

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

*Учебное текстовое электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2015

Составители: Е. О. Каргаполова, С. Ф. Храпский

Физико-химические основы развития и тушения пожара : метод. указания / Минобрнауки России, ОмГТУ ; [сост.: Е. О. Каргаполова, С. Ф. Храпский]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015.

Рассмотрены вопросы, касающиеся параметров пожара, тушения горючих веществ и материалов. Приведены расчеты определения количества воздуха, объема и состава продуктов горения, концентрационных и температурных пределов воспламенения, теплоты и температуры горения.

Даны примеры решения задач, варианты заданий для самостоятельного решения, справочные таблицы.

Для студентов очной и заочной форм обучения специальности 280705 «Пожарная безопасность».

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Омского государственного технического университета*

© ОмГТУ, 2015

1 электронный оптический диск

Оригинал-макет издания выполнен в Microsoft Office Word 2007 с использованием возможностей Adobe Acrobat X.

Минимальные системные требования:

- процессор Intel Pentium 1,3 ГГц и выше;
- оперативная память 256 Мб;
- свободное место на жестком диске 260 Мб;
- операционная система Microsoft Windows XP/Vista/7;
- разрешение экрана 1024×576 и выше;
- акустическая система не требуется;
- дополнительные программные средства Adobe Acrobat Reader 5.0 и выше.

Редактор *Т. А. Москвитина*
Компьютерная верстка *Ю. П. Шелехиной*

Сводный темплан 2015 г.
Подписано к использованию 18.06.15.
Объем 982 Кб.

Издательство ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Эл. почта: info@omgtu.ru

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА

Для решения практических задач пожарной безопасности необходимо знать параметры, описывающие комплекс процессов, составляющих такое сложное явление, как пожар.

Суммарная масса горючих веществ и материалов, приходящихся на 1м^2 площади их размещения S , называется *удельной горючей нагрузкой* $p_{\text{гн}}$, $\text{кг}/\text{м}^2$, и определяется по формуле

$$p_{\text{гн}} = \sum m_i / S, \quad (1.1)$$

где m_i – масса i -го горючего материала, кг; S – площадь размещения, м^2 .

Площадью размещения называется площадь участка, выделенного ограждающими конструкциями или противопожарными разрывами, на котором находятся горючие вещества и материалы. Если горючие вещества и материалы находятся в помещении, не разделенном преградами с нормируемым пределом огнестойкости или проходами (проездами), ширина которых меньше требуемых, площадь размещения равна площади пола.

Все горючие вещества и материалы, находящиеся на объекте, являются потенциальными источниками энергии, которые при пожаре выделяют тепло. Поэтому выделяемое горючей нагрузкой количество тепла при полном сгорании

$$g_{\text{гн}} = \frac{\sum m_i Q_{hi}}{S}, \quad (1.2)$$

где $g_{\text{гн}}$ – количество тепла, $\text{МДж}/\text{м}^2$; Q_{hi} – низшая теплота сгорания i -го горючего вещества или материала, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Продолжительность (время) пожара τ_n – время с момента возникновения горения до полного его прекращения, мин, ч.

Время свободного развития пожара – время с момента возникновения горения до начала подачи огнетушащего вещества в очаг пожара, мин, ч.

Площадь пожара S_n – площадь проекции зоны горения на горизонтальную плоскость.

Площадь поверхности горения $S_{\text{нг}}$ – характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении, т. е. выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме.

Коэффициент поверхности горения $K_{\text{п}}$ – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{нг}}}{S_{\text{п}}}. \quad (1.3)$$

Линейная скорость распространения пожара $v_{\text{л}}$ – путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени, м/мин.

Величина $v_{\text{л}}$ определяет площадь пожара на данный момент. Она зависит от вида горючего, характеристик пожарной нагрузки, вида пожара и других факторов.

Массовая скорость выгорания абсолютная $v_{\text{м}}^{\text{абс}}$ – масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени.

Удельная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара:

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = \frac{v_{\text{м}}^{\text{абс}}}{S_{\text{п}}}. \quad (1.4)$$

Приведенная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения:

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = \frac{v_{\text{м}}^{\text{абс}}}{S_{\text{нг}}}. \quad (1.5)$$

Теплота пожара $q_{\text{п}}$, кВт, – количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени:

$$q_{\text{п}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}} Q_{\text{н}} \beta, \quad (1.6)$$

где β – коэффициент полноты сгорания (0,75–0,9).

Температура пожара. Температурой внутреннего пожара считается среднеобъёмная температура газовой среды в помещении, температурой открытого пожара – максимальная температура пламени.

Основными параметрами пожара газового фонтана являются:
дебит D – расход газа, млн м³ газа в сутки:

$$D \approx 0,0025H_{\phi}^2, \quad (1.7)$$

где H_{ϕ} – высота газового (нефтяного) фонтана, м;
коэффициент излучения факела f :

$$f = 0,05 \sqrt{M}, \quad (1.8)$$

где M – средняя молярная масса компонентов горючей смеси,

$$M = \sum M_i a_i, \quad (1.9)$$

где M_i – молярная масса i -го компонента горючей смеси; a_i – доля i -го компонента в смеси;

плотность потока излучения из центра факела фонтана W , кВт/м²:

$$W = \frac{q_{\text{л}}}{4\pi R^2} = \frac{f Q_{\text{н}} v_{\text{г}}}{4\pi R^2}, \quad (1.10)$$

где R – расстояние от центра фонтана, м; $q_{\text{л}}$ – интенсивность излучения, кВт; $v_{\text{г}}$ – расход газа, м³/с;

интенсивность излучения $q_{\text{л}}$, кВт:

$$q_{\text{л}} = f Q_{\text{н}} v_{\text{г}}. \quad (1.11)$$

Примеры решения задач

Пример 1.

Определить абсолютную массовую скорость выгорания материала при площади пожара 10 и 20 м², если табличное значение удельной массовой скорости выгорания равно 0,014 кг/(м²·с).

Решение.

Удельная массовая скорость выгорания $\nu_m^{уд}$, как следует из определения, это абсолютная массовая скорость выгорания, приведенная к единице площади пожара S_{π} . Таким образом:

$$\nu_m^{abc} = \nu_m^{пр} S_{\pi}.$$

При $S_{\pi} = 10 \text{ м}^2 - \nu_m^{abc} = 0,014 \cdot 10 = 0,14 \text{ кг/с.}$

При $S_{\pi} = 20 \text{ м}^2 - \nu_m^{abc} = 0,014 \cdot 20 = 0,28 \text{ кг/с.}$

Пример 2.

Определить теплоту пожара при горении материала, имеющего низшую теплоту сгорания 14000 кДж/кг, если табличное значение удельной массовой скорости выгорания равно $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, площадь пожара 10 м^2 , коэффициент полноты сгорания 0,8.

Решение.

Теплота пожара рассчитывается по формуле (1.6). С учетом формулы (1.4) получим

$$q_{\pi} = \beta \nu_m^{уд} S_{\pi} Q_h = 0,8 \cdot 0,02 \cdot 10 \cdot 14000 = 2240 \text{ кВт.}$$

Пример 3.

Рассчитать приведенную массовую скорость выгорания штабеля, сложенного из деревянных брусьев, если за 15 мин пожара его масса уменьшилась на 15 %. Штабель состоит из пяти рядов, в каждом ряду размещаются десять брусьев. Размеры бруса – $0,1 \times 0,1 \times 2 \text{ м}$. Плотность древесины ρ составляет $450 \text{ кг}/\text{м}^3$. Определить коэффициент поверхности данного штабеля.

Решение.

Приведенная массовая скорость выгорания рассчитывается по формуле (1.5).

Изменение массы штабеля за время горения определим по формуле

$$\Delta m = \eta \rho V k n,$$

где η – доля выгоревшей массы штабеля; V – объём одного бруса, м^3 ;

k – количество брусьев в одном ряду; n – количество рядов в штабеле.

Подставив численные значения, получим

$$\Delta m = 0,15 \cdot 450 \cdot 0,1 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 5 = 67,5 \text{ кг.}$$

В конструкции штабеля имеются скрытые и открытые поверхности (рис. 1.1)

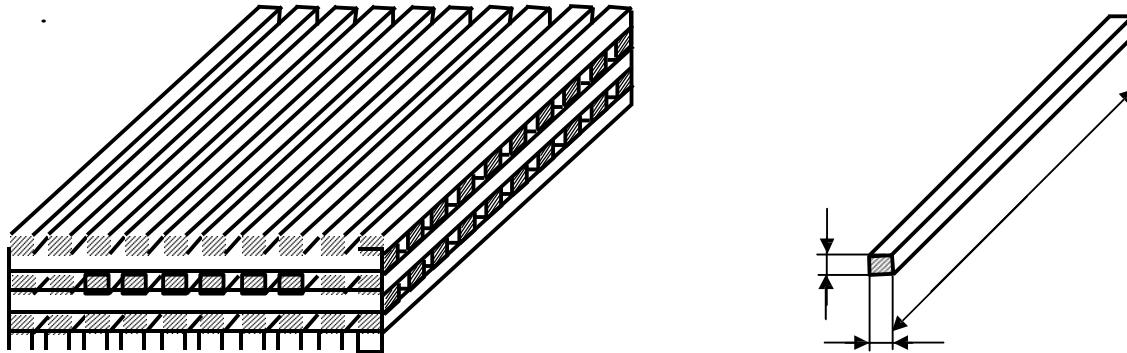


Рис. 1.1. Схема укладки штабеля

Скрытая поверхность штабеля состоит из граней брусьев, находящихся в нижнем ряду и соприкасающихся с поверхностью земли, а также участков брусьев, соприкасающихся друг с другом. Суммарную площадь скрытой поверхности $S_{\text{скр}}$ находим по формуле

$$S_{\text{скр}} = 2alk + 2a^2k^2(n - 1),$$

где k – количество брусьев в ряду; n – количество рядов.

Открытая поверхность (поверхность горения $S_{\text{ПГ}}$) рассчитывается как разность общей поверхности всех брусьев $S_{\text{общ}}$ и скрытой поверхности брусьев в штабеле:

$$S_{\text{ПГ}} = S_{\text{откр}} = S_{\text{общ}} - S_{\text{скр}}.$$

Общая поверхность штабеля – это сумма площадей всех граней одного бруса, умноженная на количество всех брусьев в штабеле kn :

$$S_{\text{общ}} = (2a^2 + 4al)kn = (2 \cdot 0,1^2 + 4 \cdot 0,1 \cdot 2)10 \cdot 5 = 41 \text{ м}^2.$$

Площадь скрытой поверхности штабеля

$$S_{\text{скр}} = 0,1 \cdot 2 \cdot 10 + 2 \cdot 0,1^2 \cdot 10^2 (5 - 1) = 10 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности горения штабеля

$$S_{\text{ПГ}} = 41 - 10 = 31 \text{ м}^2.$$

Приведенная массовая скорость выгорания

$$\nu_M^{\text{пр}} = 67,5 / (31 \cdot 15 \cdot 60) = 0,0024 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Площадь пожара составляет:

$$S_{\Pi} = l^2 = 2^2 = 4 \text{ м}^2.$$

Коэффициент поверхности горения штабеля определяем по формуле (1.3):

$$K_{\Pi} = 31/4 = 7,75.$$

Пример 4.

На сколько опустится уровень мазута за 28 мин горения в резервуаре. Плотность мазута составляет $940 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельная массовая скорость выгорания равна $0,035 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Решение.

Обозначим: изменение уровня жидкости – h , время горения – τ , удельную массовую скорость выгорания – $\nu_M^{\text{уд}}$, плотность жидкости – ρ .

Объем выгоревшей жидкости V равен произведению площади зеркала жидкости S на Δh . Значение V также можно выразить через массу выгоревшего вещества m и плотность ρ :

$$V = m/\rho.$$

Тогда

$$\Delta h = \frac{m}{\rho S}.$$

В свою очередь,

$$m = \nu_M^{\text{уд}} \tau S.$$

$$\text{Откуда находим: } \Delta h = \frac{\nu_M^{\text{уд}} \tau S}{\rho S} = \frac{0,035 \cdot 60 \cdot 28}{940} = 0,0630 \text{ м} = 6,3 \text{ см.}$$

Пример 5.

Определить величину удельной горючей и удельной пожарной нагрузки в помещении площадью 12 м². Пол в помещении выложен деревянным паркетом толщиной $h = 2$ см. Плотность древесины π , из которой изготовлен паркет, составляет 450 кг/м³. В помещении имеется следующая мебель: деревянные шкаф массой 80 кг; стол – 30 кг; два стула по 7 кг каждый; диван массой 95 кг, состоящий из 70 % древесины, 20 % пенополиуретана и 10 % кожи. Низшая теплота сгорания древесины составляет 16,5 МДж/кг, пенополиуретана – 24,52, кожи – 21,52 МДж/кг.

Решение.

Расчет проводится по формулам (1.1) и (1.2):

$$p_{\text{гн}} = \frac{\sum m_i}{S_{\text{пол}}} \text{ и } g_{\text{пн}} = \frac{\sum m_i Q_{\text{hi}}}{S_{\text{пол}}}.$$

Масса всех горючих материалов складывается из массы паркета, шкафа, стульев и массы горючих материалов, из которых собрана мебель.

Массу паркета определяем по формуле

$$m_{\text{пар}} = \pi V, \\ V = S_{\Pi} h = 12 \cdot 0,02 = 0,24 \text{ м}^3,$$

следовательно,

$$m_{\text{пар}} = 0,24 \cdot 450 = 108 \text{ кг.}$$

Массы древесины, пенополиуретана (ППУ) и кожи, из которых сделан диван, соответственно равны:

$$m_{\text{древ}} = 0,7 \cdot 95 = 66,5 \text{ кг};$$

$$m_{\text{ппу}} = 0,20 \cdot 95 = 19 \text{ кг};$$

$$m_{\text{коzи}} = 0,10 \cdot 95 = 9,5 \text{ кг.}$$

Удельная горючая нагрузка

$$p_{\text{гн}} = (108 + 80 + 30 + 2 \cdot 7 + 66,5 + 19 + 9,5) / 12 = 27,25 \text{ кг/м}^2.$$

Удельная пожарная нагрузка

$$g_{\text{пн}} = ((108 + 80 + 30 + 2 \cdot 7 + 66,5) \cdot 16,5 + 19 \cdot 24,52 + 9,5 \cdot 21,52) / 12 = 466,26 \text{ МДж/м}^2.$$

Пример 6.

Определить уровень нижней границы гомотермического слоя h при горении нефти в резервуаре. Начальный уровень жидкости $H = 10$ м, время горения $\tau = 40$ мин. Плотность данной нефти $\rho = 750$ кг/м³, удельная массовая скорость выгорания $v_m^{\text{уд}} = 0,045$ кг/(м²·с), скорость нарастания гомотермического слоя $v_{\text{гтс}} = 7 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Решение.

Глубина, на которую опустится нижняя граница гомотермического слоя за время горения, складывается из толщины выгоревшего слоя нефти ΔH , м, и толщины самого слоя $\delta_{\text{гтс}}$, м.

Тогда

$$h = H - (\Delta H + \delta_{\text{гтс}}); \quad \Delta H = \tau \cdot u_l;$$

$$\delta_{\text{гтс}} = \tau v_{\text{гтс}}.$$

Линейная скорость выгорания

$$u_l = \frac{v_m^{\text{уд}}}{\rho} = \frac{0,045}{750} = 6 \cdot 10^{-5}.$$

Получаем

$$\begin{aligned} h &= H - \tau(v_l + v_{\text{гтс}}) = \\ &= 10 - 40 \cdot 60 (6 \cdot 10^{-5} + 7 \cdot 10^{-4}) = 10 - 2 = 8,176 \text{ м.} \end{aligned}$$

Пример 7.

Рассчитать параметры пожара компактного газового фонтана: дебит D , теплоту пожара $q_{\text{пп}}$, коэффициент излучения пламени в окружающую среду f . Определить расстояние L , на котором плотность теплового потока равна 4 и 14 кВт/м². Состав газа: 85 % метана, 9 % этана, 3 % пропана, 2 % азота и 1 % бутана. Высота факела 35 м, высота скважины 1 м, внутренний диаметр трубы 102 мм. Низшая теплота сгорания метана 802 кДж/моль, этана – 1576 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль, бутана – 2657 кДж/моль.

Решение.

Дебит фонтана рассчитывается по формуле (1.7):

$$D \approx 0,0025H\phi \approx 0,0025 \cdot 35^2 = 3 \text{ млн м}^3/\text{сут.}$$

Теплота пожара $q_{\text{п}}$, кВт, определяется по формуле (1.6):

$$q_{\text{п}} = \nu_{\text{M}}^{\text{abc}} Q_{\text{H}} \beta.$$

Для газовых фонтанов коэффициент $\beta \approx 1$, скорость сгорания равна секундному расходу газа $v_{\text{Г}}$. Соответственно значение Q_{H} следует подставлять в кДж/м³, т. е.

$$q_{\text{n}} = \nu_{\text{e}} Q_{\text{H}}^{cm}.$$

Низшая теплота сгорания смеси газов определяется по формуле

$$Q_{\text{H}}^{cm} = \sum Q_{hi} a_i,$$

где Q_{hi} – низшая теплота сгорания i -го горючего компонента;

a_i – доля i -го компонента в смеси.

Подставив значения Q_{hi} каждого горючего компонента в формулу, получим

$$\begin{aligned} Q_{\text{H}}^{cm} &= 0,85 \cdot 802 + 0,09 \cdot 1576 + 0,03 \cdot 2044 + 0,01 \cdot 2657 = \\ &= 911,4 \text{ кДж /моль} = 40687,5 \text{ кДж /м}^3. \end{aligned}$$

Секундный расход газа

$$v_{\text{Г}} = 3 \cdot 10^6 / (24 \cdot 60 \cdot 60) = 34,7 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Теплота пожара данного фонтана

$$q_{\text{п}} = 34,7 \cdot 40687,5 = 1411856,2 \text{ кВт} = 1411,90 \text{ МВт.}$$

Коэффициент излучения представляет собой долю теплоты сгорания, теряемую в виде лучистой энергии в окружающую среду. Для углеводородных горючих он находится по формуле (1.8):

$$f = 0,05\sqrt{M}.$$

Средняя молярная масса горючих компонентов смеси равна (см. формулу (1.9))

$$M = \sum M_i a_i = 0,85 \cdot 16 + 0,09 \cdot 30 + 0,03 \cdot 44 + 0,01 \cdot 58 = 18,2 \text{ кг/кмоль.}$$

Коэффициент излучения

$$f = 0,05 \sqrt{18,2} = 0,21.$$

При расчете расстояния L принимается, что источником излучения пламени фонтана является точка, расположенная в его геометрическом центре, т. е. на высоте $H_\phi/2$ от устья скважины.

Тогда плотность потока излучения W через сферу радиусом R , исходя из формулы (1.11), равна

$$W = \frac{q_\lambda}{4\pi R^2} = \frac{f Q_h \nu_r}{4\pi R^2},$$

откуда расстояние R , на котором плотность лучистого теплового потока равна заданному значению $q_{\text{зад}}$, определяется выражением

$$R = \sqrt{\frac{f Q_h \nu_r}{4\pi q_{\text{зад}}}}.$$

Расстояние R_1 для $q_{\text{зад}} = 4 \text{ кВт/м}^2$

$$R_1 = \sqrt{\frac{0,21 \cdot 1411856,2}{4 \cdot 3,14 \cdot 4}} = 76,8 \text{ м.}$$

Расстояние R_2 для $q_{\text{зад}} = 14 \text{ кВт/м}^2$:

$$R_2 = \sqrt{\frac{0,21 \cdot 1411856,2}{4 \cdot 3,14 \cdot 14}} = 41 \text{ м.}$$

Очевидно, что соответствующее расстояние от скважины на уровне земли L равно

$$L = \sqrt{R^2 - (0,5H_\phi + H_m)^2}.$$

Расстояние L_1 для $q_{\text{зад}} = 4 \text{ кВт/м}^2$

$$L_1 = \sqrt{76,8^2 - (0,5 \cdot 35 + 1)^2} = 74,5.$$

Контрольные задачи

1. Найти массу сгоревшей древесины при пожаре штабеля, сложенного из брёвен в 5 рядов. В каждом ряду семь брёвен (рис. 1.2). Плотность древесины составляет $500 \text{ кг}/\text{м}^3$, приведённая массовая скорость выгорания $0,012 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Пожар длился 8 мин, средний диаметр брёвен 15 см, длина каждого бревна 1,5 м.

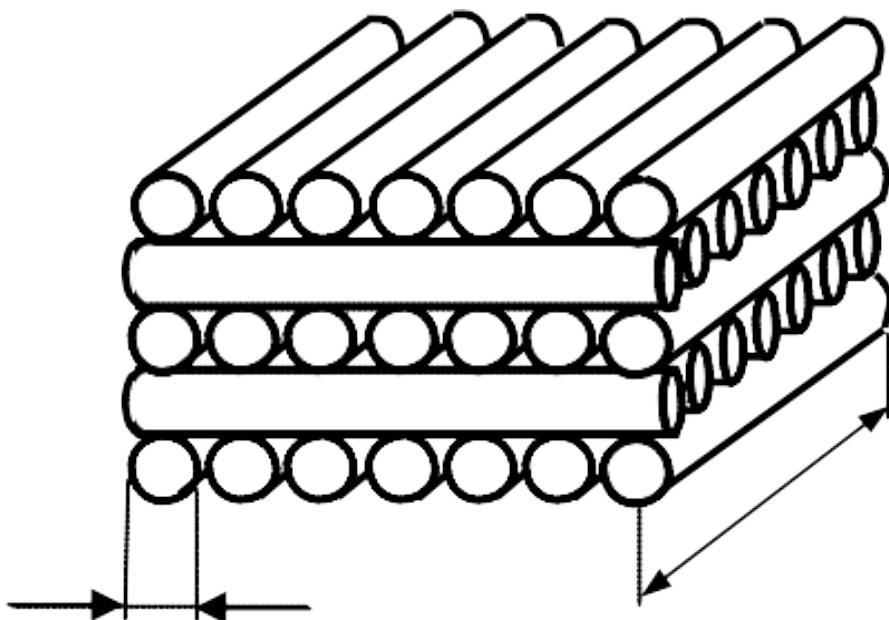


Рис. 1.2 Схема укладки штабеля

2. За какое время горения уровень жидкости в резервуаре опустится на 3, 4 см, если удельная массовая скорость выгорания горючей жидкости равна $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, плотность жидкости $850 \text{ кг}/\text{м}^3$?

3. Найти линейную скорость выгорания керосина в резервуаре, если плотность керосина $780 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельная массовая скорость выгорания составляет $0,048 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

4. Определить величину удельной горючей и удельной пожарной нагрузки в помещении склада площадью 20 м^2 . Пол в помещении выложен деревянными досками толщиной 4 см. Поверх половых досок настелен линолеум толщиной 3 мм. Плотность линолеума $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$. На деревянных стеллажах (суммарная масса стеллажей 180 кг) хранятся изделия из следующих материалов: кожи – 120 кг, ткани 80 кг, бумаги – 50 кг, резины – 160 кг. Плотность древесины составляет $450 \text{ кг}/\text{м}^3$. Низшая теплота сгорания древесины 16,5 МДж/кг; линолеума – 33,52; кожи – 24,52; ткани – 13,4; бумаги – 14,5 и резины – 33,52 МДж/кг.

5. Определить количество тепла, которое выделяется на внутреннем пожаре за 20 мин, если площадь поверхности горения составляет 250 м^2 , средний коэффициент поверхности равен 5, приведённая массовая скорость выгорания $0,008 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, низшая теплота сгорания горючего составляет $25 \text{ МДж}/\text{кг}$, коэффициент полноты сгорания 0,8.

6. В помещении площадью 50 м^2 сложен горючий материал в форме куба. Ребро куба $a = 4 \text{ м}$, плотность материала $\pi = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$, низшая теплота сгорания $Q_h = 20000 \text{ кДж}/\text{кг}$, коэффициент полноты сгорания $\beta = 0,7$. Рассчитать удельную пожарную нагрузку помещения и коэффициент поверхности. Определить параметры пожара: массовую скорость выгорания абсолютную, удельную и приведённую; теплоту пожара, если за 120 мин горения масса материала уменьшилась на 10 %.

7. Определить время возникновения горения в торговом зале книжного магазина по следующим исходным данным. Пожар ликвидирован в 10 ч 00 мин. Площадь пожара равна площади помещения – 200 м^2 . Масса горючего до пожара $35\ 000 \text{ кг}$. Средняя степень выгорания 30 %. Среднее значение удельной массовой скорости выгорания за время горения и тушения принять равным половине значения, приведенного в табл. 1.2, которое равно $0,012 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

8. Рассчитать параметры пожара компактного газового фонтана: дебит D , теплоту пожара q_n , коэффициент излучения пламени в окружающую среду f . Определить расстояние L , на котором плотность теплового потока равна 10 и $20 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Состав газа: 80 % метана, 12 % сероводорода, 3 % пропана, 2 % азота и 3 % сероуглерода. Высота факела $H_\phi = 50 \text{ м}$, высота скважины 1 м, внутренний диаметр трубы 95 мм.

Задание для самостоятельной работы № 1

Рассчитать один из параметров открытого пожара штабеля древесины.

Вариант задания выбирается по порядковому номеру учащегося в журнале группы. Исходные данные, необходимые для расчёта, приведены в табл. 1.1 и 1.2. Требуется определить параметр, для которого в табл. 1.2 указано «найти».

Таблица 1.1

Параметры штабеля

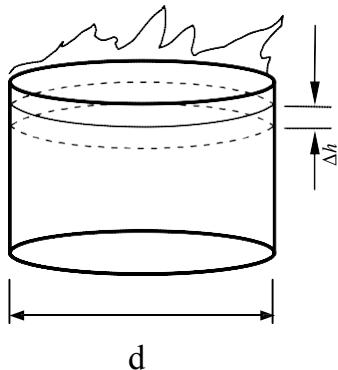
№ п/п	Плотность древесины ρ , кг/м ³	Длина бруса l , м	Диаметр d , м	Сечение a , м
1	420	1,5	0,4	—
2	450	1,4	—	0,3
3	470	1,2	0,3	—
4	500	1,0	—	0,2
5	510	0,8	0,2	—
6	420	1,5	—	0,25
7	450	1,4	0,3	—
8	470	1,2	—	0,3
9	500	1,0	0,2	—
10	510	0,8	—	0,2
11	430	1,6	0,5	—
12	490	1,7	—	0,2
13	500	0,9	0,25	—
14	460	1,1	0,15	—
15	440	1,5	—	0,25
16	480	1,0	—	0,2
17	510	0,8	0,2	—
18	460	0,9	—	0,9
19	450	1,5	0,15	—
20	520	0,8	0,25	—
21	450	1,5	0,1	—
22	420	1,4	—	0,15
23	480	1,2	0,15	—
24	500	1,5	—	0,2
25	410	0,9	0,2	—
26	400	1,8	—	0,15
27	440	1,5	0,1	—
28	450	1,4	—	0,1
29	500	1,5	0,15	—
30	510	0,9	—	0,2

Таблица 1.2

Параметры пожара

№ п/п	Выгоревшая масса Δm , кг	Время горения Т, мин	Приведенная массовая скорость выгорания $v^{\text{пр}}$, кг/(м · с)	Удельная массовая скорость выгорания $v^{\text{уд}}$, кг/(м · с)
1	найти	6	—	0,012
2	35	найти	—	0,014
3	30	8	—	найти
4	—	—	0,007	найти
5	найти	12	—	0,010
6	25	найти	—	0,018
7	15	10	—	найти
8	—	—	0,008	найти
9	найти	5	—	0,015
10	20	найти	—	0,014
11	найти	10	—	0,013
12	25	найти	—	0,015
13	35	7	—	найти
14	—	—	0,0075	найти
15	найти	13	—	0,011
16	27	найти	—	0,017
17	18	9	—	найти
18	—	—	0,009	найти
19	найти	7	—	0,013
20	19	найти	—	0,016
21	найти	9	—	0,012
22	25	найти	—	0,017
23	40	12	—	найти
24	—	—	0,008	найти
25	найти	15	—	0,012
26	30	найти	—	0,019
27	20	8	—	найти
28	—	—	0,009	найти
29	найти	10	—	0,016
30	26	найти	—	0,015

Задание для самостоятельной работы № 2



Определить теплоту пожара на расстоянии Δh при горении жидкости в резервуаре используя параметров, указанных в табл. 1.3 и 1.4

Таблица 1.3

Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	Глубина выгорания Ah , см	Время выгорания T , мин	Удельная массовая скорость выгорания $v^{\text{пр}}$, м.кг/(м ² ·с)	Линейная скорость выгорания i_l , мм/с
1	найти	25	0,047	—
2	3,0	найти	0,035	—
3	—	—	0,038	найти
4	—	—	найти	0,083
5	найти	20	0,013	—
6	2,5	найти	0,020	—
7	—	—	0,045	найти
8	—	—	найти	0,055
9	найти	30	0,017	—
10	4,0	найти	0,025	—
11	найти	15	0,022	—
12	2,0	найти	0,033	—
13	—	—	0,040	найти
14	—	—	найти	0,065
15	найти	10	0,015	—
16	3,5	найти	0,030	—
17	—	—	0,045	найти
18	—	—	найти	0,074
19	найти	20	0,039	—
20	3,0	найти	0,028	—
21	найти	15	0,037	—
22	2,5	найти	0,042	—
23	—	—	0,017	найти
24	—	—	найти	0,070
25	найти	10	0,035	—
26	4,0	найти	0,027	—
27	—	—	0,020	найти
28	—	—	найти	0,053
29	найти	30	0,023	—
30	3,5	найти	0,055	—

Таблица 1.4

Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	Жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Диаметр резервуара d , м	Низшая теплота сгорания Q_n , кДж/кг	Коэффициент полноты сгорания β
1	Ацетон	790	10	31360	0,93
2	Мазут	940	8	41900	0,85
3	Керосин осветительны	790	12	43692	0,8
4	Бензин	800	5	43580	0,85
5	Бутиловый спирт	805	4	36200	0,93
6	Нефть	920	10	43600	0,85
7	Гептан	684	8	44919	0,90
8	Декан	734	12	44602	0,80
9	Изобутиловый спирт	803	5	36743	0,85
10	Изопропиловый спирт	784	4	34139	0,90
11	Метиловый спирт	787	8	23839	0,90
12	Октан	702	10	44787	0,80
13	Пентан	621	15	45350	0,85
14	Пропиловый спирт	801	8	34405	0,85
15	Этиловый спирт	785	6	30562	0,90
16	Дизельное топливо	790	15	43419	0,80
17	Уайт-спирит	780	10	43966	0,90
18	Масло трансформаторное	870	8	43550	0,87
19	Гексан	655	6	45105	0,83
20	Гексиловый спирт	826	5	39587	0,85
21	Изопентан	619	8	45239	0,90
22	Акриловая кислота	1051	7	18000	0,80
23	Амиловый спирт	805	12	34702	0,85
24	Бензол	874	8	38519	0,85
25	Гексадекан	773	10	44312	0,9
26	Этилбензол	863	5	41323	0,87
27	Анилин	1022	6	32384	0,86
28	Ксиол	860	4	52829	0,9
29	Нефть	900	12	42800	0,85
30	Керосин тракторный	820	12	43700	0,85

Решение.

1. Считая, что изменение концентрации кислорода в среде помещения происходило только за счет его расходования на горение, определим объем израсходованного на горение воздуха и приведем его к нормальным условиям. При уменьшении кислорода до 16 % объем воздуха, израсходованного на этот процесс, будет рассчитываться по формуле

$$V_B^0 = \frac{V_{\text{пом}}(21 - \varphi_{O_2}) \cdot 4,76 \cdot P_0 \cdot T}{100 T_0 P} = \frac{100 \cdot 5 \cdot 4,76 \cdot 101325 \cdot 300}{100 \cdot 273,15 \cdot 90000} = 29,4 \text{ м}^3.$$

2. Найдем удельное теоретическое количество воздуха для горения торфа:

$$V_B^0 = 0,267 \left(\frac{40}{3} + 4 + \frac{10}{8} \right) = 4,29 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Определим количество сгоревшего торфа:

$$m = \frac{V_B}{V_B^0} = \frac{29,4}{4,29} = 6,8 \text{ кг.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания вещества при заданных температуре T и давлении P , в следующих физических величинах: кмоль/кмоль, $\text{м}^3/\text{м}^3$, $\text{м}^3/\text{кг.}$

№ варианта	Вещество	$T, \text{ К}$	$P, \text{ Па}$
1	Этан	300	80000
2	Ацетилен	270	9500
3	Пропан	300	105000
4	Бутан	300	100000
5	Пентан	290	110000
6	Гексан	270	80000
7	Гептан	270	80000
8	Октан	280	90000
9	Толуол	300	115000
10	Метан	310	120000
11	Этилен	270	125000
12	Ацетилен	280	85000
13	Этиловый спирт	290	95000
14	Бутилен	300	90000
15	Пентен	210	100000
16	Гексен	295	115000
17	Бензол	285	110000
18	Гептилен	295	120000
19	Октен	315	125000

Задача 2. В помещении объемом V в результате сгорания органики, состоящей из C, H, O, N, S, w (влага), A (зола), концентрация кислорода снизилась на x %. Определить количество сгоревшей органики при заданных температуре T и давлении P .

№ варианта	$V, \text{м}^3$	C, %	H, %	O, %	N, %	S, %	w , %	A, %	x, %	T, K	$P, \text{Па}$
1	200	40	3	12	15	—	17	10	6	300	85000
2	400	50	3	10	10	—	17	10	10	290	95000
3	150	60	5	3	10	2	15	5	7	300	105000
4	50	70	5	10	5	1	5	4	8	300	105000
5	300	40	10	10	15	5	15	5	9	290	110000
6	500	45	6	15	10	4	7	13	10	270	80000
7	400	55	4	10	15	6	8	2	11	270	80000
8	550	65	15	6	4	—	9	1	12	280	90000
9	650	44	5	10	15	6	10	10	13	290	105000
10	850	35	10	14	15	5	11	10	14	300	115000
11	350	38	12	13	10	6	12	9	15	310	120000
12	450	68	2	10	5	3	3	9	16	270	125000
13	150	57	3	6	8	2	14	10	6	280	85000
14	700	47	13	5	2	8	15	10	7	290	95000
15	800	39	1	15	3	17	16	19	8	300	90000
16	900	59	4	5	3	7	17	5	9	310	100000
17	100	46	4	12	7	8	13	10	10	275	105000
18	115	56	4	10	7	3	12	8	11	285	110000
19	850	66	3	5	9	2	10	5	12	295	115000
20	950	76	3	5	4	2	5	5	13	295	120000
21	115	48	2	8	18	2	12	10	14	315	125000

2. РАСЧЕТ ОБЪЕМА И СОСТАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Пример 1.

Определить объем и состав продуктов горения бензола и его паров в кмоль/кмоль, $\text{м}^3/\text{м}^3$, $\text{м}^3/\text{кг}$, если $\alpha = 1,5$, $T_{\text{п.г}} = 1600 \text{ К}$, $P = 90\,000 \text{ Па}$.

Решение.

1. Определим объем продукта горения. Для расчета воспользуемся данными: $m_{\text{CO}_2} = 6$; $m_{\text{H}_2} = 3$; $\alpha = 1$; $\beta_k = 7,5$.

Найдем расчетный объем продуктов по формуле

$$V_{\text{н.г}}^0 = \frac{6}{1} (\text{CO}_2) + \frac{3}{1} (\text{H}_2\text{O}) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1} (\text{N}_2) = 37,2 \text{ кмоль/кмоль.}$$

Определим избыточный объем воздуха:

$$V_B^0 = 4,76 \cdot 7,5 = 35,6 \text{ кмоль/кмоль};$$

$$\Delta V_B = V_B^0(\alpha - 1) = 35,6(1,5 - 1) = 17,8 \text{ кмоль/кмоль}.$$

Рассчитаем объем продуктов горения:

$$V_{\text{п.г.}} = V_{\text{п.г.}}^0 + \Delta V_B = 37,2 + 17,8 = 55 \text{ кмоль/кмоль}.$$

Таким образом, при сгорании 1 кмоля бензола при $\alpha = 1,5$ выделяется 55,0 кмолей продуктов горения, имеющих следующий состав:

$$\begin{aligned} C_{\text{CO}_2} &= \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot 100}{V_{\text{п.г.}}} = \frac{6 \cdot 100}{55} = 10,9 \% ; \\ C_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{V_{\text{п.г.}}} = \frac{3 \cdot 100}{55} = 5,45 \% ; \\ C_{\text{N}_2} &= \frac{(V_{\text{N}_2} + \Delta V_B \cdot 0,79) \cdot 100}{V_{\text{п.г.}}} = \frac{(3,76 \cdot 7,5 + 17,85 \cdot 0,79) \cdot 100}{55} = \\ &= 76,91 \% \\ C_{\text{O}_2} &= \frac{V_{\text{O}_2} \cdot 100}{V_{\text{п.г.}}} = \frac{17,85 \cdot 0,21 \cdot 100}{55} = 6,75 \% . \end{aligned}$$

2. Для нахождения объемов продуктов горения в $\text{m}^3/\text{кг}$ и $\text{m}^3/\text{м}^3$ определим объем 1 кмоля газа при условиях, в которых находятся продукты горения:

$$V_t = \frac{22,4 \cdot 1600 \cdot 101325}{273 \cdot 90000} = 147,8 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Тогда

$$V_{\text{п.г.}}^0 = \left[\frac{6}{1} (\text{CO}_2) + \frac{3}{1} (\text{H}_2\text{O}) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1} (\text{N}_2) \right] \frac{147,8}{78} = 70,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Рассчитаем избыточный объем воздуха:

$$\Delta V_B = \frac{4,76 \cdot 7,5 \cdot 147,8}{78} (1,5 - 1) = 33,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем продуктов горения составит

$$V_{n.e.} = 70,5 + 33,8 = 104,3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. Считая, что пары бензола имеют нормальную температуру 273 К, определим теоретический объем продуктов горения в м³/м³:

$$V_{n,e}^0 = \left[\frac{6}{1} (\text{CO}_2) + \frac{3}{1} (\text{H}_2\text{O}) + \frac{3,76 \cdot 7,5}{1} (\text{N}_2) \right] \frac{147,8}{22,4} = 218,1 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Рассчитаем избыточный объем воздуха:

$$\Delta V_e = \frac{4,76 \cdot 7,5 \cdot 147,8}{22,4} (1,5 - 1) = 117,7 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Тогда $V_{n,e} = 218,1 + 117,7 = 335,8 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Пример 2.

Определить состав и количество 1 м³ продуктов горения при горении 1 кг керосина состава: С = 85 %, Н = 11 %, S = 0,5 %, O = 1 %, N = 1 %, W = 1,5 %, если температура продуктов горения составляет 1300 °C, давление – 101 325 Па, а коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$.

Решение.

Определим расчетный объем продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{\text{C}}{100} = 1,86 \frac{85}{100} = 1,58 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{22,4}{4} \cdot \frac{\text{H}}{100} + \frac{22,4}{18} \frac{\text{W}}{100} = 11,2 \frac{11}{100} + 1,24 \frac{1,5}{100} = 124 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{22,4}{32} \cdot \frac{\text{S}}{100} = 0,7 \frac{0,5}{100} = 0,0035 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = \frac{3,76 \cdot 22,4}{12} \frac{\text{C}}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{2} \frac{\text{H}}{100} + \frac{22,4}{28} \frac{\text{N}}{100} + \frac{3,76 \cdot 22,4}{32} \cdot \left(\frac{\text{S} - \text{O}}{100} \right) =$$

$$= 0,01[7 \cdot 85 + 21 \cdot 11 + 0,8 \cdot 1 + 2,63(0,5 - 1)] = 8,263 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{n,e}^0 = 1,58 + 1,24 + 0,0035 + 8,263 = 11,087 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Рассчитаем избыток воздуха:

$$\Delta V_e = 0,267 \left(\frac{\text{C}}{3} + \text{H} + \frac{\text{S} - \text{O}}{8} \right) (1,5 - 1) = 0,267 \left(\frac{85}{3} + 11 + \frac{0,5 - 1}{8} \right) = \\ = 5,24 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определим общий объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{n,e} = V_{n,e}^0 + \Delta V_e = 11,087 + 5,24 = 16,33 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Найдем процентный состав продуктов горения:

$$\begin{aligned} C_{\text{CO}_2} &= \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot 100}{V_{n,e}} = \frac{1,58 \cdot 100}{16,33} = 9,68 \% ; \\ C_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{V_{n,e}} = \frac{1,24 \cdot 100}{16,33} = 7,6 \% ; \\ C_{\text{SO}_2} &= \frac{V_{\text{SO}_2} \cdot 100}{V_{n,e}} = \frac{0,0035 \cdot 100}{16,33} = 0,02 \% ; \\ C_{\text{N}_2} &= \frac{(V_{\text{N}_2} + \Delta V_e \cdot 0,79) \cdot 100}{V_{n,e}} = \frac{(8,236 + 5,223 \cdot 0,79) \cdot 100}{16,33} = 75,79 \% ; \\ C_{\text{O}_2} &= \frac{\Delta V_e \cdot 100}{V_{n,e}} = \frac{5,223 \cdot 0,21 \cdot 100}{16,33} = 6,72 \% . \end{aligned}$$

Приведем объем продуктов горения к заданным условиям: $t = 1300^\circ\text{C}$, $T = 273 \text{ K}$, $P = 101 \text{ 325 Па}$:

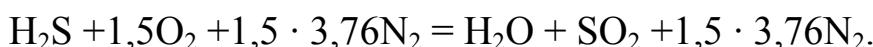
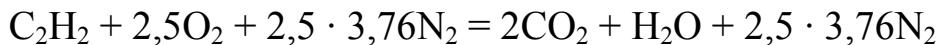
$$V_{n,e}^t = V_{n,e} \frac{T_e P_0}{T_0 P_e} = 16,33 \frac{(1300 + 273) \cdot 101325}{273 \cdot 101325} = 94,1 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Пример 3.

Определить объем и состав продуктов горения 1 м³ газовой смеси следующего состава: $C_{\text{C}_2\text{H}_2} = 50 \%$, $C_{\text{CO}} = 10 \%$, $C_{\text{H}_2\text{S}} = 10 \%$, $C_{\text{N}_2} = 10 \%$, $C_{\text{CO}_2} = 10 \%$, $C_{\text{O}_2} = 10 \%$, если избыток воздуха составляет 40 %, а температура продуктов горения 1000 °С. Давление нормальное. Температура газовой смеси 20 °С.

Решение.

1. Запишем уравнения реакций горения горючих компонентов смеси в воздухе:



2. Найденные объемы продуктов горения различных газовых смесей приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Объемы продуктов горения для различных газов смеси

Компонент смеси	Содержание в 1 м ³	Объем продуктов горения, м ³			
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	n ₂
C ₂ H ₂	0,5	2 · 0,5	1 · 0,5	—	2,5 · 3,76 · 0,5
CO	0,1	0,1	—	—	0,5 · 3,76 · 0,1
H ₂ S	0,1	—	1 · 0,1	1 · 0,1	1,5 · 3,76 · 0,1
CO ₂	0,1	0,1	—	—	—
N ₂	0,1	—	—	—	— 0,1
O ₂	0,1	—	—	—	3,76 · 0,1
Итого	1,0	1,2	0,6	0,1	5,18

3. Рассчитаем избыток воздуха:

$$V_e = \frac{2,5 \cdot 50 + 0,5 \cdot 10 + 1,5 \cdot 10 - 10}{21} (1,4 - 1) = 2,57 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

4. Определим общий объем продуктов горения при нормальных условиях:

$$V_{n.e} = 1,2 + 0,6 + 0,1 + 5,18 + 2,57 = 9,65 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

5. Найдем процентный состав продуктов горения:

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot 100}{V_{n.e}} = \frac{1,2 \cdot 100}{9,65} = 12,42 \text{ \%};$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{V_{n.e}} = \frac{0,6 \cdot 100}{9,65} = 6,21 \text{ \%};$$

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2} \cdot 100}{V_{n.e}} = \frac{0,1 \cdot 100}{9,65} = 1,04 \text{ \%};$$

$$C_{\text{N}_2} = \frac{(V_{\text{N}_2} + \Delta V_e \cdot 0,79) \cdot 100}{V_{n.e}} = \frac{(5,18 + 2,57 \cdot 0,79) \cdot 100}{9,65} = 74,72 \text{ \%};$$

$$C_{\text{O}_2} = \frac{\Delta V_e \cdot 100}{V_{n.e}} = \frac{2,57 \cdot 0,21 \cdot 100}{9,65} = 5,6 \text{ \%}.$$

6. Определим объем продуктов горения:

$$V_{t_e} = V_{n.e} \frac{T_e P_0}{T_0 P_e} = 9,65 \frac{1273 \cdot 101325}{273 \cdot 101325} = 49,1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить объем и состав продуктов горения вещества в кмоль/кмоль и м³/кг при заданных коэффициенте избытка воздуха α , температуре продуктов горения и давлении P .

№ варианта	Вещество	α	$T_{\text{п.г.}}, \text{К}$	$P, \text{Па}$
1	Октан	1,3	1600	100 000
2	Пентан	1,4	1500	80 000
3	Пропан	1,2	1200	80 000
4	Бутан	1,25	1250	85 000
5	Пентан	1,35	1300	90 000
6	Гексан	1,45	1350	95 000
7	Гептан	1,5	1400	100 000
8	Октан	1,55	1450	105 000
9	Бензол	1,4	1500	110 000
10	Толуол	1,25	1550	110 000
11	Метан	1,3	1600	75 000
12	Этилен	1,35	1650	80 000
13	Ацетилен	1,4	1250	80 000
14	Этиловый спирт	1,45	1250	80 000

Задача 2. Определить состав и количество продуктов горения следующих веществ: C, H, S, N, O, W, A при заданных температуре продуктов горения $T_{\text{п.г.}}$, давлении P , коэффициенте избытка воздуха α .

№ варианта	C, %	H, %	S, %	N, %	O, %	W, %	A, %	α	$T_{\text{п.г.}}, \text{К}$	$P, \text{Па}$
1	75	10	1	4	2	8	-	1,3	1200	150 000
2	65	10	10	5	2	8	-	1,4	1100	140 000
3	60	5	2	10	3	15	5	1,2	1200	80 000
4	70	5	1	5	10	5	4	1,25	1250	85 000

5	40	10	5	5	10	15	5	1,35	1300	90 000
6	45	6	4	10	15	7	13	1,45	1350	95 000
7	55	4	6	15	10	8	2	1,5	1400	100 000
8	65	15	-	4	6	9	1	1,55	1450	105 000
9	44	5	6	15	10	10	10	1,4	1500	110 000
10	35	1	5	15	14	10	10	1,2	1550	70 000
11	38	12	6	10	13	9	9	1,3	1600	75 000
12	68	2	3	5	10	9	9	1,35	1650	80 000
13	57	3	2	8	6	10	10	1,4	1250	80 000
14	47	13	8	2	5	10	10	1,45	1250	90 000
15	39	1	17	3	15	9	9	1,5	1300	95 000
16	59	4	7	3	5	5	5	1,55	1350	100 000
17	46	4	8	7	12	10	10	1,6	1400	105 000
18	56	4	3	7	10	8	8	1,2	1450	105 000
19	66	3	2	9	5	5	5	1,25	1500	115 000
20	76	3	0	4	5	5	5	1,3	1550	120 000

Задача 3. Определить объем и состав продуктов горения воздушной смеси объемом того же состава, что в задаче 2.

№ варианта	Концентрация вещества, %							
	Вещество				CO	n ₂	CO ₂	O ₂
1	C ₂ H ₆		CH ₆	20	10	10	10	10
2	C ₂ H ₂	40	C ₂ H ₆	20	20	5	5	10
3	C ₂ H ₂	50	CH ₄	15	15	5	10	5
4	C ₃ H ₈	50	C ₂ H ₆	25	10	5	5	5
5	C ₅ H ₁₅	40	C ₄ H ₁₀	30	5	10	5	10

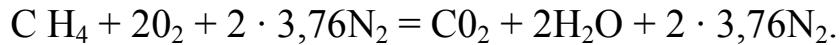
6	C ₆ H ₆	50	C ₃ H ₁₂	25	4	16	3	2
7	C ₇ H ₁₆	45	C ₆ H ₁₄	30	14	6	3	2
8	C ₈ H ₁₈	45	C ₆ H ₆	25	10	5	5	10
9	C ₆ H ₆	50	C ₈ H ₁₈	20	15	5	10	5
10	C ₈ H ₁₈	40	C ₆ H ₆	30	4	16	3	2
11	C ₆ H ₆	50	CH ₃ C ₆ H ₅	25	10	5	5	5
12	CH ₃ C ₆ H ₅	45	CH ₄	30	17	3	3	7
13	CH ₄	50	C ₂ H ₄	25	8	12	2	3
14	C ₂ H ₆	40	C ₂ H ₂	30	12	8	2	3
15	C ₂ H ₂	50	C ₂ H ₅ OH	30	16	5	6	4
16	C ₂ H ₅ OH	45	C ₄ H ₈	20	4	16	4	6
17	C ₄ H ₁₈	40	C ₃ H ₁₀	40	10	10	5	-
18	C ₃ H ₁₀	50	C ₂ H ₂	30	10	10	5	10
19	C ₂ H ₁₂	35	C ₂ H ₁₂	25	5	5	10	5
20	C ₆ H ₆	40	C ₆ H ₆	25	10	5	10	5
21	C ₆ H ₁₂	40	C ₂ H ₁₂	35	5	10	10	5

3. КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Пример 1. Определить концентрационные пределы воспламенения метана CH₄ и низшую теплоту горения метана.

Решение.

Запишем термохимическое уравнение горением метана:



НКПВ: $a^* = 8,684$, $b^* = 4,679$; ВКПВ: $a^* = 1,55$, $b^* = 0,56$.

$$C_{h(e)} = \frac{100}{a^* \cdot n^* + b^*};$$

$$C_h = \frac{100}{8,684 \cdot 2 + 4,679} = 4,55 \% ; \ C_e = \frac{100}{1,55 \cdot 2 + 0,56} = 27,3 \% .$$

Пример 2.

Определить температурные пределы воспламенения ацетона, если концентрационные пределы составляют: НКПВ = 2,2 %, ВКПВ = 13 %. Атмосферное давление равно 101325 Па.

Решение.

Находим давления насыщенных паров жидкости, соответствующие нижнему и верхнему пределам воспламенения:

$$P_{h,n} = \frac{2,2 \cdot 101325}{100} = 222,9 \text{ Па};$$

$$P_{e,n} = \frac{13 \cdot 101325}{100} = 13\,172,3 \text{ Па.}$$

Нижний температурный предел воспламенения ацетона находится между температурами 241,9 и 252,2 К при давлениях $P_{max} = 2666,4$ и $P_{min} = 1333,2$ Па, а верхний – между 271,0 и 280,7 К при давлениях $P_{max} = 13\,332,3$ и $P_{min} = 7999,3$ Па. Методом линейной интерполяции определяем нижний и верхний температурные пределы воспламенения:

$$T_h = T_{min} + \frac{(T_{max} + T_{min})(P_h - P_{min})}{P_{max} - P_{min}} =$$

$$= 241,9 + \frac{(252,2 - 241,9)(2229,2 - 1333,2)}{2666,4 - 1333,2} = 248,8 \text{ К;}$$

$$T_e = T_{min} + \frac{(T_{max} + T_{min})(P_e - P_{min})}{P_{max} - P_{min}} =$$

$$= 271,0 + \frac{(280,7 - 271,0)(13172,3 - 7999,3)}{13332,3 - 7999,3} = 280 \text{ К.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить концентрационные и температурные пределы воспламенения вещества при атмосферном давлении 101,3 кПа.

№ варианта	Формула вещества	Название вещества
1	C_3H_6O	Ацетон
2	C_6H_6	Бензол
3	C_6H_4	Октан
4	$C_6H_{11}CH_3$	Метилциклогексан
5	CH_3OH	Метанол
6	C_2H_5OH	Этанол
7	C_3H_7OH	Пропанол

8	C ₄ H ₉ OH	Бутанол
9	C ₃ H ₇ OH	Пропиловый спирт вторичный
10	(CH ₃) ₃ COH	Бутиловый спирт
11	C ₅ H ₁₁ CH ₃	Метилпентан
12	C ₄ H ₈ O	Диэтиловый эфир
13	C ₄ H ₈ O ₂	Уксусно-этиловый эфир
14	C ₈ H ₈	Октан
15	C ₆ H ₁₄	Гексан
16	C ₃ H ₆ O ₃	Глицерин
17	C ₂ H ₅ OH	Этанол
18	C ₃ H ₇ OH	Пропанол
19	C ₅ H ₁₁ CH ₃	Метилпентан
20	C ₆ H ₅ OH	Стирол
21	C ₆ H ₅ CH ₃	Толуол

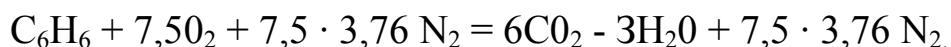
4. ТЕПЛОТА И ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

Пример 1.

Рассчитать по закону Гесса низшую теплоту горения бензола в кДж/моль и кДж/m³.

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бензола в воздухе:



2. Уравнение закона Гесса для этого случая будет выглядеть так:

$$Q_h = -(6\Delta H_{CO_2} + 3\Delta H_{O_2} - \Delta H_{C_6H_6}).$$

$$Q_h = 6 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - (-34,8) = 3142,8 \cdot 103 \text{ кДж/кмоль.}$$

3. Низшую теплоту сгорания 1 кг бензола найдем исходя из закона Авогадро и определения киломоля. При сгорании 1 кмоля = 78 кг выделяется тепла $3142,8 \cdot 10^3$ кДж; при сгорании 1 кг выделяется тепла

$$Q'_h = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{78} = 40292,3 \text{ кДж/кг.}$$

4. Теплоту сгорания 1 м³ паров бензола при нормальных условиях определим, используя следствие из закона Авогадро.

$$Q''_h = \frac{3142,8 \cdot 10^3}{24} = 140\ 303,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Пример 2.

Определить по формуле Менделеева низшую теплоту горения 4-метил-5-β-оксиэтилтиазола (C_6H_9ONS).

Решение.

Так как необходимо определить низшую теплоту горения, величину $\Delta H_{H_2O}^0$ выбираем для газообразной воды.

1. Определим весовой состав вещества:

$$\mu = 12 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 16 \cdot 1 + 14 \cdot 1 + 32 \cdot 1 = 143 \text{ у.е. (100 \%)}.$$

Откуда

$$C = \frac{12 \cdot 6 \cdot 100}{143} = 50,3\%; \quad H = \frac{1 \cdot 9 \cdot 100}{143} = 6,3\%;$$

$$O = \frac{1 \cdot 16 \cdot 100}{143} = 11,2\%; \quad N = \frac{1 \cdot 14 \cdot 100}{143} = 9,8\%;$$

$$S = \frac{1 \cdot 32 \cdot 100}{143} = 22,4\%.$$

2. Определим низшую теплоту горения вещества:

$$Q_H = 339,4 \cdot 50,3 + 1257 \cdot 6,3 - 108,9 \cdot (11,2 + 9,8 - 22,4) - \\ - 25,1 \cdot (9 \cdot 6,3 + 0) = 23\ 720,2 \text{ кДж/кг.}$$

Пример 3. Определить низшую теплоту сгорания в кДж/м^3 и кДж/кмоль газовой смеси, имеющей следующий состав: $\text{CO} = 20\%$, $\text{H}_2 = 10\%$, $\text{CH}_4 = 20\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 20\%$, $\text{CO}_2 = 10\%$, $\text{N}_2 = 10\%$, $\text{O}_2 = 10\%$. Начальные условия — нормальные.

Решение.

1. Из справочника определяем теплоту сгорания компонентов:

$$Q_{H_{\text{CO}}} = 12\ 650 \text{ кДж/м}^3; \quad Q_{H_{\text{H}_2}} = 10\ 770 \text{ кДж/м}^3;$$

$$Q_{H_{\text{CH}_4}} = 35\ 820 \text{ кДж/м}^3; \quad Q_{H_{\text{C}_2\text{H}_6}} = 63\ 690 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Находим теплоту сгорания 1 м^3 смеси:

$$Q_H = 12650 \frac{20}{100} + 10770 \frac{10}{100} + 35820 \frac{20}{100} + 63690 \frac{20}{100} = \\ = 23\ 509 \text{ кДж/м}^3.$$

3. Теплоту сгорания 1 кмоля газовой смеси найдем, используя следствие из закона Авогадро: 1 кмоль газа при нормальных условиях занимает объем $22,4 \text{ м}^3$:

$$Q_{\text{H}} = 23\,509 \cdot 22,4 = 526,6 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль.}$$

Пример 4.

Определить действительную температуру горения древесины следующего состава: С = 45 %, Н = 5 %, О = 35 %, N = 1 %, S = 0 %, W = 10 %, A = 4 %, если горение протекало при $\alpha_{\text{в}}=1,4$. Недожог составил 5 % Q_{H} а потери тепла излучением равнялись 10 % Q_{H} . Начальные условия – нормальные ($Q_{\text{исх}} = 0$).

Решение.

1. Определим количество теплоты, затраченное на нагрев продуктов горения:

$$Q_{\text{н.г.}} = Q_{\text{H}} + Q_{\text{исх}} - Q_{\text{недож}} - Q_{\text{пост}} = 0,85Q_{\text{H}}.$$

По формуле Менделеева найдем низшую теплоту горения древесины:

$$Q_{\text{H}} = 339,4 \cdot 45 + 1257 \cdot 5 - 108,9(1 + 35 - 0) - 25,1(9 - 5 - 10) = \\ = 16\,257 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{н.г.}} = 0,85 \cdot 16\,257 = 13\,819 \text{ кДж.}$$

Таким образом, на нагрев продуктов горения 1 кг древесины будет затрачиваться 13 819 кДж тепла.

2. Определим объем и состав продуктов горения 1 кг древесины:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \frac{\text{C}}{100}; V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \frac{\text{H}}{100}; V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{\text{S}}{100};$$

$$V_{\text{N}_2} = [7\text{C} + 21\text{H} + 0,8\text{N} + 2,63(\text{S} - 0)]/100,$$

$$\text{или } V_{\text{N}_2} = 0,76V_{\text{B}}^0 + 0,8N/100,$$

где С, Н, S, N — процентное содержание элементов в смеси. Подставляя их значения, получаем:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{1,86 \cdot 45}{100} = 0,84 \text{ м}^3; V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{11,2 \cdot 5}{100} + \frac{1,24 \cdot 10}{100} = 0,68 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = [7 \cdot 45 + 21 \cdot 5 + 0,8 \cdot 1 + 2,63(0 - 35)]/100 = 3,28 \text{ м}^3.$$

$\Delta V_B = V_B(\alpha_B - 1)$ – избыток воздуха.

$$\Delta V_B = 0,267 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) (\alpha_B - 1) \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\Delta V_B = 0,267 \left(\frac{45}{3} + 5 + \frac{0 - 35}{8} \right) (1,4 - 1) = 1,66 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{п.г.}} = 0,84 + 0,68 + 3,28 + 1,66 = 6,46 \text{ м}^3.$$

При нормальных условиях продукты горения 1 кг древесины будут состоять из 0,84 м³ CO₂; 0,68 м³ паров H₂O; 3,28 м³ N₂ и 1,66 м³ воздуха. Общий объем продуктов горения составит 6,46 м³/кг.

3. Найдем температуру горения. Для этого определим среднее теплосодержание единицы объема продуктов горения:

$$\Delta H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{п.г.}}}{V_{\text{п.г.}}} = \frac{13819}{6,49} = 2129,3 \text{ кДж/м}^3.$$

Это значит, что в каждом 1 м³ продуктов горения при температуре горения будет содержаться 2129,3 кДж тепла. Учитывая, что на 71,2 % продукты горения состоят из азота, находим, при какой температуре удельное теплосодержание азота соответствует найденной величине (2129,3 кДж/м³). Видим, что эта температура находится между (1400–1500) 273 К. Принимая во внимание, что в состав продуктов горения входят CO₂ и H₂O, которые обладают таким теплосодержанием при более низких температурах, задаемся температурой (1300 + 273) К и определяем для нее суммарное теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{\text{п.г.}} = \sum \Delta H_{\text{п.г.}i} \cdot V_{\text{п.г.}i} = 1861,2 \cdot 3,28 + 1887,5 \cdot 1,66 + 2979,1 \cdot 0,84 + \\ + 2345,5 - 0,68 = 13\,374,6 \text{ кДж.}$$

Так как теплосодержание продуктов горения при $T = 1573$ К ниже $Q_{\text{п.г.}} = 13\,819$ кДж, то $T_r > 1573$ К.

Задаемся $T = (1400+273)$ К и вновь определяем теплосодержание продуктов горения при 1673 К:

$$Q_{\text{п.г.}} = 2018,8 \cdot 3,28 + 2035,5 \cdot 1,66 + 3241,4 \cdot 0,84 + \\ + 2560,9 - 0,68 = 14\,525 \text{ кДж.}$$

Так как теплосодержание продуктов горения при $T = 1673$ К выше $Q_{\text{п.г.}}$, $T_{\text{г}} < 1673$ К.

Таким образом, температура горения находится в интервале 1573–1673 К. Точное значение температуры горения найдем методом интерполяции, считая, что в этом интервале температур теплосодержание продуктов горения линейно зависит от температуры:

$$T_{\text{г}} = 1573 + \frac{(1673 - 1573) \cdot (13\ 819 - 13\ 374,6)}{14\ 525,3 - 13\ 374} = 1611,8 \text{ К.}$$

Методика определения температуры горения других классов веществ аналогична. В случае горения индивидуальных химических соединений при определении $V_{\text{п.г.}}$ удобнее пользоваться единицей измерения кмоль/кмоль, а при нахождении $Q_{\text{п.г.}}$ и ΔH_{cp} – единицей измерения кДж/кмоль.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить действительную температуру горения вещества.

№ варианта	Вещество	$\alpha_{\text{в}}$	Недожог $Q_{\text{Н}}$, %	Потери $Q_{\text{Н}}$, %
1	Метан	1,4	7	8
2	Этан	1,45	8	7
3	Бутан	1,43	6	9
4	Пропан	1,42	8	7
5	Пентан	1,4	10	5
6	Гексан	1,38	10	6
7	Гептан	1,36	8	9
8	Гептилен	1,34	5	10
9	Этилен	1,32	6	9
10	Бутилен	1,3	8	7
11	Бензол	1,28	9	6
12	Гексен	1,26	4	11
13	Толуол	1,25	11	4
14	Ацетилен	1,27	10	6
15	Метан	1,29	9	4
16	Этан	1,31	8	7

17	Бутан	1,33	9	6
18	Пропан	1,35	10	4
19	Пентан	1,37	11	4
20	Гексан	1,4	12	3
21	Гептилен	1,43	14	2
22	Этилен	1,46	10	6
23	Бутилен	1,49	9	7
24	Бензол	1,48	8	7
25	Гексен	1,45	7	8

Задача 2. Определить действительную температуру горения вещества.

№	Состав вещества, %								Недожог $Q_h, \%$	Потери $Q_n, \%$
	C	H	N	S	\mathcal{W}	O	A	α_b		
1	61	5	4	7	10	10	3	1,55	5	9
2	59	6	7	8	11	7	4	1,5	3	10
3	60	7	6	6	12	4	5	1,45	4	11
4	58	8	4	6	13	5	6	1,4	2	12
5	57	9	6	5	14	4	7	1,35	3	13
6	56	10	4	6	15	5	6	1,3	4	11
7	55	9	7	3	15	6	5	1,35	5	10
8	54	8	8	4	14	8	4	1,4	6	9
9	53	7	7	6	15	7	5	1,45	7	8
10	52	6	4	10	16	6	6	1,5	8	7
11	51	5	8	8	15	6	7	1,55	7	8
12	50	4	9	8	16	5	8	1,6	6	9
13	49	3	10	8	17	4	9	1,55	5	10
14	48	2	9	8	17	6	10	1,5	4	11
15	47	8	8	6	18	4	9	1,45	3	10
16	49	9	7	7	18	5	8	1,4	2	11
17	45	7	8	8	17	8	7	1,35	3	12
18	44	6	10	9	16	9	6	1,3	4	11
19	43	5	11	11	15	10	5	1,35	5	10
20	42	4	10	10	15	9	9	1,4	6	9
21	41	3	10	12	16	9	9	1,45	7	8
22	40	8	11	6	17	8	10	1,5	8	7
23	61	2	6	6	10	5	10	1,55	7	8
24	62	1	7	7	9	6	8	1,6	6	9
25	58	6	7	5	11	5	8	1,3	5	10

Задача 3. Определить действительную температуру горения смеси.

Вариант	Состав смеси, %											α_B	Недожог $Q_h, \%$	Потери $Q_h, \%$	
	C ₈ H ₁₈	C ₄ H ₁₀	C ₂ H ₆	C ₆ H ₁₂	C ₆ H ₆	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂	CO	CH ₄				
1		40		35			6	5	4	10			1,6	5	10
2				50	25	5	3	10	2	5			1,55	11	4
3			25			5	3	5	2	10	50		1,6	6	9
4				25	40	10	8	5	2	10			1,25	4	11
5						4	3	3	3	17	30	40	1,35	8	7
6					20	10	10	8	2	10	40		1,45	6	9
7			45		30	2	16	3	0	4			1,2	8	4
8	20				50	5	5	10	5	5			1,4	8	8
9	10	30		20	5	3	2	10	20				1,3	4	11
10	20		40	30		2	3	5					1,4	5	10
11						2	5	3	10	20	40	20	1,5	6	9
12	10	40	20		20	3	2	5					1,4	7	8
13	15	35	25		15	2	5	3					1,3	8	7
14						5	2	3	10	40	25	15	1,5	7	8
15						2	3	5	20	10	20	60	1,4	6	9
16	40	10	10	20	10	5	3	2					1,2	4	И
17	50	10	10	10	10	2	3	5					1,3	5	11

18						5	2	3	10	20	10	50	1,4	6	9
19						3	5	2	10	10	10	60	1,5	7	8
20	60	10	5	10	5	2	3	5					1,6	8	7
21	10	70	5	5		3	2	5					1,2	9	6
22						5	3	2	5	5	70	10	1,3	8	8
23						2	5	3	5	70	5	10	1,4	7	8
24	5	5	10	70		3	2	5					1,5	6	9
25	5		5	10	70	2	3	5					1,4	5	10

5. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

Горение горючих веществ и материалов происходит в результате нагревания их источником зажигания, т. е. теплом, поступающим из внешней среды. Кроме того, нагревание осуществляется также теплом, выделяющимся в зоне горения.

Температура горения — температура (зоны пламени), до которой нагреваются продукты реакции горения. Это максимальная температура зоны химической реакции (зоны пламени).

Температуру горения рассчитывают по формуле

$$Q_{\text{п.г}}^{T_{\text{г}}} = \sum_{i=1}^k V_{\text{п. г}} C_{pi} (T_r - T_o).$$

Расчет температуры горения может быть произведен только методом последовательных приближений, поскольку теплоемкость газов зависит от температуры горения.

Для расчета температуры горения требуется определить параметры, приведенные в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Схема расчета температуры горения

Определяемые параметры	Примечание
1. Объем и состав продуктов горения	кмоль; м ³
2. Низшая теплота горения или количество теплоты, пошедшей на нагрев продуктов горения (при наличии теплопотерь)	$Q_{\text{н.г}}$ или $Q_{\text{н}}$, кДж/моль, кДж/кг
3. Среднее значение энталпии продуктов горения	$H_{cp} = \frac{Q_{\text{н.г}}}{\sum V_{\text{н.г}}}$
4. Температура горения T_1 по средней энталпии, если H_{cp} выражена в кДж/м ³ , ориентируясь на азот (наибольшее содержание в продуктах горения)	
5. Теплосодержание продуктов горения с температурой T_1	$Q'_{\text{н.г}} = \sum H_i V_{\text{н.г}}$
6. Если $Q'_{\text{н.г}} < Q_{\text{н.г}}$, то $T_2 > T_1$ в том случае, если $Q'_{\text{н.г}} > Q_{\text{н.г}}$, то $T_2 < T_1$	H_i — энталпия i -го продукта горения; V_i — объем i -го продукта горения
7. Расчет проводим до получения неравенства $Q'_{\text{н.г}} < Q_{\text{н.г}} < Q''_{\text{н.г}}$	
8. Температура горения	$T_{\Gamma} = T_1 + \frac{(Q_{\text{н.г}} - Q'_{\text{н.г}})(T_2 - T_1)}{Q''_{\text{н.г}} - Q'_{\text{н.г}}}$

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:

$$T_{\text{н.г}} = T_0 + \frac{Q_{\text{н}}}{\sum C^* p_i \cdot V_{n,e}},$$

где $C^* p_i$ — теплоемкость i -го продукта горения при 1500 К (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Теплоемкость некоторых горючих газов

Вещество	Теплоемкость	
	кДж/м ³ · К	кДж/моль · К
CO ₂	2,27	$50,85 \cdot 10^{-3}$
SO ₂	2,28	$51,07 \cdot 10^{-3}$
H ₂ O	1,78	$39,87 \cdot 10^{-3}$
N ₂	1,42	$31,81 \cdot 10^{-3}$
Воздух	1,44	$32,26 \cdot 10^{-3}$

Более подробно метод определения температуры горения рассмотрим в следующих примерах.

Пример 1.

Определить действительную температуру горения древесины следующего состава: C = 45 %; H = 5,0 %; S = 0 %; O = 35 %; N = 1 %;

A = 4 %; W = 10 %, если горение протекает при $\alpha_e = 1,4$. Недожог составляет 5 % $Q_{\text{недож}}$, а потери теплоты излучением составляют 10 % Q_h .

Начальные условия — нормальные.

Решение.

1. Определяем количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения, по уравнению материально-теплового баланса:

$$Q_{\text{п.г}} = (Q_h + Q_{\text{исх}} - Q_{\text{недож}} - Q_{\text{пот}}),$$

где Q_h — низшая теплота горения;

$Q_{\text{исх}} = 0$, так как начальные условия нормальные, $T_0 = 273$ К;

$Q_{\text{недож}}$ — теплота недожога;

$Q_{\text{пот}}$ — теплота потери излучением.

Вычисляем количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения:

$$Q_{\text{п.г}} = Q_h + (0 - 0,5 Q_h - 0,1 Q_h) = 0,85 Q_h.$$

2. По формуле Д.И. Менделеева находим низшую теплоту горения древесины:

$$\begin{aligned} Q_h &= 339,4 \cdot 45 + 1257 \cdot 5 - 108,9(1 + 35 - 0) - 25,1(9 \cdot 5 + 10) = \\ &= 16\,257,1 \text{ кДж/кг}; \end{aligned}$$

$$Q_{\text{п.г}} = 0,85 \cdot 16\,257,1 = 13\,818,54 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, на нагрев продуктов горения 1 кг древесины будет затрачено 13 818,54 кДж тепла.

3. Определяем объем и состав продуктов горения 1 кг древесины.

При сжигании древесины образуются углекислый газ (CO₂) и вода (H₂O), остается азот (N₂).

Определяем объем продуктов сгорания по формуле

$$V_{\text{п.г}} = \frac{q}{C' p \cdot T_{\text{гор}}},$$

где q — теплосодержание продуктов сгорания кДж/моль; кДж/кг; $C' p$ — средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³ · К); ккал/(м³ · К).

Найдем объем продуктов сгорания 1 кг сложной смеси горючих веществ. Отсюда имеем:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \cdot 45/100 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \cdot 5/100 + 1,24 \cdot 10/100 = 0,68 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,017 \cdot 45 + 21 \cdot 5 + 2,63 (1 - 35) = 3,31 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\Delta V_{\text{в}} = 0,266(45/3 + 5 - 35/8)(1,4 - 1) = 1,66 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Следовательно, при нормальных условиях продукты горения 1 кг древесины будут состоять из 0,84 м³ CO₂, 0,68 м³ паров H₂O, 3,31 м³ N₂ и 1,66 м³ воздуха. Общий объем продуктов горения ($V_{\text{п.г}}$) составит 6,49 м³/кг.

4. Находим температуру горения.

Определяем среднее теплосодержание единицы объема продуктов горения:

$$\Delta H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{п.г}}^{T_2}}{V_{\text{п.г}}} = \frac{13\,818,54}{6,49} = 2129,2 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Это значит, что в каждом кубометре продуктов горения при температуре горения будет содержаться 3156,1 кДж тепла. Для дальнейших расчетов необходимо учитывать, что доля азота в продуктах горения: наиболее значительна, чем других компонентов горючей смеси.

Процентное содержание азота в продуктах горения азота 3,31 % и кислорода 1,66 % в составе воздуха. Отсюда определяем долю азота в продуктах горения:

$$\frac{3,31 + 1,66 \cdot 0,79}{6,49} \cdot 100 \% = 71,2 \%,$$

где 0,79 – коэффициент, учитывающий содержание азота в воздухе.

При дальнейших расчетах исходим из того, что доля азота в продуктах горения составляет 71,2 %. Поэтому находим, при какой температуре удельное теплосодержание азота ΔH_{N_2} соответствует найденной величине $\Delta H_{\text{ср}}$ (2129,2 кДж/м³).

Видим, что эта температура находится между (1400–1500) + 273 К.

Принимая во внимание, что в состав продуктов горения входят также CO₂ и H₂O, которые обладают таким же теплосодержанием ($\Delta H_{\text{ср}} = 2129,2 \text{ кДж}/\text{м}^3$), но при более низких температурах, задаемся температурой (1400 + 273) К. По этой температуре (1673 К) определяем суммарное теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{\text{п.г}}^{1673K} = \sum \Delta H_{\text{п.г} i} V_{\text{п.г} i} = 2010 \cdot 3,31 + 2035,5 \cdot 1,66 + 3241,4 \cdot 0,84 + \\ + 2560,9 \cdot 0,68 = 14\ 496,22 \text{ кДж.}$$

Сравниваем полученные данные, а именно расчетное значение $Q_{\text{п.г}}^{\text{Tгор}}(13\ 818,54 \text{ кДж})$ для 1 кг древесины и $Q_{\text{п.г}}$ при $T= 1673 \text{ К} (14\ 496,22 \text{ кДж})$.

Теплосодержание продуктов горения при $T=1673 \text{ К}$ выше $Q_{\text{п.г}}=13818,54 \text{ кДж}$, следовательно, $T_{\text{г}} < 1673 \text{ К}$. Учитывая, что для $\Delta H_{\text{ср}} = 2129,2 \text{ кДж/м}^3$ температура находится между $1300—1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, задаем значение $T= (1300 + 273) \text{ К}$ и вновь определяем теплосодержание продуктов горения аналогично рассмотренным выше расчетам:

$$Q_{\text{п.г}}^{1673K} = 1861,2 \cdot 3,31 + 1877,5 \cdot 1,66 + 2979,1 \cdot 0,84 + \\ + 2345,5 \cdot 0,68 = 13374,61 \text{ кДж.}$$

Теплосодержание продуктов горения при $T= 1573 \text{ К}$ ниже расчетного: $Q_{\text{п.г}} = 13\ 818,54 \text{ кДж}$, следовательно, $T_{\text{г}} > 1573 \text{ К}$.

Таким образом, температура горения находится в интервале $2173 — 2373 \text{ К}$. Точное значение температуры горения находим интерполяцией, считая, что в этом интервале температур теплосодержание продуктов горения линейно зависит от температуры.

При разности температур $(1673 — 1573) = 100 \text{ К}$ теплосодержание изменится на:

$$14496,2 — 13374,61 = 1121,61 \text{ кДж.}$$

Разность между теплотой горения и теплосодержанием

$$13818,54 — 13374,61 = 443,93 \text{ кДж.}$$

Следовательно, истинная $T_{\text{г}}$ будет равна

$$T_{\text{г}} = 1573 + \frac{443,93}{1121,61} = 1573,4 \text{ К.}$$

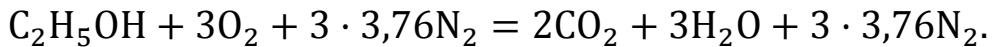
Ответ. Температура горения составляет $1573,4 \text{ К}$.

Пример 2.

Определить адиабатическую температуру горения этилового спирта в воздухе.

Решение.

Так как горючее — индивидуальное вещество, для определения объема и состава продуктов сгорания запишем уравнение химической реакции горения:



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

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

1. Определяем низшую теплоту горения, находим теплоту образования этанола — 278,2 кДж/моль.

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

2. Средняя энталпия продуктов горения

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

3. Так как $H_{\text{ср}}$ выражена в кДж/моль, выбираем, ориентируясь на азот и кислород, первую приближенную температуру горения $T_{\text{Г}} = 2100^{\circ}\text{C}$.

4. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2100°C :

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

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

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2000°C :

$$Q''_{\text{п.г}} = 108,2 \cdot 2 + 88,16 \cdot 3 + 66,8 \cdot 11,28 = 1235 \text{ кДж/моль.}$$

7. Так как $Q'_{\text{п.г}} < Q_{\text{н}} < Q''_{\text{п.г}}$, определяем температуру горения:

$$T_1^0 = 2000 + \frac{(1242,2 - 1235)(2100 - 2000)}{1303,7 - 1235} = 2010^{\circ}\text{C}.$$

Пример 3.

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

Решение.

1. Так как горючее представляет собой сложное вещество, рассчитаем состав продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \cdot \frac{60}{100} = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \cdot \frac{7}{100} + 1,24 \cdot \frac{8}{100} = 0,88 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \cdot 60 + 21 \left(7 - \frac{25}{6} \right) = 5,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий объем продуктов горения

$$V_{\text{п.г.}}^0 = 7,01 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания вещества по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_{\text{н}} = 339,4 - 60 + 1257 \cdot 7 - 108,9 \cdot 25 - 25,1(9 \cdot 7 + 8) = \\ = 24658,4 \text{ кДж/кг.}$$

3. Определяем среднюю энталпию продуктов горения:

$$H_{\text{ср}} = \frac{24658,4}{7,01} = 3517,6 \text{ кДж/м}^3.$$

4. Так как величина энталпии рассчитана в кДж/м³, ориентируясь на азот, принимаем T₁ = 2300 °C.

5. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 2300 °C:

$$Q_{\text{п.г.}} = 5660,7 \cdot 1,12 + 4667,1 \cdot 0,88 + 3469,1 \cdot 5,01 = 27827,2 \text{ кДж/кг.}$$

6. Сравнивая Q_н и Q'_{п.г.} (Q_н > Q'_{п.г.}), выбираем вторую приближенную температуру, равную 1900 °C.

7. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1900 °C:

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

8. Так как Q''_{п.г.} < Q_н < Q_{п.г.}, определяем температуру горения:

$$T_{\text{г}} = 1900 + \frac{(2395,4 - 22498,8)(23 - 1900)}{27827,2 - 22498,8} \sim 2010 \text{ °C.}$$

Пример 4.

Рассчитать действительную температуру горения фенола $\Delta H_{\text{обр}} = 4,2$ кДж/моль, если потери тепла излучением составили 25 % от Q_h , а коэффициент избытка воздуха при горении равен 2,2.

Решение.

1. Определяем состав продуктов горения:



$$V_{\text{CO}_2} = 6 \text{ моль};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моля};$$

$$V_{\text{N}_2} = 26,32 \text{ моля};$$

$$\Delta V_b = (7 + 7 \cdot 3,76)(2,2 - 1) = 39,98 \text{ моля.}$$

$$V_{\text{п.г.}} = 75,3 \text{ моля.}$$

2. Определяем низшую теплоту сгорания фенола:

$$Q_h = 6 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - 1 \cdot 4,2 = 3103,8 \text{ кДж/моль.}$$

3. Так как по условию задачи 25 % тепла теряется, определяем количество тепла, пошедшее на нагрев продуктов горения (теплосодержание продуктов горения при температуре горения):

$$Q_{\text{п.г.}} = Q_h - (1 - \eta),$$

где η — доля теплопотерь в результате излучения энергии, химического и механического недожога.

$$Q_{\text{п.г.}} = 3103,8(1 - 0,25) = 2327,85 \text{ кДж/моль.}$$

4. Определяем действительную температуру горения:

$$T_g^d = 273 + \frac{2327,85}{10^{-3}(50,85 - 6 + 39,87 \cdot 3 + 31,81 \cdot 26,32 + 32,26 \cdot 39,98)} = 1185,17 \text{ К.}$$

Ответ. Действительная температура горения равна 1185 К.

Методика определения температуры горения других классов веществ аналогична. В случае горения индивидуальных химических соединений удобнее пользоваться размерностями кмоль/кмоль при определении $V_{\text{п.г.}}^{\text{пр}}$

и кДж/кмоль — при нахождении $Q_{\text{п.г}}$ и $\Delta H_{\text{ср}}$. На практике используется калориметрическая температура горения и температура пожара. При этом различают температуру внутреннего и наружного пожара.

Температура внутреннего пожара — это средняя температура дыма в помещении, где происходит пожар.

Температура наружного пожара — это температура пламени.

Задание 1

Рассчитать калориметрическую температуру горения керосина следующего состава: С – 86 %; Н – 13,7 %; S – 0,3 %, если теплота его образования $Q = 20,2$ ккал/моль.

Задание 2

Рассчитать теоретическую температуру горения керосина следующего состава: С – 86 %; Н – 13,7 %; S – 0,3 %, если теплота его образования $Q = 20,2$ ккал/моль.

Задание 3

Рассчитать калориметрическую температуру горения мазута следующего состава: С – 43 %; Н – 13,7 %; S – 0,8 %, если теплота его образования $Q = 18,4$ ккал/моль.

Задание 4

Рассчитать действительную температуру горения газовой смеси, следующего состоящей из Н – 45%, C_3H_8 – 30%, O_2 – 15%, N_2 – 10%, если потери тепла составили 30 % $Q_{\text{н}}$, а коэффициент избытка воздуха при горении равен 1,8.

Задание 5

Рассчитать действительную температуру горения бутано-воздушной смеси стехиометрической концентрации на нижнем концентрационном пределе воспламенения (1,9 %) бутана и 98,1 % воздуха.

Задание 6

Определить количество сгоревшего антрацита (С = 100 %) в помещении объемом 180 м³, если среднеобъемная температура возросла с 305 до 625 К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абдурагимов, И. М.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И. М. Абдурагимов, В. Д. Говоров, В. Е. Макаров. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1980.
2. *Абдурагимов, И. М.* Процессы горения : учеб. пособие / И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Л. К. Исаева. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1984.
3. *Андросов, А. С.* Методические указания к решению задач по курсу «Процессы горения» / А. С. Андросов. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1984.
4. *Арефьев, К. М.* Основы практической теории горения / К. М. Арефьев [и др.]. – Л. : Энергоатомиздат, 1986.
5. Основы теории неуправляемого горения и взрыва / О. Г. Казаков [и др.]. – Брянск : БГТУ, 2005.
6. *Саломахин, Т. М.* Физические основы механического взрыва и методы определения взрывных нагрузок / Т. М. Саломахин – М. : ВИН, 1974.
7. *Смирнов, Н. Н.* Гетерогенное горение / Н. Н. Смирнов, И. Н. Зверев. – М. : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 1992.