

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

А. С. АНДРОСОВ, Е. П. САЛЕЕВ

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

по курсу

«ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»

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

Москва 2008

УДК 378(078.1):544

ББК 24.54Я73

А 66

Рецензенты:

Кандидат технических наук, профессор начальник кафедры общей
и специальной химии Академии ГПС МЧС России

С. С. Воевода

Кандидат технических наук начальник кафедры пожарной тактики
и службы Академии ГПС МЧС России

А. В. Подгрушный

Доктор химических наук, профессор заведующий лабораторией кафедры
физической химии химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

С. Н. Ланин

Доктор технических наук заместитель начальника ФГУ ВНИИПО
МЧС России

С. Г. Цариченко

Андросов А. С., Салеев Е. П.

А 66 Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва»: Учеб.
пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 80 с.

ISBN-5 9229-0008-0

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

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

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

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

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

УДК 378(078.1):544

ББК 24.54Я73

ISBN-5 9229-0008-0

© Академия Государственной противопожарной службы
МЧС России, 2008

Глава 1

МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

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

§ 1.1. Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ

Расчетные формулы

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

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

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

Следовательно, на 1 м^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:

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

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

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

Т а б л и ц а 1.1

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_T} \quad (1.3a)$	$\frac{\text{кмоль} \cdot \text{м}^3}{\text{кмоль} \cdot \text{м}^3}$
	$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2})V_0}{n_T M_T} \quad (1.3б)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$
Вещество сложного состава	$V_B^0 = 0,269 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right) \quad (1.4)$	$\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Смесь газов	$V_B^0 = \frac{\sum \varphi_{\Gamma_i} n_{O_2 i} - \varphi_{O_2}}{21} \quad (1.5)$	$\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

и соответственно формулу (1.11)

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

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

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

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

где ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Очевидно, что

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

После подстановки постоянных значений в формулу (1.15) получим

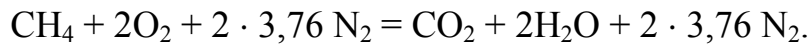
$$\rho_B = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T}, \quad (1.16)$$

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

Примеры

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

Решение. Горючее вещество является индивидуальным химическим соединением, поэтому для расчета объема воздуха надо пользоваться формулой (1.3а). Запишем уравнение химической реакции горения CH₄ в воздухе



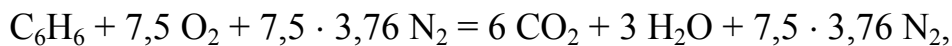
Из уравнения находим $n_{\text{O}_2} = 2$; $n_{\text{N}_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,52$; $n_{\text{CH}_4} = 1$, тогда $V_{\text{в}}^0 = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$ или кмоль/кмоль.

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

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

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

Решение. Горючее – индивидуальное химическое соединение, поэтому для расчета по формуле (1.3б) 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:

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

Пример 3. Определить объем и массу воздуха, необходимого для горения 1 кг органической массы состава: С – 60 %, Н – 5 %, О – 25 %, N – 5 %, W – 5 % (влажность), если коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,5$; температура воздуха 305 К, давление 99 500 Па.

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

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

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

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

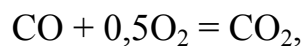
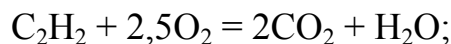
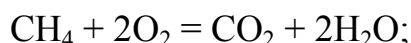
Находим количество воздуха, пошедшего на горение вещества при заданных условиях горения. Используя формулу (1.6), получим

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

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

Пример 4. Определить объем воздуха, необходимого для горения 5 м^3 смеси газов, состоящих из 20 % CH_4 ; 40 % C_2H_2 ; 10 % CO ; 5 % N_2 и 25 % O_2 , если коэффициент избытка воздуха равен 1,8.

Решение. Горючее – смесь газов, поэтому для расчета объема воздуха, пошедшего на горение, воспользуемся формулой (1.5). Для определения стехиометрических коэффициентов при кислороде n_{O_2} запишем уравнение реакций горения горючих компонентов в кислороде:



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

Для горения 5 м^3 газовой смеси необходимый теоретический объем воздуха составит $V_B^0 = 5 \cdot 5,7 = 28,5 \text{ м}^3$. Практическое количество воздуха: $V_B^0 = 1,8 \cdot 32,5 = 51,3 \text{ м}^3$.

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

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



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

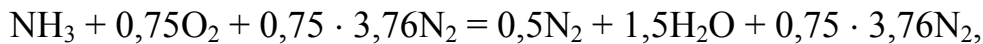
Тогда коэффициент избытка воздуха по формуле (1.7) равен

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

Горение протекало при недостатке воздуха.

П р и м е р 6. Определить объем воздуха, пошедшего на окисление 1 м³ аммиака, если в продуктах горения содержание кислорода составило 18 %.

Р е ш е н и е. Определяем теоретическое количество воздуха, необходимого для горения 1 м³ аммиака:



тогда

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

Для определения коэффициента избытка воздуха по формуле (1.10) необходимо рассчитать теоретическое количество продуктов горения 1 м³ аммиака (§ 1.1, формула (1.14)):

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

Коэффициент избытка воздуха

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

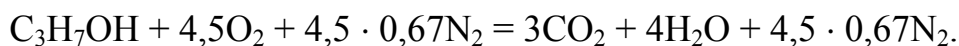
Объем воздуха, участвующего в процессе горения 1 м³ аммиака, определим по формуле (1.7)

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

П р и м е р 7. Определить объем окислительной среды, состоящей из 60 % O₂ и 40 % N₂, необходимый для горения 1 кг изопропилового спирта, если ее температура равна 295 К, давление 62,0 кПа.

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

Уравнение реакции горения изопропилового спирта



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

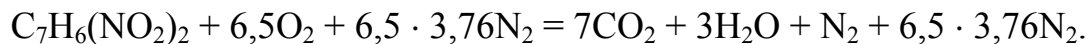
$$V_{o.c}^0 = \frac{(4,5 + 4,5 \cdot 0,67)22,4}{1 \cdot 60} = 2,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

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

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

Пример 8. Определить массу динитротолуола $C_7H_6(NO_2)_2$, сгоревшего в герметичном объеме 100 м^3 , если содержание кислорода в продуктах горения составило 12 %.

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



Молекулярная масса горючего 182. Теоретический объем воздуха

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

Теоретический объем продуктов горения (формула (1.14))

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

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

Практический объем воздуха, пошедшего на горение,

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

Тогда массу сгоревшего динитротолуола m_T определим из соотношения

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

Контрольные задачи

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

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

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

4. Определить объем и массу воздуха, пошедшего на горение 1 кг древесины, состава: С – 47 %, Н – 8 %, О – 40 %, W – 5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,8; давление 900 ГПа, температура 285 К.

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

6. Сколько воздуха, кг, требуется подать на сжигание 200 м³ генераторного газа состава: СО – 29 %, Н₂ – 14 %, СН₄ – 3 %, СО₂ – 6,5 %, N₂ – 45 %, О₂ – 2,5 %, если коэффициент избытка воздуха равен 2,5?

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

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

9. Определить избыток воздуха в продуктах горения газовой смеси состава: СО – 15 %, С₄Н₁₀ – 45 %, О₂ – 30 %, N₂ – 10 %, если коэффициент избытка воздуха равен 1,9.

10. Сколько окислительной среды, м³, состоящей из 50 % кислорода и 50 % азота, необходимо для горения 8 кг этилацетата, если коэффициент избытка равен 1,2; температура 265 К, давление 850 ГПа.

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

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

13. Рассчитать массовый и объемный расход воздуха, необходимый для горения газового фонтана дебитом 30 млн. м³/сут, состоящего из СН₄ – 80 %, СО₂ – 10 %, Н₂S – 5 %, О₂ – 5 %, при температуре воздуха 27 °С и давлении 105 кПа.

Домашнее задание

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

Т а б л и ц а 1.2

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Метиловый спирт	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	$\text{C} - 65 \%$ $\text{O} - 20 \%$ $\text{H} - 5 \%$ $\text{S} - 10 \%$	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	$\text{C} - 90 \%$ $\text{H} - 3 \%$ $\text{N} - 5 \%$ $\text{O} - 2 \%$	1 кг	Воздух	$T = 300 \text{ К}$ $P = 95000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,5$
9	Смесь газов	$\text{CH}_4 - 15 \%$ $\text{C}_3\text{H}_8 - 70 \%$ $\text{O}_2 - 10 \%$ $\text{H}_2 - 5 \%$	5 м^3	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,9$
10	Алюминий	Al	15 кг	$\text{O}_2 - 42 \%$ $\text{N}_2 - 58 \%$	Нормальные $\alpha = 2,8$
11	Сплав	$\text{Mg} - 20 \%$ $\text{Al} - 80 \%$	8 кг	Воздух	$T = 265 \text{ К}$ $P = 92000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,5$
12	Муравьиная кислота	CH_2O_2	5 кг	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,2$
13	Диметиловый эфир	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	10 кг	Воздух	$T = 282 \text{ К}$ $P = 101600 \text{ Па}$ $\alpha = 4,2$

Окончание табл. 1.2

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
14	Смесь газов	H ₂ S – 25 % SO ₂ – 15 % CO ₂ – 15 % H ₂ – 30 % O ₂ – 15 %	15 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,4$
15	Сложное вещество	C – 82 % H – 8 % W – 10 %	0,7 кг	Воздух	$T = 260$ К $P = 110000$ Па $\alpha = 1,4$
16	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	1 кг	Воздух	$T = 305$ К $P = 101300$ Па $\alpha = 1,9$
17	Ацетилен	C ₂ H ₂	150 л	Cl ₂ – 18 % N ₂ – 82 %	Нормальные $\alpha = 1,8$
18	Смесь газов	CH ₄ – 30 % O ₂ – 8 % N ₂ – 15 % H ₂ – 47 %	3 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 3,2$
19	Этиловый 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 $\alpha = 2,5$
21	Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	7 кг	Воздух	$T = 305$ К $P = 1000$ Па $\alpha = 2,8$
22	Нитротолуол	C ₇ H ₇ NO ₂	1 кг	O ₂ – 25 % N ₂ – 75 %	$T = 280$ К $P = 98000$ Па $\alpha = 1,4$
23	Смесь газов	NH ₃ – 25 % C ₄ H ₁₀ – 25 % C ₄ H ₈ – 15 % CO ₂ – 30 % O ₂ – 5 %	200 л	Воздух	Нормальные $\alpha = 1,8$
24	Бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	4 кг	Воздух	$T = 265$ К $P = 120000$ Па $\alpha = 1,8$
25	Дибромгексан	C ₆ H ₁₂ Br ₂	3 кг	O ₂ – 65 % N ₂ – 35 %	$T = 280$ К $P = 98000$ Па $\alpha = 1,7$
26	Сложное вещество	C – 70 % S – 5 % H – 5 % O – 20 %	15 кг	Воздух	$T = 285$ К $P = 100000$ Па $\alpha = 2,8$
27	Смесь газов	C ₃ H ₈ – 10 % CO – 79 % H ₂ – 5 % O ₂ – 5 % N ₂ – 10 %	10 м ³	Воздух	Нормальные $\alpha = 3,5$

§ 1.2. Расчет объема и состава продуктов горения

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

Т а б л и ц а 1.3

Тип горючего вещества	Расчетные формулы	Размерность
Индивидуальное вещество	$V_{п.г} = \frac{\sum n_{п.г}}{n_{г}} \quad (1.17)$ $V_{п.г}^0 = \frac{V_0 \sum n_{п.г_i}}{n_{г_i} M} \quad (1.18)$	$\frac{м^3}{м^3} \cdot \frac{кмоль}{кмоль}$ $\frac{м^3}{кг}$
Вещество сложного состава	$V_{CO_2} = 1,86 \frac{C}{100} \quad (1.19)$ $V_{H_2O} = 11,2 \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} \quad (1.20)$ $V_{SO_2} = 0,7 \frac{S}{100} \quad (1.21)$ $V_{N_2} = \frac{1}{100} \left[7C + 21 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] \quad (1.22)$	$\frac{м^3}{кг} \cdot \frac{кмоль}{кг}$
Смесь газов	$V_{п.г}^0 = \sum V_{п.г_i} \quad (1.23)$ $V_{п.г_i} = \frac{1}{100} \left[\frac{\sum n_{п.г_i} \varphi_{г_i}}{n_{г}} + \sum \varphi_{нг_i} \right]$	$\frac{м^3}{м^3} \cdot \frac{кмоль}{кмоль}$

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

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

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

или

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

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

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

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

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

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

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

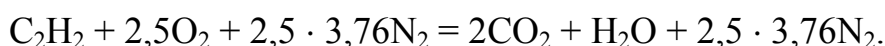
где $V_{\text{N}_2}^0$ – теоретический объем азота в продуктах горения, м³, кмоль,

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

Примеры

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

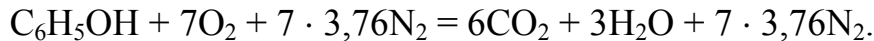
$$V_{\text{п.г.}}^0 = \frac{2 + 1 + 2,5 \cdot 3,76}{1} = 12,4 \text{ м}^3.$$

Объем продуктов горения при 1450 К

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

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.

Р е ш е н и е. Горючее – индивидуальное химическое соединение (формула (1.18)). Запишем уравнение химической реакции горения



Молекулярная масса горючего 98.

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем воздуха при нормальных условиях (1.25)

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

Объем продуктов горения при заданных условиях

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

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

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

$$V_{CO_2} = 1,86 \frac{55}{100} = 1,0 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{H_2O} = 11,2 \frac{5}{100} + 1,24 \frac{17}{100} = 0,6 + 0,2 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{SO_2} = 0,7 \frac{7}{100} = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} 7 \cdot 55 + 21 \left(5 - \frac{17}{8} \right) + 2,63 + 0,8 \cdot 3 = 4,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Полный теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

Практический объем продуктов горения при нормальных условиях

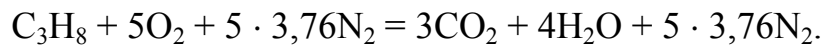
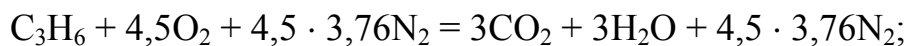
$$V_{п.г} = 6,55 + 0,269 \left(\frac{55}{3} + 5 + \frac{7-13}{8} \right) (1,3 - 1) = 6,55 + 1,8 = 8,35 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Практический объем продуктов горения при температуре горения

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

Пример 4. Рассчитать объем продуктов горения при сгорании 1 м^3 газовой смеси, состоящей из C_3H_6 – 70 %, C_3H_8 – 10 %, CO_2 – 5 %, O_2 – 15 %, если температура горения 1300 К, коэффициент избытка воздуха 2,8. Температура окружающей среды 298 К.

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



Объем продуктов горения определим по формуле (1.23):

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

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

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

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

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

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

Объем продуктов горения при температуре 1300 К

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

Пример 5. Определить состав продуктов горения метилэтилкетона.

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



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

По формуле (1.26) находим состав продуктов горения

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

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

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

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

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

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

Теоретический объем продуктов горения при нормальных условиях

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

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

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

Объем продуктов горения при температуре 1450 К

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

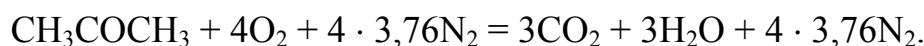
Очевидно, что состав продуктов горения не зависит от температуры горения, поэтому целесообразно определять его при нормальных условиях. По формулам (1.26), (1.28):

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

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

Пример 7. Определить количество сгоревшего ацетона, кг, если объем выделившейся двуокиси углерода, приведенный к нормальным условиям, составил 50 м^3 .

Решение. Запишем уравнение реакции горения ацетона в воздухе



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

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

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

Решение. Определим объем выделившейся двуокиси углерода

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

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

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

Определим количество сгоревшего вещества

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

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

Р е ш е н и е. Поскольку не учитывается разбавление продуктами горения, определяем объем выделяющейся в результате горения двуокиси углерода, соответствующий 8 % ее содержания в атмосфере:

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

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

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

Время горения определим, исходя из соотношения

$$\tau = \frac{m_{\text{г}}}{U_{\text{м}} F},$$

где τ – время горения; $m_{\text{г}}$ – масса выгоревшей древесины, кг; $U_{\text{м}}$ – массовая скорость выгорания древесины, кг/(м²·с); F – поверхность горения, м²;

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

Контрольные задачи

1. Определить объем и состав, % (об.), продуктов горения 1 м³ этилена, пропилена, бутилена, если температура горения 1800 К, давление 98 000 Па. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания отдельных компонентов от молекулярной массы горючего.

2. Определить объем продуктов горения и содержание паров воды и кислорода при горении 1 кг гексана, гептана, октана, декана, если температура горения 1300 К, давление 10 1325 ГПа, коэффициент избытка воздуха при горении 1,8. Построить график зависимости объема продуктов горения и содержания кислорода от молекулярной массы горючего.

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

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

5. Определить, сколько сырой нефти состава: С – 85 %, Н – 10 %, S – 5 % выгорело в объеме 2500 м^3 , если содержание сернистого газа составило $2,5 \text{ м}^3$. Рассчитать, при каком содержании кислорода наступило прекращение горения.

6. Через какое время содержание CO_2 в помещении объемом 300 м^3 в результате горения гексанола с поверхности 8 м^2 составит 7 %? Массовая скорость выгорания гексана $0,06 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

7. Определить содержание SO_2 , % (об.), в помещении объемом 1200 м^3 при горении нефти состава: С – 82 %, Н – 8 %, S – 10 % со скоростью выгорания $0,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ с площади 5 м^2 на 4-й минуте пожара.

8. Определить объем выделившихся на 5-й минуте после воспламенения продуктов горения газовой смеси состава: C_2H_2 – 30 %, H_2 – 22 %, O_2 – 15 %, H_2S – 18 %, CO_2 – 15 % и содержание двуокиси углерода, если коэффициент избытка воздуха – 1,5, температура горения 1300 К. Расход газа $5 \text{ м}^3/\text{с}$, температура газа 295 К.

Домашнее задание

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

Т а б л и ц а 1.4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Диэтиловый спирт	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	1 кг	Воздух	$T_{\text{Г}} = 1500 \text{ К}$ $P = 101400 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
2	Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	5 кг	То же	$T_{\text{Г}} = 1200 \text{ К}$ $P = 98000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
3	Сплав	Mg – 20 % Al – 80 %	1 кг	«	$T_{\text{Г}} = 2800 \text{ К}$ $P = 95000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,6$
4	Смесь газов	CH_4 – 20 % C_3H_8 – 65 % O_2 – 15 %	1 м^3	«	$T_{\text{Г}} = 1480 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 2,4$
5	Октиловый спирт	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	10 кг	«	$T_{\text{Г}} = 1320 \text{ К}$ $P = 102000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
6	Сложное вещество	С – 90 % Н – 5 % О – 5 %	1 кг	«	$T_{\text{Г}} = 1320 \text{ К}$ $P = 97000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,6$

Продолжение табл. 1.4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
7	Смесь газов	NH ₃ – 10 % C ₄ H ₁₀ – 80 % N ₂ – 7 % O ₂ – 3 %	1 м ³	Воздух	T _г = 1600 К P = 101300 Па α = 1,2
8	Анилин	C ₆ H ₇ N	1 кг	То же	T _г = 1550 К P = 94000 Па α = 1,7
9	Диэтиловый эфир	(C ₂ H ₅) ₂ O	25 кг	«	T _г = 1600 К P = 101300 Па α = 1,4
10	Смесь газов	CO – 70 % C ₃ H ₈ – 25 % O ₂ – 5 %	1 м ³	O ₂ – 42 % N ₂ – 58 %	T _г = 1400 К P = 101300 Па α = 2,5
11	Нитробензол	C ₆ H ₅ NO ₂	2 кг	Воздух	T _г = 1800 К P = 87000 Па α = 1,8
12	Сложное вещество	C – 70 % H – 6 % O – 14 % W – 10 %	1 кг	То же	T _г = 1300 К P = 97000 Па α = 1,3
13	Смесь газов	CH ₄ – 60 % CO ₂ – 30 % H ₂ – 10 %	1 м ³	«	T _г = 1500 К P = 101300 Па α = 1,2
14	Диметиловый эфир	(CH ₃) ₂ O	10 кг	O ₂ – 30 % N ₂ – 70 %	T _г = 1800 К P = 87000 Па α = 1,8
15	Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	1 кг	O ₂ – 27 % N ₂ – 73 %	T _г = 1600 К P = 101300 Па α = 2,1
16	Сложное вещество	C – 80 % H – 12 % O – 8 %	1 кг	Воздух	T _г = 1350 К P = 99000 Па α = 1,8
17	Смесь газов	C ₂ H ₆ – 60 % C ₃ H ₈ – 30 % H ₂ – 5 % O ₂ – 5 %	1 м ³	То же	T _г = 165 К P = 101300 Па α = 2,6
18	Метилэтил кетон	C ₄ H ₈ O	1 кг	«	T _г = 1480 К P = 91000 Па α = 1,7
19	Сложное вещество	C – 60 % H – 7 % O – 21 % W – 12 %	4 кг	«	T _г = 1210 К P = 101300 Па α = 1,4

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Кол-во горючего	Состав окислительной среды	Условия горения
20	Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	2 кг	Воздух	$T_r = 1340 \text{ К}$ $P = 100000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,6$
21	Смесь газов	$NH_3 - 40 \%$ $C_3H_8 - 40 \%$ $H_2 - 10 \%$ $O_2 - 10 \%$	1 м ³	То же	$T_r = 1800 \text{ К}$ $P = 101300 \text{ Па}$ $\alpha = 1,7$
22	Дибромгексан	$C_6H_{12}Br_2$	1 кг	$O_2 - 50 \%$ $N_2 - 50 \%$	$T_r = 1400 \text{ К}$ $P = 92000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,3$
23	Динитробензол	$C_6H_4(NO_2)_2$	1 кг	Воздух	$T_r = 1650 \text{ К}$ $P = 81000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,1$
24	Сероуглерод	CS_2	20 кг	То же	$T_r = 1270 \text{ К}$ $P = 97000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,6$
25	Дихлорбензол	C_6H_4Cl	5 кг	«	$T_r = 1320 \text{ К}$ $P = 99000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,4$
26	Муравьиная кислота	$C - 70 \%$ $S - 5 \%$ $H - 5 \%$ $O - 20 \%$	1 кг	$O_2 - 80 \%$ $N_2 - 20 \%$	$T_r = 2600 \text{ К}$ $P = 98000 \text{ Па}$ $\alpha = 2,5$
27	Этилацетат	$C_4H_8O_2$	1 кг	Воздух	$T_r = 1500 \text{ К}$ $P = 100000 \text{ Па}$ $\alpha = 1,5$

§ 1.3. Расчет теплоты сгорания веществ

Расчетные формулы

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

$$Q_B - Q_H = Q_{ис},$$

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

Т а б л и ц а 1.5

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

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

Расчет теплоты сгорания газозвудушных смесей проводят по формуле

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

где $Q_H^{см}$ – теплота сгорания газозвудушной смеси, кДж/м³, кДж/кмоль; Q_H – низшая теплота сгорания горючего вещества, кДж/м³, кДж/кмоль; φ_{Γ} – концентрация горючего в смеси с окислителем, % (об.).

Удельная скорость (интенсивность) тепловыделения при горении равна

$$q = Q_H U_M, \quad (1.34)$$

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

Скорость тепловыделения при горении (теплота пожара) равна

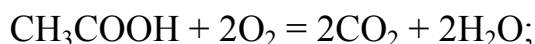
$$q_{п} = Q_H U_M F, \quad (1.35)$$

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

Примеры

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

Р е ш е н и е. 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):

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

П р и м е р 2. Рассчитать низшую теплоту сгорания органической массы состава: С – 62 %, Н – 8 %, О – 28 %, S – 2 %.

Р е ш е н и е. По формуле Д. И. Менделеева (1.31)

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

П р и м е р 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 %.

Р е ш е н и е. Для каждого горючего компонента смеси по формуле (1.30) находим теплоту сгорания (табл. 1.6).

Т а б л и ц а 1.6

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

По формуле (1.32) определим теплоту сгорания газовой смеси

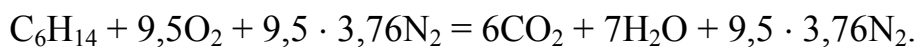
$$Q_{\text{H}} = \frac{1}{100} (806,3 \cdot 40 + 2666,1 \cdot 20 + 338,6 \cdot 5 + 317,2 \cdot 10) 10^3 = 1278,5 \cdot 10^3, \text{ кДж/кмоль}.$$

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

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

Пример 4. Рассчитать теплоту сгорания 1 м³ стехиометрической гексановоздушной смеси.

Решение. Находим стехиометрический состав горючей смеси по уравнению реакции горения



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

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

Теплоту сгорания 1 м³ гексана определим по формуле (1.30)

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

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

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

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

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

Пример 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.

Решение. Согласно формуле (1.35),

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

Контрольные задачи

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

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

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

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

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

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

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

§ 1.4. Расчет температуры горения и взрыва

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

Температура горения и взрыва определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_n = \sum_{i=1}^n C_{p(V)_i} V_{п.г_i} (T_\Gamma - T_0). \quad (1.36)$$

При этом адиабатическая температура горения

$$T_\Gamma^* = T_0 + \frac{Q_n}{\sum C_{p(V)_i} V_{п.г_i}^0}, \quad (1.37)$$

а действительная температура горения

$$T_\Gamma = T_0 + \frac{Q_{п.г}}{\sum C_{p_i} V_{п.г_i}}, \quad (1.38)$$

где T_Γ^* и T_Γ – соответственно адиабатическая и действительная температуры горения; T_0 – начальная температура; $V_{п.г_i}$ – практический объем i -го продукта горения; $V_{п.г_i}^0$ – теоретический объем i -го продукта горения; Q_n – низшая теплота горения вещества; $Q_{п.г}$ – теплота, пошедшая на нагрев продуктов горения; C_{V_i} – теплоемкость i -го продукта горения при постоянном объеме; C_{p_i} – теплоемкость i -го продукта горения при постоянном давлении.

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

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

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

Т а б л и ц а 1.7

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

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

$$U = C_V T,$$

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:

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{н}}}{\sum C_{P_i}^* V_{\text{п.г.}i}}, \quad (1.43)$$

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

Т а б л и ц а 1.8

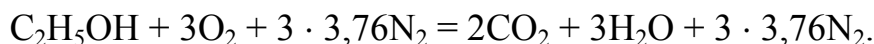
Вещество	Теплоемкость	
	кДж/(м ³ ·К)	кДж/(моль·К)
CO ₂	2,27	50,85·10 ⁻³
SO ₂	2,28	51,07·10 ⁻³
H ₂ O (пар)	1,78	39,87·10 ⁻³
N ₂	1,42	31,81·10 ⁻³
Воздух	1,44	32,26·10 ⁻³

Примеры

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:

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

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

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

3. Средняя энтальпия продуктов горения

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

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

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

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

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

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2000 °С:

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

8. Так как $Q''_{п.г} < Q_H < Q'_{п.г}$, определим температуру горения по формуле (1.42):

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

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):

$$V_{CO_2} = 1,86 \frac{60}{100} = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad V_{H_2O} = 11,2 \frac{7}{100} + 1,24 \frac{8}{100} = 0,88 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{N_2} = \frac{1}{100} 7 \cdot 60 + 2 \left(7 - \frac{25}{8} \right) = 5,01 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

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

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

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

3. Определим среднюю энтальпию продуктов горения

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

4. Так как величина энтальпии рассчитана в кДж/м³, первую приближенную температуру выбираем по табл. 1б приложения, ориентируясь на азот. Принимаем $T_1 = 2100 \text{ °С.}$

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

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

6. Из сравнения Q_n и $Q'_{п.г}$ ($Q_n > Q'_{п.г}$) выбираем вторую приближенную температуру, равную 1900 °С.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1900 °С:

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

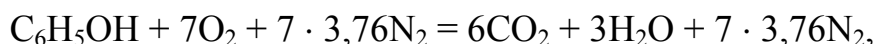
8. Так как $Q''_{п.г} < Q_n < Q_{п.г}$, определим температуру горения:

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

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

Решение.

1. Определим состав продуктов горения:



$$V_{CO_2} = 6 \text{ моль; } V_{H_2O} = 3 \text{ моля; } V_{N_2} = 26,32 \text{ моля,}$$

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

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

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

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

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

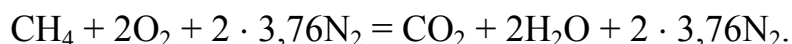
По формуле (1.43) определим действительную температуру горения

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

Пример 4. Рассчитать температуру взрыва метановоздушной смеси стехиометрического состава.

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

1. Объем и состав продуктов горения



Продукты горения: $V_{CO_2} = 1$ кмоль/кмоль, $V_{H_2O} = 2$ моль/моль, $V_{N_2} = 2 \cdot 3,76 = 7,5$ 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

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

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

5. Рассчитываем внутреннюю энергию продуктов горения при T_1 :

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

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

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

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

8. Так как $U_1 > Q_H > U_2$,

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

Контрольные задачи

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Домашнее задание

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

Т а б л и ц а 1.9

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Состав окислительной среды	Условия горения
1	Смесь газов	CO – 40 %, C 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 %	То же	$\alpha = 1,6$ $\eta = 0,3$
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	То же	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$
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	«	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,15$

Окончание табл. 1.9

Номер варианта	Горючее вещество	Химическая формула	Состав окислительной среды	Условия горения
11	Нитроэтан	$C_2H_5NO_2$	Воздух	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,2$
12	Гексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	То же	$\alpha = 2,0$ $\eta = 0,1$
13	Вещество сложного состава	C – 75 %, H – 8 %, C – 12 %, W – 5 %	«	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$
14	Смесь газов	CH_4 – 70 %, NH_3 – 20 %, O_2 – 10 %	«	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,2$
15	Муравьиная кислота	CH_2O_2	O_2 – 25 %, N_2 – 75 %	$\alpha = 2,2$ $\eta = 0,3$
16	Вещество сложного состава	C – 56 %, H – 14 %, O – 20 %, W – 10 %	Воздух	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,4$
17	Вещество сложного состава	C – 78 %, H – 12 %, O – 10 %	То же	$\alpha = 1,6$ $\eta = 0,15$
18	Смесь газов	CO – 75 %, CH_4 – 25 %	«	$\alpha = 1,9$ $\eta = 0,2$
19	Смесь газов	C_3H_8 – 70 %, C_4H_{10} – 20 %, O_2 – 10 %	«	$\alpha = 1,8$ $\eta = 0,2$
20	Вещество сложного состава	C – 85 %, H – 10 %, O – 5 %	«	$\alpha = 1,4$ $\eta = 0,3$
21	Смесь газов	C_2H_6 – 75 %, CH_4 – 20 %, O_2 – 5 %	«	$\alpha = 1,7$ $\eta = 0,22$
22	Вещество сложного состава	C – 70 %, H – 16 %, O – 14 %	«	$\alpha = 1,2$ $\eta = 0,35$
23	Смесь газов	CO – 50 %, CH_4 – 30 %, CO_2 – 20 %	«	$\alpha = 1,9$ $\eta = 0,15$
24	Вещество сложного состава	C – 77 %, H – 13 %, N – 4 %, O – 6 %	«	$\alpha = 1,0$ $\eta = 0,45$
25	Этилен	C_2H_4	O_2 – 30 % N_2 – 70 %	$\alpha = 1,5$ $\eta = 0,4$
26	Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	Воздух	$\alpha = 2,0$ $\eta = 0,15$

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Материальный и тепловой балансы процессов горения	3
§ 1.1. Расчет количества воздуха, необходимого для горения веществ.....	3
§ 1.2. Расчет объема и состава продуктов горения	13
§ 1.3. Расчет теплоты сгорания веществ	22
§ 1.4. Расчет температуры горения и взрыва	26
Глава 2. Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения).....	34
Глава 3. Температурные показатели пожарной опасности	45
§ 3.1. Расчет температурных пределов распространения пламени (воспламенения)	45
§ 3.2. Расчет температур вспышки и воспламенения.....	48
§ 3.3. Расчет стандартной температуры самовоспламенения	53
Глава 4. Параметры взрыва парогазовых смесей	58
§ 4.1. Расчет максимального давления взрыва	58
§ 4.2. Расчет тротилового эквивалента взрыва и безопасного расстояния по действию воздушных ударных волн	59
Приложение	62