



**МЧС РОССИИ**

«Уральский институт Государственной противопожарной службы  
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

кафедра химии и процессов горения

## **ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

Методические рекомендации по самостоятельной подготовке к  
контрольной работе

Специальность 40.05.03 Судебная экспертиза

Екатеринбург  
2022

**Теория горения и взрыва** [Электронный ресурс] : методические рекомендации по самостоятельной подготовке к контрольной работе. Специальность 40.05.03 Судебная экспертиза / сост. Е.В. Гайнуллина, А.В. Кокшаров. – Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2022. – 19 с.

Авторы-составители: Гайнуллина Е.В., доцент кафедры химии и процессов горения, к.т.н, доцент.

Кокшаров А.В., начальник кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России, к.х.н.

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с рабочей программой дисциплины «Теория горения и взрыва» по специальности 40.05.01 Судебная экспертиза. В пособии представлены теоретические вопросы для подготовки к контрольным работам, примеры решения задач и критерии оценки, а также список литературы.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 40.05.01 Судебная экспертиза.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. Теоретические вопросы для подготовки к письменной контрольной работе.....	5
1.1. Основы процессов горения.....	5
1.2. Материальный баланс процессов горения.....	6
1.3. Тепловой баланс процессов горения .....	11
2. Критерии оценки результатов выполнения контрольной работы .....	15
3. Примерный вариант билета для выполнения контрольной работы ..	16
ЛИТЕРАТУРА.....	19

## **ВВЕДЕНИЕ**

Целью разработки данного методического пособия является подготовка обучающихся к проверке усвоения полученных теоретических знаний и практических навыков по дисциплине «Теория горения и взрыва» в виде выполнения контрольной работы.

Завершением изучения раздела дисциплины является выполнение контрольной работы, её выполнение способствует развитию навыков выполнения теоретических расчётов по определению основных параметров горения, воспитывает культуру оформления и представления их результатов.

Задания для контрольной работы соответствуют содержанию рабочей программы и тематическому плану учебной дисциплины «Теория горения и взрыва». Согласно данным документам предусматривается проведение одной контрольной работы по первому разделу «Основные представления о горении».

# 1. Теоретические вопросы для подготовки к письменной контрольной работе

## 1.1. Основы процессов горения

*Горением* называется сложный, самоподдерживающийся физико-химический процесс, представляющий собой окислительно-восстановительную реакцию, протекающую с большой скоростью и сопровождающуюся выделением тепла и излучением света.

Для горения необходимо наличие трёх составляющих:

- горючего вещества;
- окислителя (кислород воздуха, озон, галогены, перманганат калия, хромовый ангидрид и т. д.);
- источника зажигания (открытое пламя, искры различного происхождения, высоко нагретые поверхности) или благоприятствующего фактора (физико-химический или биологический процесс, протекающий с выделением тепла).

С точки зрения электронной теории, горение – это перераспределение валентных электронов между горючим веществом и окислителем.

Горючим веществом называется вещество, атомы молекул которого способны отдавать в процессе реакции свои валентные электроны. Горючее вещество в процессе реакции окисляется, образуя продукты окисления.

Окислителем называется вещество, атомы молекул которого способны присоединять валентные электроны в процессе реакции. Окислитель в ходе реакции восстанавливается.

Процесс горения как одна из форм химического взаимодействия атомов и молекул может быть по-настоящему понятен только на основе изучения молекулярно-кинетической теории строения материи. Необходимо представлять, что в химических процессах прежде чем образуются новые молекулы, разрушаются старые. Энергия, необходимая для разрыва связей в молекулах горючего и окислителя, называется *энергией активации*. Разрушение или ослабление химических связей в молекулах происходит под действием теплового движения атомов. Чем выше температура, тем выше доля активных молекул, эффективнее соударения и больше их число. Для реакции горения, как и для многих других химических реакций, справедливо положение: повышение температуры на 10 °C приводит к увеличению её скорости в 2–4 раза (*правило Вант-Гоффа*). Кроме того, скорость реакции, согласно *закону действующих масс*, увеличивается с возрастанием концентрации реагентов. Скорость горения максимальна при стехиометрическом составе смеси – когда соотношение количеств реагентов соответствует коэффициентам в уравнении реакции.

В условиях пожара горение чаще всего протекает в среде воздуха. Для

решения задач по определению основных параметров, характеризующих процесс горения, необходимо уметь составлять уравнения реакций горения горючих веществ в воздухе.

Обобщённая запись брутто-уравнения материального баланса реакции горения имеет вид:

$$n_{\text{ГВ}}[\text{ГВ}] + n_{\text{ОК}}[\text{ОК}] = \sum n_{\text{ПГ}i}[\text{ПГ}], \quad (1)$$

где  $n_{\text{ГВ}}$ ,  $n_{\text{ОК}}$ ,  $n_{\text{ПГ}i}$  – стехиометрические коэффициенты при соответствующих веществах: [ГВ] – горючее вещество, [ОК] – окислитель, [ПГ] – продукты горения.

Данное уравнение является обобщённым выражением материального баланса любой химической реакции окисления. Оно не несёт информации о промежуточных стадиях процесса, которых может быть великое множество, а выражает только начальное и конечное состояние системы. Поэтому его называют также суммарным или брутто-уравнением реакции горения. Для решения многих инженерно-технических задач этого уравнения бывает достаточно.

При составлении уравнений материального баланса процессов горения принято учитывать не только кислород, принимающий участие в реакции окисления, но и азот, входящий в состав воздуха. Воздух состоит из азота, кислорода, углекислого и инертных газов.

Для практических расчётов принимают содержание кислорода в воздухе равным 21 % (об.), а азота – 79 % (об.). Нетрудно установить, что на 1 объём кислорода в воздухе приходится 3,76 объёмов азота ( $79 : 21 = 3,76$ ) или на 1 моль кислорода приходится 3,76 моля азота. Состав воздуха в уравнениях реакций горения записывается как ( $\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2$ ).

В реакциях горения принимает участие только кислород. Азот в реакцию не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения. В левой части уравнения реакции горения записывают горючее вещество и воздух, в правой части – продукты горения.

Рассмотрим примеры составления уравнений реакций горения горючих веществ в воздухе.

## **1.2. Материальный баланс процессов горения**

При решении многих практических вопросов необходимо знать количество воздуха, расходуемого на горение единицы массы или объёма горючего вещества, количество образовавшихся продуктов горения и их процентный состав. Теоретической базой для расчётов материального баланса является закон сохранения вещества. Рассмотрим расчётные методы определения отдельных составляющих материального баланса процессов горения.

Методика расчёта объёма воздуха для горения зависит от состава

горючего вещества, его агрегатного состояния и условий горения. По своей природе горючие вещества могут быть индивидуальными химическими соединениями, соединениями сложного состава или газовыми смесями. К *индивидуальным* химическим соединениям относятся такие вещества, которые имеют постоянный химический состав и химическую формулу, например, бензол ( $C_6H_6$ ), пропанол ( $C_3H_7OH$ ), уксусная кислота ( $CH_3COOH$ ) и др. Состав химических соединений сложного состава нельзя выразить одной химической формулой. К этой группе веществ относятся уголь, нефть, древесина, жиры и др. Состав этих веществ выражается в процентном содержании отдельных элементов или газов (C, S, H, и др. или CO,  $CH_4$ ,  $H_2S$  и др.).

Различают объём воздуха, теоретически необходимый для горения ( $V_B^{теор.}$ ), и объём воздуха, действительно (практически) израсходованный на горение ( $V_B^{действ.}$ ). Действительный объём воздуха рассчитывается по формуле:

$$V_B^{действ} = \alpha \cdot V_B^{теор}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

*Коэффициент избытка воздуха* показывает, во сколько раз объём воздуха, поступивший на горение, больше теоретического объёма воздуха, необходимого для полного сгорания единицы количества вещества газовой смеси стехиометрического состава.

Разность между действительным и теоретически необходимым для горения количеством воздуха называют *избыточным объёмом воздуха* ( $\Delta V_B$ ).

$$\Delta V_B = V_B^{действ} - V_B^{теор}. \quad (3)$$

Объём продуктов горения, образовавшихся при сжигании единицы горючего (1 кг, 1 м<sup>3</sup>, 1 кмоль) в теоретическом количестве воздуха, равен сумме объёмов углекислого газа, паров воды и азота:

$$V_{Пг}^{теор} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}. \quad (4)$$

Полный, действительный объём продуктов горения рассчитывается с учётом избытка воздуха:

$$V_{Пг}^{действ} = V_{Пг}^{теор} + \Delta V_B = V_{Пг}^{теор} + (\alpha - 1) \cdot V_B^{теор}. \quad (5)$$

Для удобства расчётов горючие вещества разделяют на следующие группы (табл. 1): индивидуальные химические соединения (в газообразном и конденсированном состоянии); вещества сложного состава (древесина, торф, нефть и т. п.); смесь газов (генераторный, попутный газы и т. п.).

Расчётные формулы для определения теоретического объёма воздуха,  
необходимого для сгорания веществ

Группа горючих веществ	Расчётные формулы	Размер-ность
Индивидуальное горючее вещество в газообразном состоянии	$V_B^{\text{теор}} = \frac{\beta + n_{N_2}}{n_{ГВ}} \quad (6)$	м³/м³
Индивидуальное горючее вещество в конденсированном состоянии	$V_B^{\text{теор}} = \frac{(\beta + n_{N_2}) \cdot V_t}{n_{ГВ} \cdot M_{ГВ}} \quad (7)$	м³/кг
Смесь газов	$V_B^{\text{теор}} = \frac{\sum \beta_i \cdot \varphi_i - \varphi_{O_2}}{21} \quad (8)$	м³/м³
Вещество сложного состава в конденсированном состоянии	$V_B^{\text{теор}} = 0,269 \cdot \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right) \quad (9)$	м³/кг

Здесь  $n_{ГВ}$ ,  $n_{N_2}$  – количество горючего вещества и азота, получаемое из уравнения реакции горения, кмоль/кмоль;

$\beta_i$  – стехиометрический коэффициент при кислороде;

$M_{ГВ}$  – молекулярная масса горючего вещества;

$V_t$  – молярный объём газа при заданных условиях, м³/кмоль;

C, H, S, O – весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего вещества, % масс.;

$\varphi_i$  – процентное содержание  $i$ -того компонента в смеси;

$\varphi_{O_2}$  – процентное содержание кислорода в газовой смеси.

Для газообразных горючих веществ расчёт объёмов воздуха и продуктов горения проводят в расчёте на 1 м³, т.е. в м³/м³. Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твёрдом), то, как правило, расчёты объёмов воздуха и продуктов горения проводят на 1 кг вещества, т.е. в м³/кг.

Для определения объёма воздуха при горении в условиях, отличных от нормальных, пользуются объединённым газовым законом:

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1}, \quad (10)$$

где  $P_0$  – нормальное давление, Па;

$T_0$  – нормальная температура, К;

$V_0$  – объём воздуха при нормальных условиях (м³ или м³/кмоль);

$P_1, T_1, V_1$  – соответственно давление, объём и температура, характеризующие заданные условия горения.



Иногда на практике приходится решать обратную задачу – по известному процентному содержанию кислорода в продуктах горения ( $\varphi_{O_2}$ ) находить коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} \cdot V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}}}{V_B^{\text{теор}} \cdot (21 - \varphi_{O_2})}. \quad (11)$$

Если содержание кислорода в окислительной среде отличается от содержания его в воздухе, то формулу (11) можно записать в виде:

$$\alpha = 1 + \frac{\varphi_{O_2} \cdot V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}}}{V_B^{\text{теор}} \cdot (\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2})}, \quad (11, a)$$

где  $\varphi_{O_2}^0$  – исходное содержание кислорода в окислительной среде, %;

$\varphi_{O_2}$  – содержание кислорода в продуктах горения, %.

Для веществ, у которых объём продуктов горения равен объёму израсходованного воздуха (например, горение углерода, серы), то формула (11) упрощается:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}, \quad (12)$$

$$\text{или } \alpha = \frac{\varphi_{O_2}^0}{\varphi_{O_2}^0 - \varphi_{O_2}}. \quad (12, a)$$

В случае образования продуктов неполного сгорания ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  и др.) формула (12) приобретает вид

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2} + 0,5\varphi_{CO} + 0,5\varphi_{H_2} + 2\varphi_{CH_4}}, \quad (12, б)$$

где  $\varphi_{O_2}$ ,  $\varphi_{CO}$ ,  $\varphi_{CH_4}$ ,  $\varphi_{H_2}$  – содержание кислорода, угарного газа, метана и водорода в продуктах горения, % об.

При расчёте объёма продуктов горения пользуются формулами, приведёнными в табл. 2.

**Расчётные формулы для определения теоретического объёма  
продуктов горения**

Группа горючих веществ	Расчётные формулы	Размерность
Индивидуальное горючее вещество в газообразном состоянии	$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = \frac{\sum n_{\text{ПГ}}}{n_{\text{ГВ}}} \quad (13)$	м³/м³
Индивидуальное горючее вещество в конденсированном состоянии	$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = \frac{\sum n_{\text{ПГ}} \cdot V_t}{n_{\text{ГВ}} \cdot M_{\text{ГВ}}} \quad (14)$	м³/кг
Смесь газов	$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = \sum \frac{\sum n_{\text{ПГ}i} \cdot \varphi_{\text{ГВ}i}}{n_{\text{ГВ}i} \cdot 100} + \frac{\varphi_{\text{НЕГОР}}}{100} \quad (15)$	м³/м³
Вещество сложного состава в конденсированном состоянии	$V_{\text{ПГ}}^{\text{теор}} = 1,86 \cdot \frac{C}{100} + \left( 11,2 \cdot \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} \right) + 0,7 \cdot \frac{S}{100} + \frac{1}{100} \cdot \left[ 7C + 21 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,63S + 0,8N \right] + \frac{\varphi_{\text{НЕГОР}}}{100} \quad (16)$	м³/кг

Здесь  $n_{\text{ГВ}}, n_{\text{ПГ}}, n_{\text{N}_2}$  – количество горючего, продуктов горения и азота, кмоль/кмоль;

$M_{\text{ГВ}}$  – молекулярная масса горючего вещества;

$V_t$  – молярный объём газа при заданных условиях, м³/кмоль;

C, H, S, O, N – весовое содержание соответствующих элементов в составе горючего вещества, % масс.;

$\varphi_i$  – процентное содержание  $i$ -того компонента в смеси, %;

$\varphi_{\text{O}_2}$  – процентное содержание кислорода в газовой смеси, %;

W – влажность, %.

Расчёт объёмов продуктов горения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) при горении веществ сложного состава проводится по следующим формулам:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \cdot \frac{C}{100} \quad (17)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \cdot \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} \quad (18)$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{1}{100} \left[ 7 \cdot C + 21 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,6 \cdot S + 0,8 \cdot N \right] \quad (19)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \cdot \frac{S}{100} \quad (20)$$

Процентный состав продуктов горения рассчитывается исходя из количества молей продуктов горения. Например, процентное содержание паров воды в продуктах горения составит, %

$$\% \text{H}_2\text{O} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{\sum n_{\text{ПГ}}} \quad (21)$$

Если горение протекает с избытком воздуха, то при расчёте количества молей продуктов горения учитывается избыточное число молей кислорода и азота ( $\Delta n_{\text{O}_2}$  и  $\Delta n_{\text{N}_2}$ ), %

$$\% \text{H}_2\text{O} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{\sum n_{\text{ПГ}} + \Delta n_{\text{O}_2} + \Delta n_{\text{N}_2}}, \quad (22)$$

$$\text{где } \Delta n_{\text{O}_2} = \beta \cdot (\alpha - 1), \quad (23)$$

$$\Delta n_{\text{N}_2} = n_{\text{N}_2} \cdot (\alpha - 1). \quad (24)$$

### 1.3. Тепловой баланс процессов горения

Под температурой горения понимают максимальную температуру, до которой нагреваются продукты горения. В целом различают теоретическую, калориметрическую, адиабатическую и действительную температур горения.

*Теоретическая температура горения* – это температура, при которой выделившаяся теплота горения смеси стехиометрического состава расходуется на нагрев и диссоциацию продуктов горения. Практически диссоциация продуктов горения начинается при температуре выше 2000 К.

*Калориметрическая температура горения* – это температура, которая достигается при горении стехиометрической горючей смеси с начальной температурой 273 К и при отсутствии потерь в окружающую среду.

*Адиабатическая температура горения* – это температура полного сгорания смесей любого состава при отсутствии тепловых потерь в окружающую среду.

*Действительная температура горения* – это температура горения, достигаемая в условиях реального пожара. Она намного ниже теоретической, калориметрической и адиабатической, т. к. в реальных условиях до 40 % теплоты горения обычно теряется на излучение, недожог, нагрев избытка воздуха и т. д.

Экспериментальное определение температуры горения для большинства горючих веществ представляет значительные трудности, особенно для жидкостей и твёрдых материалов. Однако в ряде случаев теория позволяет с

достаточной для практики точно вычислить температуру горения веществ, основываясь только на знании их химической формулы, состава исходной горючей смеси и продуктов горения.

В общем случае для вычислений используется следующая зависимость (приближённая, так как  $C_p = f(T)$ ):

$$Q_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}} \cdot C_p \cdot T_{\text{Г}}, \quad (25)$$

где  $Q_{\text{ПГ}}$  – энтальпия продуктов горения;

$V_{\text{ПГ}}$  – объём продуктов горения, м<sup>3</sup>/кг;

$C_p$  – средняя объемная теплоемкость смеси продуктов горения в интервале температур от  $T_0$  до  $T_{\text{Г}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);

$T_{\text{Г}}$  – температура горения, К.

Энтальпия продуктов горения определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{ПГ}} = Q_{\text{Г}} + Q_{\text{исх}} - Q_{\text{пот}}, \quad (26)$$

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{недож}} + Q_{\text{дисс}}, \quad (27)$$

где  $Q_{\text{Г}}$  – теплота сгорания;

$Q_{\text{исх}}$  – теплота исходных веществ (по величине равна сумме энтальпий горючего вещества и окислителя);

$Q_{\text{изл}}$  – теплота, передаваемая излучением;

$Q_{\text{пот}}$  – потери тепла за счёт излучения, недожога и диссоциации продуктов горения.

В зависимости от рода учитываемых потерь теплоты в зоне горения (на излучение, недожог, диссоциацию продуктов горения) вычисляется та или иная температура.

При кинетическом горении газопаровоздушных смесей потери теплоты из зоны горения пренебрежимо малы, поэтому для этих смесей действительная температура горения близка к адиабатической, которую и используют в пожарно-технических расчетах.

Среднюю теплоемкость смеси продуктов горения определить очень сложно. Ориентировочно энтальпия смеси продуктов горения может быть выражена как сумма энтальпий ее компонентов:

$$Q_{\text{ПГ}} = \Sigma (V_{\text{ПГ}})_i \cdot (C_p)_i \cdot T_{\text{Г}}, \quad (28)$$

где  $(V_{\text{ПГ}})_i$  – количество  $i$ -го компонента продуктов горения;

$(C_p)_i$  – средняя объемная теплоемкость  $i$ -го компонента при  $T_{\text{Г}}$  и постоянном давлении;

$T_{\text{Г}}$  – температура горения.

При расчётах температуры горения пользуются величиной  $Q_H$  (низшей теплотой сгорания), так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии.

Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводятся в справочной литературе, а также могут быть рассчитаны из следствия закона Гесса:

$$Q_H = (\sum \Delta H_{обр_i} \cdot n_i)_{\text{прод}} - (\sum \Delta H_{обр_i} \cdot n_i)_{\text{исх}}, \quad (29)$$

где  $\Delta H_{обр_i}$  – теплота образования  $i$ -го вещества,

$n_i$  – количество молей  $i$ -го вещества.

Согласно следствию из закона Гесса, тепловой эффект химической реакции равен разности сумм теплот образования продуктов реакции и теплот образования исходных веществ. Напомним из курса химии, что теплота образования простых веществ (кислорода, азота и др.) равна нулю.

При сгорании смеси газообразных индивидуальных веществ сначала определяют теплоту сгорания каждого компонента ( $Q_{Hi}$ ), а затем их суммируют с учётом процентного содержания каждого горючего газа ( $\phi_{ГВ_i}$ ) в смеси,  $\text{кДж/м}^3$ :

$$Q_H^{\text{см}} = \sum Q_{Hi} \cdot \frac{\phi_{ГВ_i}}{100}. \quad (30)$$

Если горючее является сложным веществом и его элементный состав задан в массовых процентах, то для расчёта теплоты сгорания используют *формулу Менделеева*:

$$Q_H = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9(O + N - S) - 25(9 \cdot H + W), \text{ кДж/кг}, \quad (31)$$

где  $C, H, O, N, S$  – процентное содержание данного элемента в горючем веществе;

$W$  – содержание влаги в веществе, масс. %.

Высшая теплота сгорания рассчитывается в том случае, если происходит конденсация паров воды и вода выделяется в конденсированном состоянии. Расчёт производят по формуле:

$$Q_v = 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9(O + N - S), \text{ кДж/кг}. \quad (32)$$

Формула для расчёта температуры горения выводится из уравнения теплового баланса, считая при этом, что выделившаяся в результате сгорания теплота расходуется на нагрев продуктов горения от начальной температуры  $T_0$  до температуры горения  $T_G$ .

$$Q_H(1 - \eta) = \sum c_{p\Pi i} \cdot V_{\Pi i}(T_G - T_0), \quad (33)$$

Где  $\eta$  – коэффициент теплопотерь (доля потерь тепла на излучение, а также в результате неполноты сгорания);

$C_{p_{\Pi i}}$  – теплоёмкость  $i$ -го продукта горения при постоянном давлении, кДж/моль К;

$V_{\Pi i}$  – объём  $i$ -го продукта горения, м<sup>3</sup>.

Расчёт объёма продуктов горения (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) проводится по формулам 17-20.

Из уравнения теплового баланса

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{н}}(1 - \eta)}{\sum c_{p_{\Pi i}} \cdot V_{\Pi i}}. \quad (34)$$

Трудность в расчётах температуры горения по этой формуле заключается в том, что теплоёмкость газа зависит от температуры. Так как газы нагреваются от температуры  $T_0$  до температуры  $T_{\Gamma}$ , то в формулу (34) необходимо подставить среднее значение теплоёмкости именно в этом интервале температур. Если температура горения неизвестна, то в этом случае можно поступить следующим образом. Среднее значение температуры горения большинства веществ в воздухе составляет примерно 1500 К. Поэтому с небольшой погрешностью для расчётов  $T_{\Gamma}$  можно взять среднее значение теплоёмкости в интервале температур от 273 до 1500 К. Эти значения для основных продуктов горения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения теплоёмкостей основных продуктов горения в интервале температур 273-1500 К

Вещество	Удельная теплоёмкость, $C_{p_i}$	
	кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	кДж/(моль·К)
Диоксид углерода	2,27	$5,08 \cdot 10^{-2}$
Диоксид серы	2,28	$5,11 \cdot 10^{-2}$
Вода (пар)	1,78	$3,99 \cdot 10^{-2}$
Азот	1,42	$3,18 \cdot 10^{-2}$
Воздух	1,44	$3,23 \cdot 10^{-2}$

Средние значения теплоёмкостей некоторых газообразных веществ в различных температурных интервалах приведены в информационно-справочном материале [9].

## **2. Критерии оценки результатов выполнения контрольной работы**

Оценка знаний обучаемых на основании результатов выполнения контрольной работы проводится по пятибалльной системе.

Отметка «отлично»: задачи решены правильно, изложены в полном объеме грамотным научным языком, допускаются неточности в арифметических расчетах, не влияющие на конечный результат.

Отметка «хорошо»: допускаются погрешности в формулировках, не искажающие суть излагаемого вопроса, при решении задач допускаются арифметические неточности, не влияющие на конечный результат.

Отметка «удовлетворительно»: при решении типовых задач допущены не существенные ошибки с химической точки зрения.

Отметка «неудовлетворительно»: студент неграмотно и неточно формулирует изученные химические законы и не умеет применять их на практике.

### 3. Примерный вариант билета для выполнения контрольной работы

1. Сгорает 4 м<sup>3</sup> пропана (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Рассчитать теоретический объём воздуха, объём и состав (в объёмных %) продуктов горения. Условия нормальные.

2. Определить объёмы воздуха и продуктов горения при сжигании 2 кг горючего вещества, имеющего элементный состав: С = 50 %; Н = 10 %; N = 10 %; золы = 12 %; влаги = 18 %. Считать, что воздух и продукты горения находятся при нормальных условиях.

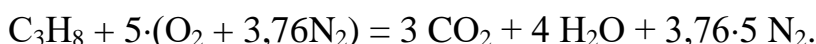
3. Рассчитать теплоту сгорания этана.

4. Рассчитать действительную температуру горения вещества сложного состава, состоящего из 40 % углерода, 20 % водорода, 30 % азота, 10 % влаги. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,2, а потери тепла на излучение составляют 30 %.

#### *Решение задачи №1.*

Сгорает индивидуальное горючее вещество в газообразном состоянии.

1. Запишем уравнение реакции горения пропана в воздухе:



2. Рассчитаем теоретические объёмы воздуха и продуктов горения по формулам (6) и (13) в расчёте на 1 м<sup>3</sup> горючего вещества:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = \frac{5 \cdot (1 + 3,76)}{1} = 23,8 \text{ (м}^3/\text{м}^3\text{)};$$

$$V_{\text{пр}}^{\text{теор}} = \frac{3 + 4 + 5 \cdot 3,76}{1} = 25,8 \text{ (м}^3/\text{м}^3\text{)}.$$

3. Учитывая, что сгорает не 1 м<sup>3</sup> газа, а 4 м<sup>3</sup>, находим фактические объёмы воздуха и продуктов горения:

$$V_{\text{в}} = 23,8 \cdot 4 = 95,2 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$V_{\text{пр}} = 25,8 \cdot 4 = 103,2 \text{ (м}^3\text{)}.$$

4. Рассчитаем состав продуктов горения, %:

$$\% \text{CO}_2 = \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot 100}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2}} = \frac{3 \cdot 100}{3 + 4 + 5 \cdot 3,76} = 11,6 \text{ \%};$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 100}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2}} = \frac{4 \cdot 100}{3 + 4 + 5 \cdot 3,76} = 15,5 \text{ \%};$$

$$\% \text{N}_2 = \frac{n_{\text{N}_2} \cdot 100}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2}} = \frac{3,76 \cdot 5 \cdot 100}{3 + 4 + 5 \cdot 3,76} = 72,9 \text{ \%}.$$

**Ответ:** на сгорание 4 м<sup>3</sup> пропана необходимо 95,2 м<sup>3</sup> воздуха, при этом



образуется 103,2 м<sup>3</sup> продуктов горения, из которых CO<sub>2</sub> – 11,6 %, H<sub>2</sub>O – 15,5 %, N<sub>2</sub> – 72,9 %.

### **Решение задачи №2.**

1. Для решения задачи воспользуемся формулами (9) и (16).

$$V_B^{\text{теор}} = 0,269 \cdot \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S-O}{8} \right) = 0,269 \cdot \left( \frac{50}{3} + 10 \right) = 7,17 \text{ (м}^3/\text{кг)}$$

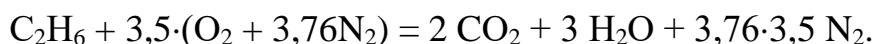
$$\begin{aligned} V_{\text{III}}^{\text{теор}} &= 1,86 \cdot \frac{C}{100} + (11,2 \cdot \frac{H}{100} + 1,24 \cdot \frac{W}{100}) + 0,7 \cdot \frac{S}{100} + \\ &+ \frac{1}{100} \cdot \left[ 7 \cdot C + 21 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2,63 \cdot S + 0,8 \cdot N \right] + \frac{\Phi_{\text{НЕГОР}}}{100} = \\ &= 1,86 \cdot 0,5 + (11,2 \cdot 0,1 + 1,24 \cdot 0,18) + 0,01 \cdot [7 \cdot 50 + 21 \cdot 10 + 0,8 \cdot 10] + 0,12 = 8,07 \text{ м}^3/\text{кг} \end{aligned}$$

При сгорании 2 кг горючего вещества образуется соответственно 14,34 и 16,14 м<sup>3</sup> воздуха и продуктов горения.

**Ответ:** При сгорании 2 кг горючего вещества расходуется 14,34 м<sup>3</sup> воздуха и образуется 16,14 м<sup>3</sup> продуктов горения.

### **Решение задачи №3.**

1. Запишем уравнение реакции горения этана.



2. Теплота горения согласно следствию из закона Гесса:

$$\Delta H_{\text{Г}} = \Delta H_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot n_{\text{C}_2\text{H}_6}.$$

Подставляя значения теплот образования CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> из справочной литературы и рассчитываем теплоту горения этана:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{Г}} &= \Delta H_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} \cdot n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot n_{\text{C}_2\text{H}_6} = \\ &= 2 \cdot (-393,51) + 3 \cdot (-241,81) - (-84,67) = -1427,78 \text{ кДж/моль} \end{aligned}$$

**Примечание:** знак «-» свидетельствует о том, что реакция экзотермическая.

**Ответ:** теплота сгорания этана составила -1427,78 кДж/моль.

#### **Решение задачи №4.**

1. Рассчитаем низшую теплоту сгорания горючего вещества, используя формулу Д. И. Менделеева (см. формулу 32):

$$\begin{aligned} Q_{\text{H}} &= 339,4 \cdot C + 1257 \cdot H - 108,9(O + N - S) - 25(9 \cdot H + W) = \\ &= 339 \cdot 40 + 1257 \cdot 20 - 109 \cdot 30 - 25 \cdot (9 \cdot 20 + 10) = 30680 \text{ (кДж/кг)}. \end{aligned}$$

2. Рассчитаем объёмы продуктов горения при полном сгорании 1 кг горючего вещества сложного состава:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 \cdot \frac{C}{100} = 1,86 \cdot \frac{40}{100} = 0,744 \text{ (м}^3\text{/кг)};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 \cdot \frac{H}{100} + 1,24 \frac{W}{100} = 11,2 \cdot \frac{20}{100} + 1,24 \frac{10}{100} = 2,364 \text{ (м}^3\text{/кг)};$$

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2} &= \frac{1}{100} \left[ 7C + 21\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2,6 \cdot S + 0,8 \cdot N \right] = \frac{1}{100} [7 \cdot 40 + 21 \cdot 20 + 0,8 \cdot 30] = \\ &= 7,24 \text{ (м}^3\text{/кг)}. \end{aligned}$$

В связи с тем, что горение происходит в избытке воздуха, то в продуктах горения будет присутствовать избыточный воздух, который не участвовал в горении.

3. Рассчитаем избыточный объём воздуха при полном сгорании 1 кг горючего вещества (см. формулу 9):

$$V_{\text{B}}^{\text{изб}} = 0,269 \left( \frac{40}{3} + 20 \right) \cdot (1,2 - 1) = 1,79 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

4. Рассчитаем температуру горения и, т.к. в условии задачи ничего не сказано о начальной температуре горения, будем считать, что горение протекает при нормальных условиях (см. формулу 35 и табл. 6):

$$T_{\Gamma} = 273 + \frac{30680 \cdot (1 - 0,3)}{2,27 \cdot 0,744 + 1,78 \cdot 2,364 + 1,42 \cdot 7,24 + 1,44 \cdot 1,79} = 1418 \text{ (K)}.$$

**Ответ:** действительная температура горения вещества сложного состава составила 1418 К.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Русинова Е. В. Теория горения и взрыва: учебное пособие : допущено Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве учебного пособия для курсантов и студентов. Екатеринбург: УрИ ГПС МЧС России, 2011 – 178 с.
2. Теория горения и взрыва: практикум : учеб. специальность 20.05.01 Пожарная безопасность, направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность, специальность 40.05.03 Судебная экспертиза / авт.сост. Е. В. Гайнуллина О. В. Беззапонная, М.Л. Кондратьева - Екатеринбург : УрИ ГПС МЧС России, 2021. - 87 с.
3. Гайнуллина Е. В. Теория горения и взрыва : информационно-справочный материал. Специальность 20.05.01 Пожарная безопасность. Направление подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность / сост. : Е. В. Гайнуллина, О. В. Беззапонная. - Екатеринбург : УрИ ГПС МЧС России, 2020. - 52 с.
4. Корольченко, А. Я. Процессы горения взрыва / А. .Я. Корольченко. - М. : Пожнаука, 2007. - 266 с.