избытка воздуха на НКПР равен

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_{\text{н}}^{\text{см}}}{\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} V_{\text{в}}^0} = \frac{100 - 2,07}{2,07 \cdot 26,6} = 1,8.$$

Избыток воздуха $\Delta V_{\text{в}}$ составит:

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0 (\alpha - 1) = 26,6(1,8 - 1) = 21,28 \text{ м}^3.$$

Низшая теплота сгорания смеси газов

$$Q_{\text{н}}^{\text{см}} = 0,01 \Sigma \varphi_{\text{гi}} Q_{\text{hi}} = \\ = 0,6 \cdot 2044 + 0,4 \cdot 2657 = 2289,2 \text{ кДж/моль} = 102196 \text{ кДж/м}^3.$$

Среднее теплосодержание продуктов горения газовой смеси составит:

$$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{V_{\text{пг}}^0 + \Delta V_{\text{в}}} = \frac{102196}{28,86 + 21,28} = 2038,2 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как большую часть объема продуктов горения составляет азот, температура смеси должна быть около 1400 °С (при данной температуре теплосодержание азота равно 2010 кДж/м³). Выбираем 1400 °С в качестве первого приближения. По табл. 2 прил. 3 находим:

при $T_1 = 1400$ °С

$$Q_1 = 2010 \cdot 21,06 + 3210 \cdot 3,4 + 2560 \cdot 4,4 + 2040 \cdot 21,2 = 107919,8 \text{ кДж/м}^3;$$

при $T_2 = 1300$ °С

$$Q_2 = 1860 \cdot 21,06 + 2980 \cdot 3,4 + 2350 \cdot 4,4 + 1880 \cdot 21,28 = 99650 \text{ кДж/м}^3.$$

Методом линейной интерполяции определяем адиабатическую температуру потухания:

$$T_{\text{пот}}^0 = 1300 + \frac{(102196 - 99650)(1400 - 1300)}{107919,8 - 99650} = 1330 \text{ °С}.$$

Пример 3.

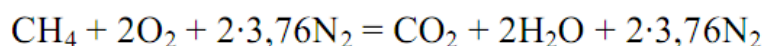
Рассчитать теоретический удельный расход воды, л/м², при тушении газового фонтана (метан) дебитом 3 млн м³/сут, если адиабатическая температура горения газа – 2010 °С, адиабатическая температура потухания – 990 °С. Удельная теплоемкость воды 4,2 кДж/(кг·К); водяного пара – 2,2 кДж/(кг·К); теплота парообразования воды – 2260 кДж/кг.

Решение.

Для случая тушения газа теоретический удельный расход воды составит:

$$q_{\text{уд}}^0 = \frac{Q^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}}.$$

Для оценки $Q^{\text{треб}}$ необходимо определить объём продуктов горения метана. Составляем уравнение химической реакции горения:



Используя табл. 2 прил. 3, определяем теплосодержание продуктов горения при температурах, близких к температуре горения $T_{\text{г}}$ (2000 °С) и температуре потухания $T_{\text{пот}}$ (1000°С), и заносим эти данные в табл. 18.

Теплосодержание зоны горения

№ п/п	Продукты горения		Теплосодержание зоны горения, кДж/м ³	
	Состав	Объём, м ³ /м ³	при 2000 °С (~ T_r)	при 1000 °С (~ $T_{пот}$)
1	CO ₂	1	4850	2210
2	H ₂ O	2	3930	1720
3	N ₂	2 · 3,76	2980	1400

По формуле (4.1), исходя из данных табл. 4.2, находим требуемый теплоотвод:

$$Q^{тр\epsilon б} = 1(4850 - 2210) + 2(3930 - 1720) + 2 \cdot 3,76(2980 - 1400) = 8941 \text{ кДж/м}^3.$$

По формуле (4.13) определяем охлаждающий эффект воды при объемном тушении:

$$Q_{охл} = 4,2(100 - 20) + 2260 + 2,2(990 - 100) = 4554 \text{ кДж/л}.$$

Теоретический удельный расход воды составит:

$$q_{уд}^0 = \frac{18941}{4554} = 4,15 \text{ л/м}^3.$$

I. Контроль и оценка результатов

Оценка за выполнение практической работы выставляется в форме _____ («зачтено-незачтено», дифференцированный зачет, по пятибалльной системе) и учитывается как показатель текущей успеваемости студента.

Оценивание ответа на дифференцированном зачете (по пятибалльной системе, «зачтено-незачтено») осуществляется следующим образом:

.....

Оценка зачтено выставляется, если ответ логически и лексически грамотно изложен, содержателен и аргументирован, подкреплён знанием литературы и источников по теме задания, умением отвечать на дополнительно заданные вопросы; незначительное нарушение логики изложения материала, периодическое использование разговорной лексики, допущение не более трех ошибок в содержании задания, а также не более трех неточностей при аргументации своей позиции, неполные или неточные ответы на дополнительно заданные вопросы.

Оценка **незачтено** выставляется, если в ответе допущено существенное нарушение логики изложения материала, систематическое использование разговорной лексики, допущение более трех ошибок в содержании задания, а также более трех неточностей при аргументировании своей позиции, неправильные ответы на дополнительно заданные вопросы; существенное нарушение логики изложения материала, полное незнание литературы и источников по теме вопроса.

По пятибалльной системе:

Качественная оценка индивидуальных образовательных достижений		Критерии оценки результата
балл (оценка)	вербальный аналог	
5	отлично	Представленные работы высокого качества, уровень выполнения отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, выполнены все предусмотренные практической работой задания.
4	хорошо	Уровень выполнения работы отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные практической работой задания выполнены, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.
3	удовлетворительно	Уровень выполнения работы отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных практической работой заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.
2	не удовлетворительно	Теоретическое содержание курса освоено частично, необходимые практические навыки работы не сформированы, большинство предусмотренных практической работой заданий не выполнено.

II. Приложения

Приложение 1

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ГАЗОВ

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

Приложение 2

ТЕПЛОТА ОБРАЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ

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

Вещество	Теплота образования, кДж/моль
Пропан (газ)	109,4
Пропан (ж)	125,3
Сероводород	201,1
Сероуглерод (ж)	-88,0
Спирт	
н-амиловый	359,1
н-бутиловый	341,5
н-гексиловый	385,1
метиловый (ж)	239,0
пропиловый (ж)	307,1
этиловый (ж)	278,2
Теофен (ж)	-81,7
Тетралин	81,7
Толуол (ж)	4,19
Фенол (тв)	171,4
Этан (газ)	88,4
Этилбензол (ж)	33,1
Этилен	-48,6
Этиленгликоль (ж)	455,4
Эфир	
диметиловый (ж)	207,8
диэтиловый (ж)	283,2
уксусноамиловый	594,7
уксуснобутиловый (ж)	542,2
уксуснометиловый (ж)	411,9
уксуснопропиловый (ж)	513,7
уксусноэтиловый (ж)	480,2

**ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) ГАЗОВ
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ [1, 2]**

Таблица 1

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

**ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) ГАЗОВ
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ [1, 2]**

Таблица 2

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

**ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ
НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ**

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

ПОКАЗАТЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ

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

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

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

П р и м е ч а н и е. Числитель параметра относится к нижнему температурному пределу воспламенения, знаменатель – к верхнему температурному пределу воспламенения.

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

Параметры	Значения параметров при разбавлении смеси		
	азотом	водяным паром	Двуокисью углерода
$h'_{f, \text{ моль/Дж}}$	$0,864 \cdot 10^{-5}$	$0,800 \cdot 10^{-5}$	$0,735 \cdot 10^{-5}$
h'_{ϕ}	1,256	0,780	0,579
h'_c	2,5277	1,651	1,251
h'_H	0,7592	0,527	0,418
h'_O	0,197	1,446	0,542
h'_N	-0,151	-0,147	-0,135
$h'_{c=c}$	1,500	1,500	1,500
h''_{ϕ}	2,800	2,236	2,020
h''_c	5,946	5,000	4,642
h''_H	1,486	1,250	1,160
h''_O	-2,973	-2,500	-2,321
$h''_{c=c}$	0	0	0
h''_N	0	0	0

Содержание

I	Практические работы.....	3
	Практическая работа №1.....	3
	Практическая работа №2.....	8
	Практическая работа №3.....	15
	Практическая работа №4.....	21
	Практическая работа №5.....	26
	Практическая работа №6.....	31
	Практическая работа №7.....	33
	Практическая работа №8.....	36
	Практическая работа №9.....	38
	Практическая работа №10.....	43
	Практическая работа №11.....	48
II	Контроль и оценка результатов.....	69
III	Приложения.....	71