

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для студентов по выполнению
практических работ
по учебной дисциплине

ОП.06 ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ ВЗРЫВА

Укрупненная группа: 20.00.00 Техносферная безопасность и
природообустройство
Специальность: 20.02.04 Пожарная безопасность
(базовый уровень подготовки)

Квалификация: техник
Форма обучения: очная

г. Южно-Сахалинск
2025г.

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по НМР

 Е.Н. Ермоласва

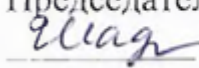
« 19 » 05 2025 г.

Составитель: Михайлов Д.В., преподаватель ПТК СахГУ

Одобрено на заседании ПЦК
общетехнических дисциплин

Протокол № 8 от «16» 04 2025г.

Председатель ПЦК

 О.И. Шадрина

Содержание

1.Образовательный маршрут выполнения практических занятий по ОП.06. Теория горения и взрыва

Разделы и темы практических работ	Количество часов	Формы и методы контроля
Раздел 1. Физико-химические основы горения		
Тема 1.5. Механизм химического взаимодействия при горении.		
№ 1. Составление реакций горения в кислороде и воздухе. Расчет количества исходных веществ и продуктов горения	4ч.	Визуальное наблюдение Индивидуальный отчёт Фронтальный опрос
Тема 1.6. Материальный баланс горения.		
№ 2. Расчет объемов воздуха для горения веществ и газовых смесей Расчет объемов продуктов горения веществ и газовых смесей	4ч.	Визуальное наблюдение Индивидуальный отчёт
Тема 1.8. Расчет теплового эффекта горения и теплоты сгорания.		
№ 3. Расчет теплового эффекта горения и теплоты сгорания.	4ч.	Фронтальный опрос Индивидуальный отчёт
Тема 1.9. Определение температуры горения вещества		
№ 4. Определение температуры горения вещества при нормальной и повышенной температуре	4ч.	Визуальное наблюдение Индивидуальный отчёт
Раздел 2. Основы теории взрыва		
Тема 2.1. Взрывы, их классификация. Ударная волна.		
№ 5. Расчет параметров энергии и мощности взрыва,	4ч.	Фронтальный опрос Индивидуальный отчёт
Тема 2.2. Взрывчатые вещества, их характеристика		
№ 6. Тротиловый эквивалент, его определение	4ч.	Визуальное наблюдение Индивидуальный отчёт
Раздел 3. Процессы возникновения и распространения в горения		
Тема 3.3. Предельные явления при горении Показатели пожарной опасности веществ и материалов		
№ 7. Определение концентрационных пределов распространения пламени	4ч.	Визуальное наблюдение Индивидуальный отчёт
№ 8. Определение температурных пределов распространения пламени, температуры вспышки	4ч.	Визуальное наблюдение Индивидуальный отчёт
Итого – 32 часа		

2. Тематика и содержание практических занятий

Раздел 1. Физико-химические основы горения

Тема 1.5. Механизм химического взаимодействия при горении.

Практическое занятие № 1. Составление реакций горения в кислороде и воздухе. Расчет количества исходных веществ и продуктов горения

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

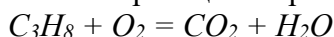
Задание 1: Фронтальный опрос

1. Определение понятия «Горение»
2. Условия возникновения горения
3. Виды горения
4. Определение понятия «Пожар»
5. Опасные факторы пожара
6. Состав воздуха
7. Состав продуктов горения

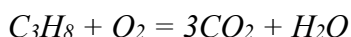
Задание 2: Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана C_3H_8 и глицерина $C_3H_8O_3$, аммиака NH_3 , сероуглерода CS_2 .

Горение пропана в кислороде

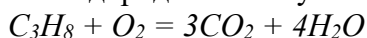
1. Записываем реакцию горения:



2. В молекуле пропана 3 атома углерода, из них образуется 3 молекулы углекислого газа.



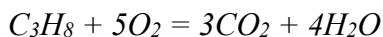
3. Атомов водорода в молекуле пропана 8, из них образуется 4 молекулы воды:



4. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения

$$2 \cdot 3 + 4 = 10$$

5. В левой части уравнения так же должно быть 10 атомов кислорода. Молекула кислорода состоит из двух атомов, следовательно, перед кислородом нужно поставить коэффициент 5.



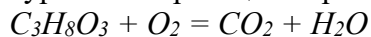
Коэффициенты, стоящие в уравнении реакции, называются **стехиометрическими коэффициентами** и показывают, сколько молей (кмолей) веществ участвовало в реакции или образовалось в результате реакции.

Стехиометрический коэффициент, показывающий число молей кислорода, необходимое для полного сгорания вещества, обозначается буквой β .

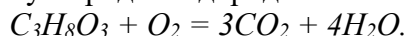
В первой реакции $\beta = 5$.

Горение глицерина в кислороде

1. Записываем уравнение реакции горения.



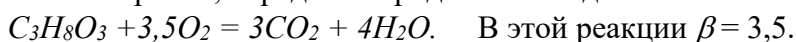
2. Уравниваем углерод и водород:



3. В правой части уравнения 10 атомов кислорода.

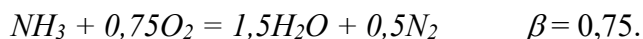
В составе горючего вещества есть 3 атома кислорода, следовательно, из кислорода в продукты горения перешли $10 - 3 = 7$ атомов кислорода.

Таким образом, перед кислородом необходимо поставить коэффициент $7 : 2 = 3,5$



Горение аммиака в кислороде

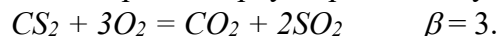
Аммиак состоит из водорода и азота, следовательно, в продуктах горения будут вода и молекулярный азот.



Обратите внимание, что перед горючим веществом коэффициент 1, а все остальные коэффициенты в уравнении могут быть дробными числами.

Горение сероуглерода в кислороде

Продуктами горения сероуглерода CS_2 будут углекислый газ и оксид серы (IV).

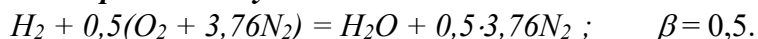


Задание 3:

Составить уравнение реакции горения в воздухе водорода H_2 , анилина $C_6H_5NH_2$, пропанола C_3H_7OH , угарного газа CO , хлорметана CH_3Cl , диэтилтиоэфира $(C_2H_5)_2S$, диметилфосфата $(CH_3)_2HPO_4$.

Составление реакций горения веществ в воздухе аналогично составлению реакций горения в кислороде. Особенность состоит только в том, что азот воздуха при температуре горения ниже 2000^0C в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

Горение водорода в воздухе



Обратите внимание, что стехиометрический коэффициент перед кислородом 0,5 необходимо поставить и в правой части уравнения перед азотом.

Горение пропанола в воздухе



В составе горючего есть кислород, поэтому расчет коэффициента β проводят следующим образом: $10 - 1 = 9$; $9 : 2 = 4,5$.

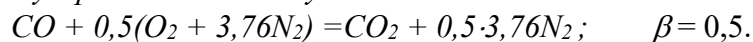
Горение анилина в воздухе



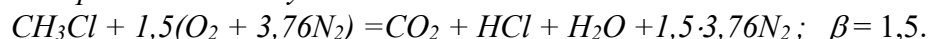
$$\beta = 7,75.$$

В этом уравнении азот в правой части уравнения встречается дважды: азот воздуха и азот из горючего вещества.

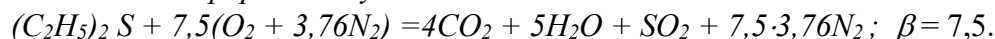
Горение угарного газа в воздухе



Горение хлорметана в воздухе



Горение диэтилтиоэфира в воздухе



Горение диметилфосфата в воздухе

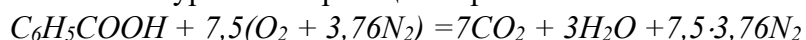


$$\beta = 3.$$

В процессах горения исходными веществами являются горючее вещество и окислитель, а конечными - продукты горения

Задание 4: Сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании 1 моля бензойной кислоты C_6H_5COOH ?

1. Запишем уравнение реакции горения бензойной кислоты.



2. Исходные вещества: 1 моль бензойной кислоты; 7,5 молей кислорода; $7,5 \cdot 3,76$ молей азота.

Газов воздуха всего $7,5 \cdot 4,76$ молей.

Всего $n_{\text{исх}} = 1 + 7,5 \cdot 4,76 = 36,7$ молей исходных веществ.

3. Продукты горения: 7 молей углекислого газа; 3 моля воды; $7,5 \cdot 3,76$ моля азота.

Всего $n_{\text{пр}} = 7 + 3 + 7,5 \cdot 3,76 = 38,2$ молей продуктов горения.

Формы контроля: Письменный отчет

Тема 1.6. Материальный баланс горения.

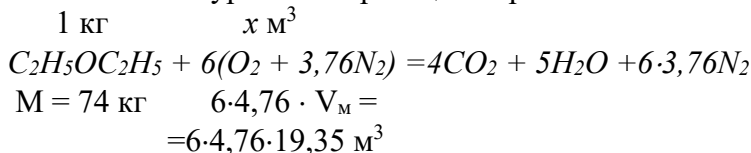
Практическое занятие № 2. Расчет объемов воздуха для горения веществ и газовых смесей
Расчет объемов продуктов горения веществ и газовых смесей

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Задание 1: Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира $C_2H_5OC_2H_5$? Температура 10^0C , давление 1,2 атм.

1. Записываем уравнение реакции горения



2. Записываем в уравнении известные и неизвестные величины с указанием размерности.

3. Молярная масса диэтилового эфира 74 кг/кмоль. Записываем эту величину под формулой эфира.

4. При нормальных условиях молярный объем (V_M) любого газообразного вещества составляет 22,4 л/моль или 22,4 м³/кмоль.

Если условия отличаются от нормальных, то необходимо определить, какой объем будет занимать 1 кмоль любого газообразного вещества при данных условиях. Расчет V_M ведут по формуле объединенного газового закона:

$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P}, \text{ где}$$

P и T – данные в задаче температура и давление.

Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль воздуха (как и любого другого газообразного вещества) при данных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{1 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{283}{1,2} = 19,35 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

Записываем данную величину под формулой воздуха, умножив ее на стехиометрический коэффициент (6·4,76).

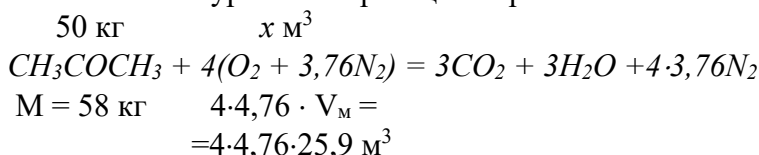
5. По уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания эфира:

$$V_{\text{в теор}} = x = \frac{1 \cdot 6 \cdot 4,76 \cdot 19,35}{74} = 7,5 \text{ м}^3$$

Задание 2. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 50 кг ацетона CH_3COCH_3 при температуре 23^0C и давлении 95 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,2?

Решение:

1. Записываем уравнение реакции горения



2. Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль воздуха (как и любого другого газообразного вещества) при данных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{101,3 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{296}{95} = 25,9 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

3. По уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания эфира:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = x = \frac{50 \cdot 4 \cdot 4,76 \cdot 25,9}{58} = 425,1 \text{ м}^3$$

4. По условию задачи коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

С учетом этого определим практический объем воздуха, необходимый для горения:

$$V_{\text{в}}^{\text{пр}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot \alpha = 425,1 \cdot 1,2 = \underline{510,1 \text{ м}^3}.$$

Задание 3. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 10 м^3 доменного газа следующего состава (в % объемных): оксид углерода (II) CO – 27 %, водород H_2 – 3 %, углекислый газ CO_2 – 13 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 56 %. Горение протекает при $\alpha = 1,3$.

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = \frac{\beta_1 \cdot \varphi_1 + \beta_2 \cdot \varphi_2 + \beta_3 \cdot \varphi_3 + \dots - \varphi(\text{O}_2)}{21} \cdot V, \text{ м}^3,$$

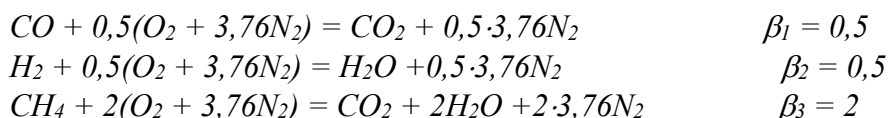
где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – стехиометрические коэффициенты при воздухе в уравнении реакции горения для каждого горючего компонента газовой смеси;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – концентрации каждого горючего компонента смеси (в объемных %);

$\varphi(\text{O}_2)$ – процентное содержание кислорода в горючем газе (в объемных %);

$V_{\text{с}}$ – объем газовой смеси, м^3 .

1. Определяем стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции горения для каждого горючего компонента газовой смеси. Горючими газами в этой смеси являются угарный газ CO, водород H_2 и метан CH_4 .



2. По формуле определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = \frac{0,5 \cdot 27 + 0,5 \cdot 3 + 2 \cdot 1}{21} \cdot 10 = 8,1 \text{ м}^3$$

3. С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной газовой смеси будет затрачено воздуха

$$V_{\text{в}}^{\text{пр}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot \alpha = 8,1 \cdot 1,3 = 10,5 \text{ м}^3.$$

Задание 4. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 5 кг торфа следующего состава (в %): C – 56,4 %, H – 5,04 %, O – 24,0 %, S – 0,06 %, N – 3,6 %, зола – 10,9 %. Горение протекает при $\alpha = 1,5$, условия нормальные.

$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = m \cdot 0,267 \left(\frac{\omega(\text{C})}{3} + \omega(\text{H}) + \frac{\omega(\text{S})}{8} - \frac{\omega(\text{O})}{8} \right),$$

1. По формуле определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца торфа:

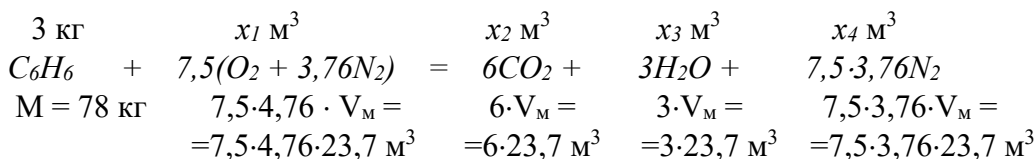
$$V_{\text{в}}^{\text{теор}} = 5 \cdot 0,267 \left(\frac{56,4}{3} + 5,04 + \frac{0,06}{8} - \frac{24}{8} \right) = 27,7 \text{ м}^3$$

2. С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной массы образца торфа будет затрачено воздуха

$$V_{\text{в}}^{\text{пр}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot \alpha = 27,7 \cdot 1,5 = 41,6 \text{ м}^3.$$

Задание 5. Определить объем и состав в объемных % продуктов горения, образовавшихся при сгорании 3 кг бензола C_6H_6 . Температура $20^\circ C$, давление 770 мм рт.ст., коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,4$.

1. Записываем уравнение реакции горения



2. Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль газообразных веществ при заданных температуре и давлении.

$$V_M = \frac{760 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{293}{770} = 23,7 \text{ м}^3/\text{кмоль}$$

3. Теоретический объем продуктов горения ($V_{\text{ПГ}}$) определяем по уравнению реакции.

$$V_{\text{ПГ}} = \frac{3 \cdot (6 + 3 + 7,5 \cdot 3,76) \cdot 23,7}{78} = 33,9 \text{ м}^3$$

4. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха, следовательно, в состав продуктов горения войдет избыточный воздух ΔV_v .

Для расчета избытка воздуха по уравнению реакции найдем теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания бензола:

$$V_v^{\text{теор}} = x_1 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 4,76 \cdot 23,7}{78} = 32,5 \text{ м}^3$$

Избыток воздуха определим по формуле (3.4):

$$\Delta V_v = V_v^{\text{теор}}(\alpha - 1) = 32,5(1,4 - 1) = 13 \text{ м}^3$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит:

$$V_{\text{ПГ}}^* = V_{\text{ПГ}} + \Delta V_v = 33,9 + 13 = 46,9 \text{ м}^3$$

5. Иногда возникает необходимость рассчитать объем отдельных компонентов продуктов горения и их процентный состав.

В этом случае по уравнению реакции определяем объем CO_2 , H_2O и N_2 .

$$V(CO_2) = x_2 = \frac{3 \cdot 6 \cdot 23,7}{78} = 5,47 \text{ м}^3$$

$$V(H_2O) = x_3 = \frac{3 \cdot 3 \cdot 23,7}{78} = 2,73 \text{ м}^3$$

$$V(N_2) = x_4 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 3,76 \cdot 23,7}{78} = 25,71 \text{ м}^3$$

$$\Delta V_v = 13 \text{ м}^3 \text{ (рассчитано в п.4)}$$

Объемная концентрация каждого компонента смеси рассчитывается следующим образом:

$$\varphi^{об}(CO_2) = \frac{V(CO_2) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*} = \frac{5,47 \cdot 100}{46,9} = 11,7 \%$$

$$\varphi^{об}(H_2O) = \frac{V(H_2O) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*} = \frac{2,73 \cdot 100}{46,9} = 5,8 \%$$

$$\varphi^{об}(N_2) = \frac{V(N_2) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*} = \frac{25,71 \cdot 100}{46,9} = 54,8 \%$$

$$\varphi^{об}(\Delta V_v) = \frac{V(\Delta V_v) \cdot 100}{V_{\text{ПГ}}^*} = \frac{13 \cdot 100}{46,9} = 27,7 \%$$

Формы контроля: Письменный отчет

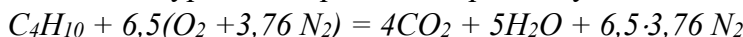
Тема 1.8. Расчет теплового эффекта горения и теплоты сгорания. Практическое занятие № 3. Расчет теплового эффекта горения и теплоты сгорания.

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Задание 1: Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль бутана C_4H_{10} .

1. Запишем уравнение реакции горения бутана.



2. Выражение для теплового эффекта этой реакции по I следствию закона

Гесса

$$\Delta H^0_{p-u} = 4\Delta H^0(CO_2) + 5\Delta H^0(H_2O) - \Delta H^0(C_4H_{10}).$$

3. По таблице 1 приложения находим значения энтальпий образования углекислого газа, воды (газообразной) и бутана.

$$\Delta H^0(CO_2) = -393,5 \text{ кДж/моль}; \Delta H^0(H_2O) = -241,8 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(C_4H_{10}) = -126,2 \text{ кДж/моль}.$$

Подставляем эти значения в выражение для теплового эффекта реакции

$$\Delta H^0_{p-u} = 4 \cdot (-393,5) + 5 \cdot (-241,8) - (-126,2) = -1656,8 \text{ кДж}$$

$$\Delta H^0_{p-u} = \Delta H^0_{гор} = -1656,8 \text{ кДж/моль или } Q_{гор} = +1656,8 \text{ кДж/моль}.$$

Таким образом, при сгорании 1 моля бутана выделяется 1656,8 кДж тепла.

Задание 2: Энтальпия горения этилацетата $CH_3COOC_2H_5$ равна $\Delta H_{гор} = -2256,3$ кДж/моль. Выразить эту величину в кДж/кг.

Значение $\Delta H_{гор} = -2256,3$ кДж/моль показывает, что при сгорании 1 моля этилацетата выделяется 2256,3 кДж тепла, т.е. $Q_{гор} = +2256,3$ кДж/моль.

1 моль $CH_3COOC_2H_5$ имеет массу 88 г. Можно составить пропорцию

$$\begin{array}{ll} M(CH_3COOC_2H_5) = 88 \text{ г/моль} & \text{---} \quad Q_{гор} = 2256,3 \text{ кДж/моль} \\ 1 \text{ кг} = 1000 \text{ г} & \text{---} \quad Q_n \text{ кДж/кг} \end{array}$$

$$Q_n = \frac{1000 \cdot 2256,3}{88} = 25639,8 \text{ кДж/кг}$$

В общем виде формула для перевода из размерности кДж/моль в кДж/кг выглядит следующим образом:

$$Q_n = \frac{1000 \cdot \left| \Delta H \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right|}{M \frac{\text{г}}{\text{моль}}}; \text{ кДж/кг}$$

Если необходимо осуществить перевод из размерности кДж/моль в кДж/м³, то можно воспользоваться формулой

$$Q_n = \frac{1000 \cdot \left| \Delta H \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right|}{V_M \frac{\text{л}}{\text{моль}}}, \text{ кДж/м}^3.$$

Задание 3. Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ по формуле Д.И. Менделеева.

Значения низшей теплоты сгорания веществ и материалов могут быть рассчитаны по формуле Д.И. Менделеева. Данная формула может быть использована для расчетов Q_n веществ сложного элементного состава, а также для любых индивидуальных веществ, если предварительно рассчитать массовую долю каждого элемента в соединении (ω).

$$Q_H = 339,4 \cdot \omega(C) + 1257 \cdot \omega(H) - 108,9 [(\omega(O) + \omega(N)) - \omega(S)] - 25,1[9 \cdot \omega(H) + \omega(W)],$$

(3.3)

кДж/кг,

где

$\omega(C)$, $\omega(H)$, $\omega(S)$, $\omega(O)$, $\omega(N)$ – массовые доли элементов в веществе, %; $\omega(W)$ – содержание влаги в веществе, %.

1. Для того, чтобы воспользоваться данной формулой, необходим расчет процентного состава каждого элемента в веществе (массовой доли).

Молярная масса сульфадимезина $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ составляет 278 г/моль.

$$\omega(C) = (12 \cdot 12) / 278 = 144 / 278 = 0,518 \cdot 100 = 51,8 \%$$

$$\omega(H) = (1 \cdot 14) / 278 = 14 / 278 = 0,05 \cdot 100 = 5,0 \%$$

$$\omega(O) = (16 \cdot 2) / 278 = 32 / 278 = 0,115 \cdot 100 = 11,5 \%$$

$$\omega(N) = (14 \cdot 4) / 278 = 56 / 278 = 0,202 \cdot 100 = 20,2 \%$$

$$\omega(S) = 100 - (51,8 + 5,0 + 11,5 + 20,2) = 11,5 \%$$

2. Подставляем найденные значения в формулу Д.И. Менделеева.

$$Q_H = 339,4 \cdot 51,8 + 1257 \cdot 5,0 - 108,9 \cdot (11,5 + 20,2 - 11,5) - 25,1 \cdot 9 \cdot 5,0 = 22741 \text{ кДж/кг.}$$

Формы контроля: Письменный отчет

Тема 1.9. Определение температуры горения вещества

Практическое занятие № 4. Определение температуры горения вещества при нормальной и повышенной температуре

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Задание 1:

Вычислить действительную температуру горения анилина $C_6H_5NH_2$, если потери тепла излучением составляют 20 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,1.

Алгоритм расчета температуры горения

1. Рассчитать суммарный объем продуктов горения и отдельно объем каждого компонента продуктов горения.

$$V_{\text{III}}^{\text{np}} = V(\text{CO}_2) + V(\text{H}_2\text{O}) + V(\text{N}_2) + V(\text{SO}_2) + \Delta V_{\text{возд}}$$

Расчет объема продуктов горения выполняется в зависимости от характера горючего вещества (индивидуальное вещество, смесь газов или вещество сложного элементного состава). Методика расчета приведена в примерах 2.8, 2.9, и 2.10.

Для индивидуальных веществ можно также определять количество продуктов горения в молях (коэффициенты в уравнении реакции горения).

2. Рассчитать низшую теплоту сгорания вещества.

Для индивидуальных веществ расчет выполняется по I следствию закона Гесса (при наличии табличных значений энтальпий образования).

По формуле Д.И. Менделеева расчет Q_H может быть выполнен как для веществ с известным элементным составом, так и для индивидуальных веществ.

3. Если по условию задачи есть теплотерия (η), то рассчитывается количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения Q_{III}

$$Q_{\text{III}} = Q_H (1 - \eta), \text{ кДж/кг или кДж/м}^3$$

4. Находим среднее теплосодержание продуктов горения $Q_{\text{ср}}$

при отсутствии теплотерии (η)

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{III}}}{V_{\text{III}}^{\text{np}}}, \text{ кДж/м}^3$$

при наличии теплотерии

$$Q_{cp} = \frac{Q_{\Pi\Gamma}}{V_{\Pi\Gamma}^{np}}, \text{ кДж/м}^3$$

5. По значению Q_{cp} с помощью таблиц приложений 3 и 4 (“Теплосодержание газов при постоянном давлении”), ориентируясь на азот, приближенно определяем температуру горения T_1 .

При подборе температуры горения ориентируются на азот, т.к. в большей степени продукты горения состоят именно из азота. Однако, поскольку теплосодержание углекислого газа и паров воды выше, чем у азота, то их присутствие в продуктах горения несколько понижает температуру горения, поэтому ее нужно принимать несколько ниже (на 100-200⁰C), чем по азоту.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при выбранной температуре T_1 :

$$Q_{\Pi\Gamma}^1 = Q^1(CO_2) \cdot V(CO_2) + Q^1(H_2O) \cdot V(H_2O) + Q^1(N_2) \cdot V(N_2) + Q^1(SO_2) \cdot V(SO_2) + Q^1(возд) \cdot \Delta V(в)$$

Где $Q^1(CO_2)$, $Q^1(H_2O)$, $Q^1(N_2)$, $Q^1(SO_2)$, $Q^1(возд)$ – табличные значения теплосодержания газов при выбранной температуре T_1 .

7. Сравниваем $Q_{\Pi\Gamma}^1$ с Q_n или $Q_{\Pi\Gamma}$, рассчитанных по п.2 или п.3.

Если $Q_{\Pi\Gamma}^1 < Q_n$ ($Q_{\Pi\Gamma}$), то выбираем температуру $T_2 > T_1$ на 100⁰C;

если $Q_{\Pi\Gamma}^1 > Q_n$ ($Q_{\Pi\Gamma}$), то выбираем температуру $T_2 < T_1$ на 100⁰C.

8. Повторяем расчет теплосодержания продуктов горения при новой температуре T_2 :

$$Q_{\Pi\Gamma}^2 = Q^2(CO_2) \cdot V(CO_2) + Q^2(H_2O) \cdot V(H_2O) + Q^2(N_2) \cdot V(N_2) + Q^2(SO_2) \cdot V(SO_2) + Q^2(возд) \cdot \Delta V(в)$$

9. Расчет проводим до получения неравенства:

$$Q_{\Pi\Gamma}^1 < Q_n \text{ (} Q_{\Pi\Gamma} \text{)} < Q_{\Pi\Gamma}^2, \text{ где}$$

$Q_{\Pi\Gamma}^1$ и $Q_{\Pi\Gamma}^2$ – теплосодержание продуктов горения при температурах T_1 и T_2 , отличающихся на 100⁰C.

10. Интерполяцией определяем температуру горения T_{Γ} :

$$T_{\Gamma} = T_1 + \frac{Q_{\Pi\Gamma} - Q_{\Pi\Gamma}^1}{Q_{\Pi\Gamma}^2 - Q_{\Pi\Gamma}^1} \cdot (T_2 - T_1)$$

Если потери тепла не учитывались, то получаем адиабатическую температуру горения, а если учитывались, то – действительную температуру горения вещества.

Решение:

1. Составляем уравнение реакции горения анилина:



По уравнению реакции горения определяем число моль продуктов горения и число моль избытка воздуха:

$$n_{в}^{теор} = 7,75 \cdot 4,76 = 36,89 \text{ моль}$$

$$\Delta n_{в} = n_{в}^{теор} (\alpha - 1) = 36,89 (1,1 - 1) = 3,689 \text{ моль}$$

$$n_{\Pi\Gamma}^{np} = n(CO_2) + n(H_2O) + n(N_2) + n(\Delta V_{в}) = 6 + 3,5 + 7,75 \cdot 3,76 + 0,5 + 3,689 = 42,829 \text{ моль}$$

2. Теплота горения анилина по справочным данным составляет

$$Q_{гор} = 3484, \text{ кДж/моль} = 3484000 \text{ Дж/моль}$$

3. По условию задачи теплотопотери составляют 20 %, следовательно, $\eta = 0,2$.

$$Q_{\Pi\Gamma} = 3484000 (1 - 0,2) = 2787200 \text{ Дж/моль}$$

4. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{cp} = \frac{Q_{\Pi\Gamma}}{n_{\Pi\Gamma}^{np}} = \frac{2787200}{42,829} = 65077,4 \text{ Дж}$$

5. По таблице приложения 3, ориентируясь на азот, определяем $T_1 = 1800^\circ\text{C}$

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1800°C .

$$Q_{\text{пр}}^{1800} = 96579,5 \cdot 6 + 77598,8 \cdot 3,5 + 59539,9 \cdot 7,75 \cdot 3,76 + 66000 \cdot 3,689 = 2859312,7 \text{ Дж}$$

7. $Q_{\text{пр}}^{1800} = 2859312,7 > Q_{\text{пр}} = 2787200$, следовательно, выбираем $T_2 = 1700^\circ\text{C}$

8. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1700°C .

$$Q_{\text{пр}}^{1700} = 90545,9 \cdot 6 + 72445,1 \cdot 3,5 + 55936,5 \cdot 7,75 \cdot 3,76 + 56397,4 \cdot 3,689 = 2662844,5 \text{ Дж}$$

$Q_{\text{пр}}^{1700} = 2662844,5 < Q_{\text{пр}} = 2787200$, следовательно температура горения находится в интервале от 1700 до 1800°C .

9. Рассчитываем температуру горения:

$$T_{\text{г}} = 1700 + \frac{2787200 - 2662844}{2859312 - 2662844} \cdot (1800 - 1700) = 1763^\circ\text{C} = 2036 \text{ К}$$

Формы контроля: Письменный отчет

Раздел 2. Основы теории взрыва

Тема 2.1. Взрывы, их классификация. Ударная волна.

Практическое занятие № 5. Расчет параметров энергии и мощности взрыва,

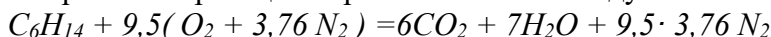
Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Задание 1. Вычислить максимальное давление взрыва смеси гексана C_6H_{14} с воздухом, если начальное давление $101,3 \text{ кПа}$, начальная температура 273 К , температура взрыва 2355 К .

Решение:

1. Уравнение реакции горения гексана в воздухе:



2. Рассчитаем число молей (киломолей) газообразных веществ до и после взрыва:

$$m = 6 + 7 + 9,5 \cdot 3,76 = 48,72 \text{ моль}$$

$$n = 1 + 9,5 \cdot 4,76 = 46,22 \text{ моль}$$

3. Максимальное давление взрыва составит:

$$P_{\text{взр}}^{\text{макс}} = \frac{101,3 \cdot 2355}{273} \cdot \frac{48,72}{46,22} = 921,1 \text{ кПа}$$

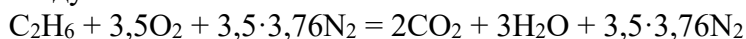
$$\text{Избыточное давление взрыва } \Delta P_{\text{взр}} = P_{\text{взр}}^{\text{макс}} - P_0$$

Задание 2. Рассчитать максимальное давление и избыточное давление взрыва газовой

этановоздушной смеси стехиометрического состава.

Считать, что исходная смесь до взрыва находилась при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$, $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$). Оценить возможность разрушения технологического оборудования, рассчитанного на давление $P_{\text{пред}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кПа}$ при взрыве этановоздушной смеси.

Решение: Запишем уравнение материального баланса процесса горения этана в воздухе



По уравнению определим количество молей газовой смеси до взрыва $n_{\text{исх}}$ и после взрыва $n_{\text{пр}}$

$$n_{\text{с}} = 1 + 3,5 + 3,5 \cdot 3,76 = 17,7 \text{ моль};$$

$$n_{\text{пг}} = 2 + 3 + 3,5 \cdot 3,76 = 18,2 \text{ моль}.$$

Температуру взрыва можно определить методом последовательных приближений. Воспользуемся расчетами, где было получено значение температуры взрыва для

стехиометрической этановоздушной смеси $T_{\text{взр}} = 2875 \text{ К}$. Подставляя значения величин в формулу получим $P = 1096,9 \text{ кПа}$.

Избыточное давление взрыва

$$\Delta P_{\text{взр}} = P_{\text{взр}}^{\text{max}} - P_0 = 1096,9 - 101,3 = 995,6 \text{ кПа},$$

так как $P_{\text{взр}}^{\text{max}}$ меньше $P_{\text{пред}}$, можно сделать вывод, что технологическое оборудование не разрушится.

Формы контроля: Письменный отчет

Тема 2.2. Взрывчатые вещества, их характеристика

Практическое занятие № 6. Тротиловый эквивалент, его определение

Цель: формирование практических умений расчета тротилового эквивалента

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Тротиловый эквивалент – условная масса тротила, взрыв которого адекватен по степени разрушения взрыву парогазовой среды

Известно, что при взрыве 1 кг тротила (тринитротолуола - ТНТ) выделяется энергия, равная $Q_{\text{ТНТ}} = 4,184 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$. Исходя из этого, мощность любого взрыва можно условно характеризовать количеством тротила, которое может произвести во взрыве выделение такого же количества энергии. Количество тротила или тротиловый эквивалент взрыва будет равен

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_n m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}$$

где $M_{\text{ТНТ}}$ – масса условно взорвавшегося тротила;

Q_n – количество теплоты (энергии), выделяющейся при взрыве в кДж/кг;

m – масса горючего вещества, участвующего во взрыве;

γ – доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию взрыва.

При взрыве парогазовой смеси углеводородных топлив в *ограниченном объеме* (оборудование, помещение) коэффициент $\gamma = 1$, при взрыве в *неограниченном объеме* (взрыв облака парогазовой смеси) коэффициент $\gamma = 0,4$.

Размер безопасной зоны по действию давления ударной воздушной волны взрыва R без, м, рассчитывают по формуле

$$R_{\text{без}} = \sqrt[3]{15 M_{\text{ТНТ}}}$$

Пример 1 . Определить тротиловый эквивалент взрыва паровоздушного облака, образовавшегося при аварийном разливе и испарении 500кг ацетона. Оценить безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны.

Решение: Для определения тротилового эквивалента взрыва паровоздушного облака необходимо знать Q_n ацетона. Величину Q_n можно рассчитать по закону Гесса или взять в справочнике. Согласно справочным данным для ацетона $Q_n = 1668 \text{ кДж/моль}$. Необходимо сделать перевод единиц измерения. Учитывая, что масса 1 моля ацетона равна $58 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $Q_n = 1668 / 58 \cdot 10^{-3} = 288 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$

Доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию при взрыве облака парогазовой смеси принимается равной $\gamma = 0,4$. Энергия взрыва 1 кг тротила $Q_{\text{ТНТ}} = 4,184 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$

Подставляя эти величины в формулу, получим $M_{\text{ТНТ}} = 1375 \text{ кг тротила}$.

Таким образом, взрыв паровоздушного облака, образовавшего 500 кг ацетона эквивалентен взрыву 1375 кг тротила.

Безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны при взрыве паровоздушной смеси $R_{\text{без}} = 170$ м

Формы контроля: Письменный отчет

Раздел 3. Процессы возникновения и распространения в горения

Тема 3.3. Предельные явления при горении. Показатели пожарной опасности веществ и материалов

Практическое занятие № 7. Определение концентрационных пределов распространения пламени

Цель: формирование практических умений расчета концентрационных пределов распространения пламени

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Задание 1 Рассчитать концентрационных пределов распространения пламени газа пропана C_3H_8

Концентрационные пределы распространения пламени (область воспламенения) для газо- и паровоздушных смесей могут быть рассчитаны по следующей формуле

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \%,$$

где

$\varphi_{H(B)}$ - нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени (НКПР и ВКПР), %;

β - число молекул кислорода (коэффициент перед кислородом в уравнении реакции горения вещества);

a и b - константы, имеющие значения, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значения коэффициентов « a » и « b » для расчета концентрационных пределов распространения пламени

КПР	a	b
НКПР	8,684	4,679
ВКПР:		
$\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
$\beta > 7,5$	0,768	6,554

1. Составляем уравнение реакции горения этанола.



$$2. \varphi_n = \text{НКПР} = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,679} = 2,07 \%$$

$$\varphi_v = \text{ВКПР} = \frac{100}{1,55 \cdot 5 + 0,56} = 12,03\%$$

Задание 2. Рассчитать КПР газа пропана C_3H_8 при 300°C .

1. В предыдущем примере были рассчитаны значения НКПР и ВКПР для пропана при 20°C : $\varphi_n = 2,07 \%$; $\varphi_v = 12,03\%$.

Такая формула для расчета концентрационных пределов распространения пламени справедлива при температурах среды близкой к 20°C . Как было указано выше, КПР не являются постоянной величиной и зависят от многих факторов. С повышением температуры область КПР расширяется, и, следовательно, для повышенных температур необходимо производить расчет с учетом изменения температуры.

Приближенно это можно сделать с помощью следующих формул:

$$\varphi_{H(t)} = \varphi_H \cdot \left(1 - \frac{T - T_0}{1550 - T_0} \right)$$

$$\varphi_{B(t)} = \varphi_B \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{1100 - T_0} \right), \text{ где}$$

φ_H, φ_B – концентрационные пределы распространения пламени, рассчитанные или определенные экспериментально при $\sim 20^\circ\text{C}$;

$\varphi_{H(t)}, \varphi_{B(t)}$ – концентрационные пределы распространения пламени при температуре T ;

1550 К, 1100 К – температура горения соответственно на НКПР и ВКПР.

2. С учетом заданной температуры КПР составят:

$$\varphi_{H(t)} = 2,07 \cdot \left(1 - \frac{573 - 293}{1550 - 293} \right) = 1,61 \%$$

$$\varphi_{B(t)} = 12,03 \cdot \left(1 + \frac{573 - 293}{1100 - 293} \right) = 16,20 \%$$

Практическое занятие № 8. Определение температурных пределов распространения пламени, температуры вспышки

Цель: формирование практических умений расчета температурных пределов распространения пламени, температуры вспышки

Количество часов - 4 часа

Порядок выполнения практической работы:

Характер свечения пламени

Характер свечения пламени при горении веществ зависит от процентного содержания элементов в веществе, главным образом, углерода, водорода, кислорода и азота.

Свечение пламени связано с наличием несгоревших раскаленных твердых частиц углерода С, а также трехатомных молекул.

Сопоставляя значения процентного содержания углерода и кислорода в горючих веществах, можно приблизительно судить о характере свечения пламени (таблица 1.1.).

Характер свечения пламени в зависимости от ω (С) и ω (Н)

<i>Содержание углерода в горючем веществе, ω (С) %</i>	<i>Содержание кислорода в горючем веществе, ω (О) %</i>	<i>Характер свечения пламени</i>
< 50	> 30	пламя бесцветное или голубоватое
< 75	отсутствует или < 30	пламя яркое, не коптящее
> 75	отсутствует или < 25	пламя яркое, коптящее

Определить характер свечения пламени метаноля НСОН, фенола С₆Н₅ОН и пентанола С₅Н₁₁ОН.

1. Массовые доли углерода и кислорода в молекуле метаноля составляют:

$$M(\text{НСОН}) = 30$$

$$\omega(\text{C}) = \frac{12 \cdot 100}{30} = 40 \%; \quad \omega(\text{O}) = \frac{16 \cdot 100}{30} = 53 \%$$

Массовая доля углерода < 50 %, а массовая доля кислорода > 30 %, следовательно, при горении метаноля наблюдается голубоватое пламя.

2. Массовые доли углерода и кислорода в молекуле фенола составляют:

$$M(\text{С}_6\text{Н}_5\text{ОН}) = 94$$

$$\omega(\text{C}) = \frac{6 \cdot 12 \cdot 100}{94} = 77 \%; \quad \omega(\text{O}) = \frac{16 \cdot 100}{94} = 17 \%$$

Массовая доля углерода $> 50 \%$, а массовая доля кислорода $< 25 \%$, следовательно, пламя при горении фенола яркое и коптящее.

2. Массовые доли углерода и кислорода в молекуле пентанола составляют:

$$M(C_5H_{11}OH) = 88$$

$$\omega(C) = \frac{5 \cdot 12 \cdot 100}{88} = 68 \%; \quad \omega(O) = \frac{16 \cdot 100}{88} = 18 \%$$

Массовая доля углерода $< 75 \%$, а массовая доля кислорода $< 30 \%$, следовательно, пламя при горении пентанола будет ярким, но не коптящим.

Формы контроля: Письменный отчет

Список литературы

Перечень рекомендуемых учебных изданий, Интернет-ресурсов, дополнительной литературы

Основные источники:

1. Эквист, Б. В. Теория горения и взрыва : учебник / Б. В. Эквист. — Москва : Издательский Дом МИСиС, 2018. — 180 с. — ISBN 978-5-906953-90-2. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROОбразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/84423> (дата обращения: 15.05.2025). — Режим доступа: для авторизир. Пользователей
2. Теория горения и взрыва : учебное пособие для СПО / составители Н. Я. Илюшов. — 2-е изд. — Саратов : Профобразование, 2024. — 96 с. — ISBN 978-5-4488-1203-3. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROОбразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/139114> (дата обращения: 15.05.2025). — Режим доступа: для авторизир. Пользователей
3. Теория горения и взрыва : учебное пособие для вузов / под редакцией П. П. Кукина, В. В. Юшина, С. Г. Емельянова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 346 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-04532-1. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/535718> (дата обращения: 15.05.2025).

Дополнительные источники:

1. Теория горения и взрыва : учебное пособие (практикум) / составители А. Ю. Даржания, О. В. Клименко. — Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2018. — 107 с. — Текст : электронный // Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROОбразование : [сайт]. — URL: <https://profspo.ru/books/92606> (дата обращения: 15.01.2026). — Режим доступа: для авторизир. Пользователей
2. Теория горения и взрыва : учебник и практикум для вузов / под общей редакцией А. В. Тотая, О. Г. Казакова. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 254 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-08180-0. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/559966> (дата обращения: 04.01.2025).