

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет**

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

**Методические указания
по выполнению курсовой работы**

Составитель Т. В. Мельникова

**Волгоград
ВолгГАСУ
2015**



© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный
архитектурно-строительный университет», 2015

УДК 621.644(26.03)(076.5)

ББК 39.7я73

Т338

Т338 **Теория** горения и взрыва [Электронный ресурс]: методические указания по выполнению курсовой работы / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т ; сост. Т. В. Мельникова. — Электронные текстовые и графические данные (0,3 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. Учебное электронное издание. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0 ; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

Представлены задание и рекомендации по выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория горения и взрыва» в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования. Студентам предлагается самостоятельно обосновать теоретический вопрос и на основании расчетных методов определить основные параметры горения и взрыва индивидуального химического соединения, охарактеризовать его пожаровзрывоопасные свойства и сравнить полученные значения с экспериментально установленными показателями пожарной опасности, имеющимися в справочной литературе.

Варианты заданий выбираются студентами согласно порядковому номеру по списку группы.

Для студентов специальностей «Пожарная безопасность» и направления подготовки «Техносферная безопасность» всех форм обучения.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Расчет основных параметров горения.

Методика составления материального и теплового баланса.

Методы и примеры расчета.....4

1. Физико-химические основы горения.....4
 - 1.1. Расчет коэффициента горючести веществ4
 - 1.2. Составление уравнения материального баланса.....5
 - 1.2.1. Расчет расхода воздуха при горении.....7
 - 1.2.2. Расход объема продуктов сгорания.....10
 - 1.3. Тепловой баланс процесса горения.....12
 - 1.3.1. Теплота сгорания веществ.....12
 - 1.3.2. Расчет температуры горения.....15
 - 1.4. Концентрационные пределы распространения пламени.....17
 - 1.4.1. Расчет стехиометрической концентрации.....17
 - 1.4.2. Расчет концентрационных пределов распространения пламени 18
 - 1.4.3. Построение зависимости КГП от концентрации флегматизатора 19
 - 1.5. Температурные параметры пожарной опасности.....22
 - 1.5.1. Расчет температурных пределов распространения пламени....22
 - 1.5.2. Расчет температуры самовоспламенения.....23

II. Расчет основных параметров взрыва газо-

и паровоздушных смесей.....27

- 2.1. Расчет температуры и максимального давления взрыва.....27

III. Выбор варианта задания и общие методические рекомендации

... по выполнению курсовой работы.....30

IV. Рекомендуемая литература.....34

V. Приложения (справочные данные).....35

I. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ. МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА. МЕТОДЫ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ

1.1. Расчет коэффициента горючести

Все индивидуальные вещества можно охарактеризовать коэффициентом горючести (K), который является безразмерным и служит для определения свойств горючести вещества:

$$K = 4 * n(C) + 4 * n(S) + n(H) + n(N) - 2 * n(O) - 2 * n(Cl) - 3 * n(F) - 4 * n(Br) \quad (1)$$

где: $n(C)$, $n(S)$, $n(H)$, $n(N)$, $n(O)$, $n(Cl)$, $n(F)$, $n(Br)$ - число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле вещества

Когда коэффициент горючести (K) больше (или равен) единице ($K \geq 1$), то вещество является горючим. При значении K , меньше единицы ($K < 1$) – негорючим.

Пример 1. Определим коэффициент горючести пропана C_3H_8 и угольной кислоты H_2CO_3 .

В молекуле *пропана* содержится атомов: углерода $n(C)=3$; водорода $n(H)=8$. Подставляя количество атомов в формулу 1, имеем $K=4*3+8=20$. $K > 1$, следовательно, пропан – горючее вещество.

В молекуле *угольной кислоты* содержится атомов: водорода $n(H)=2$; углерода $n(C)=1$; кислорода $n(O)=3$. Подставляя количество атомов в формулу 1, имеем $K=2+4*1-2*3=0$. $K < 1$, следовательно, угольная кислота является негорючим веществом.

1.2. Составление уравнения материального баланса

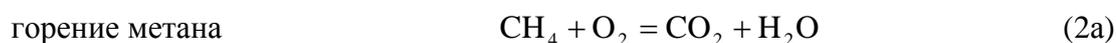
Горением называется сложный физико-химический процесс, при котором горючие вещества под действием высоких температур вступают в химическое взаимодействие с окислителем, превращаясь в продукты горения. В качестве окислителей могут выступать не только кислород или воздух, но и множество других соединений: хлор, бром, сера, марганцево-кислый калий, кислородсодержащие вещества. Однако на практике горение чаще всего протекает в атмосфере воздуха.

Пример 2. Составим уравнения материального баланса процесса горения.

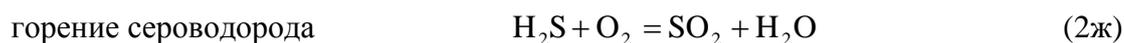
Составление уравнения материального баланса процесса горения производится в следующей последовательности:

1. Вначале записывается уравнение химической реакции горения:

1.1. При горении углеводородов, состоящих из углерода (С) и водорода (Н) образуется двуокись углерода (CO₂) и вода (H₂O):



1.2. Когда в составе горючего вещества есть сера (S), то при сгорании образуется оксид серы (IV) SO₂:

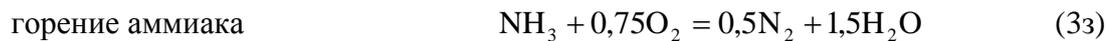
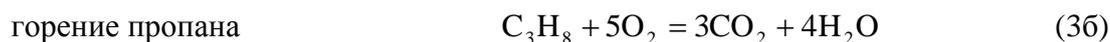
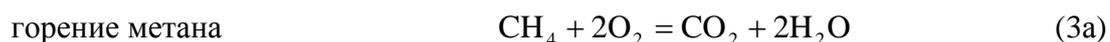


1.3. Горение аммиака приводит к тому, что азот (N), входящий в его состав при горении в воздухе не окисляется, а выделяется в виде свободного азота (N₂):



2. Расставляем стехиометрические коэффициенты в уравнении:

Согласно закону сохранения массы вещества: количество атомов каждого элемента в левой и правой части химического уравнения должно быть одинаковым. Для того, чтобы уравнивать обе части уравнения, необходимо сначала расставить коэффициенты перед окислами в правой части, чтобы уравнивать число атомов элементов горючего вещества (С, Н, S, N...). Затем, подсчитав количество атомов кислорода в правой части уравнения, поставит коэффициент перед кислородом в левой части уравнения. При этом надо учесть кислород, который может входить в состав молекулы горючего вещества, как например, в этиловом спирте C_2H_5OH . С учетом сказанного, уравнения горения (2а-2з) примут вид брутто-уравнений, показывающих начальное и конечное состояние системы:

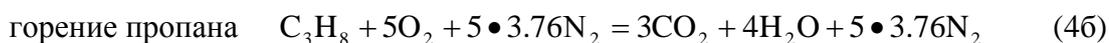


3. Составляем уравнение материального баланса:

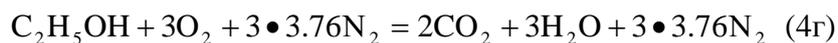
При составлении уравнения материального баланса необходимо руководствоваться тем, что процесс горения протекает в атмосфере воздуха, который представляет собой смесь газов: азот – 78,084%; кислород – 20,948%, аргон – 0,934%, в незначительных количествах - неон, гелий, аммиак, диоксиды углерода и серы. Аргон, является инертным газом и в процессе горения участия не принимает. Азот также не участвует в химическом взаимодействии с горючим веществом, а оказывает влияние на

скорость протекания процесса. Его участие следует учитывать следующим образом: горючее вещество и участвующий в горении воздух пишутся в левой части уравнения, а после знака равенства – образующиеся продукты реакции.

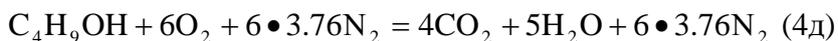
Для простоты расчетов принимаем, что на 1 объем кислорода будет приходиться $79/21=3,76$ объема азота, или на 1 молекулу кислорода приходится 3,76 молекулы азота. **Тогда уравнения материального баланса горения веществ** с участием состава воздуха ($O_2+3.76 N_2$) примут вид:



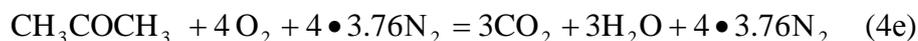
горение этилового спирта



горение бутилового спирта



горение ацетона



Таким образом, при составлении материального баланса кроме продуктов сгорания: углекислого газа (сернистого газа, свободного азота) и воды необходимо учитывать 3,76 молекулы азота, который не принимает участия в процессе горения, а целиком переходит в продукты сгорания.

1.2.1. Расчет расхода воздуха при горении

Расчет объема воздуха, необходимого при горении, предполагает вычисление:

А) Теоретически необходимого объема воздуха ($V_B^{теор}$).

Под теоретически необходимым объемом воздуха понимается минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы массы (кг) или единицы объема (м^3) горючего вещества

В) Практический объем воздуха ($V_{\text{в}}^{\text{пр}}$), затраченный на горение (с учетом коэффициента избытка воздуха).

В условиях пожара, на сгорание вещества воздуха затрачивается, как правило, больше, чем определяется теоретическим расчетом. Расчет производится в следующей последовательности:

1. Определяем практический объем воздуха:

$$V_{\text{в}}^{\text{пр}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} + \Delta V_{\text{в}}, \text{ м}^3 \quad (5)$$

где: $V_{\text{в}}^{\text{пр}}$ - практический объем воздуха, затраченный на горение (с учетом коэффициента избытка воздуха), м^3 ;
 $V_{\text{в}}^{\text{теор}}$ - теоретический объем воздуха, м^3 ;
 $\Delta V_{\text{в}}$ - избыток воздуха, м^3 ;

2. Определяем избыток воздуха:

$$1) \Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{пр}} - V_{\text{в}}^{\text{теор}}, \text{ м}^3 \quad (6)$$

$$2) \Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{теор}} (1 - \alpha), \text{ м}^3 \quad (7)$$

где: α - коэффициент избытка воздуха, показывающий во сколько раз в зону горения поступило воздуха больше, чем это теоретически необходимо для полного сгорания вещества.
 Для горючих смесей стехиометрического состава $\alpha=1$ (оптимальный режим горения).
 Если $\alpha>1$ горючую смесь называют бедной по горючему компоненту. Когда $\alpha<1$ – богатой по горючему компоненту.

3. Определяем коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi(\text{O}_2)^{\text{III}}} \quad (8)$$

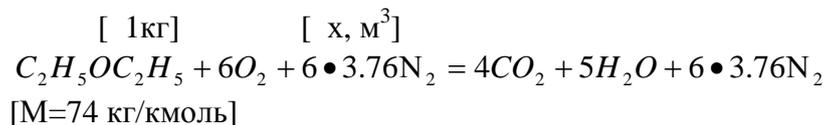
Пример 3. Определим, какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1кг диэтилового эфира ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$) при температуре и давлении соответственно 10°C и 1,2 атм.

Расчет теоретического объема воздуха производится в следующей последовательности:

1. Составим уравнение материального баланса горения диэтилового эфира:



2. Запишем в уравнении все известные величины:



3. Рассчитаем, какой объем занимает 1 кмоль воздуха при данных температуре и давлении:

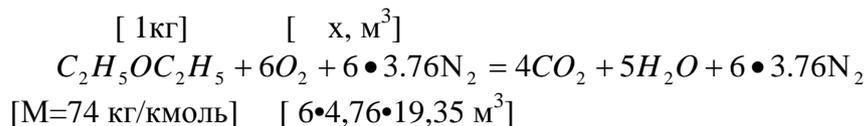
При нормальных условиях молярный объем (V_M) газа составит 22,4л/моль или 22,4 м³/кмоль.

$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P}, \text{ м}^3 / \text{кмоль} \quad (9)$$

где: P_0 - давление при нормальных условиях, м³;
 V_0 - объем вещества при нормальных условиях, м³;
 T - температура, °С
 P - давление, атм

$$V_M = \frac{1 \cdot 22.4}{273} \cdot \frac{283}{1.2} = 19.35 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$$

4. Запишем рассчитанную величину под формулой воздуха, умножив её на стехиометрический коэффициент, и пропорционально определим теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания диэтилового эфира:



$$V_6^{np} = X = \frac{1 \cdot 6 \cdot 4,76 \cdot 19,35}{74} = 7,5 \text{ м}^3$$

1.2.2. Расход объема продуктов сгорания

Расчет объема продуктов сгорания производится в следующей последовательности:

1. Общий объем продуктов сгорания горючего вещества рассчитывается с учетом объемов газообразных продуктов, выделяющихся при сгорании:

$$V_{\text{ПГ}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0, \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (10)$$

где: $V_{\text{ПГ}}^0$ - теоретический объем продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 V_{RO_2} - объем сухих газов (диоксидов), $\text{м}^3/\text{кг}$;
 $V_{\text{N}_2}^0$ - объем азота, участвующего в реакции горения, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ - объем водяного пара, $\text{м}^3/\text{кг}$;

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

$$V_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}}^0 + \Delta V_{\text{в}}, \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (11)$$

Действительный объем продуктов сгорания, будет больше теоретического на величину объема избыточно поданного воздуха $(\alpha - 1) \cdot V_{\text{в}}^0$:

$$V_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}}^0 + V_{\text{в}}^0 \cdot (\alpha - 1), \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (12)$$

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

$$\varphi_{\text{ПГ}i} = \frac{V_{\text{ПГ}i}}{\Sigma V_{\text{ПГ}i}} \cdot 100, \% \text{ об.} \quad (13)$$

где: $V_{\text{ПГ}i}$ - содержание i -го компонента в продуктах горения, % об.;
 $V_{\text{ПГ}i}$ - объем i -го компонента, м^3 , кмоль;
 $\Sigma V_{\text{ПГ}i}$ - полный объем продуктов горения, м^3 , кмоль;

4. Объем кислорода в продуктах горения:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot \Delta V_{\text{в}}, \text{ м}^3 \quad (14)$$

5. Объем азота в продуктах горения:

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79 \cdot \Delta V_{\text{в}}, \text{ м}^3 \quad (15)$$

где: $V_{\text{N}_2}^0$ - теоретический объем азота в продуктах горения, м^3 , кмоль;

6. Теоретический объем азота в продуктах горения:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot \Delta V_B, \text{ м}^3 \quad (16)$$

7. Объем влажных продуктов сгорания составит:

$$V_r = \frac{(m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2}) \cdot 22,4}{mM}, \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (17)$$

где: m_{CO_2} , m_{H_2O} , m_{N_2} - число киломолей диоксида углерода, паров воды и азота в уравнении реакции горения, кмоль;

M - количество горючего вещества, численно равная его молекулярному весу, кг;

8. Объем сухих продуктов сгорания:

$$V_r = \frac{(m_{CO_2} + m_{N_2}) \cdot 22,4}{mM}, \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (18)$$

9. Объем продуктов горения при заданных условиях:

$$V_{ПГ} = \frac{V_{ПГ}^0 \cdot p \cdot T^\Gamma}{p^0 \cdot T^0}, \text{ м}^3 / \text{кг}, \text{ кмоль} / \text{кмоль} \quad (19)$$

где: T^0 - температура при нормальных условиях, 273 К;

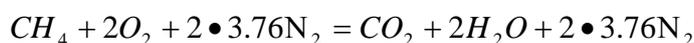
T^Γ - температура горения, К

p^0 - нормальное давление, 101,3 кПа;

Пример 4. Определим, объем влажных продуктов сгорания 1 м^3 метана.

Расчет теоретического объема воздуха производится в следующей последовательности:

1. Составим уравнение материального баланса горения метана:



2. Определяем объем влажных продуктов сгорания метана:

$$V_{CO_2} = \frac{1 \cdot 22,4}{22,4} = 1 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{H_2O} = \frac{2 \cdot 22,4}{22,4} = 2 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{N_2} = \frac{2 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{22,4} = 7,52 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

3. Рассчитаем объем влажных продуктов сгорания 1 м^3 метана равен:

$$V_{\text{пр}}=1+2+7,52=10,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

1.3. Тепловой баланс процесса горения

1.3.1. Теплота сгорания веществ

В основе процесса горения лежит химическая реакция горючего вещества с окислителем, которая происходит с интенсивным тепловыделением. Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы количества горючего вещества [моль, кг или м^3], называют низшей теплотой сгорания $Q_{\text{н}}$.

Если горючее имеет в своем составе водород, то при его сгорании образуется вода в газообразном состоянии, которая, охлаждаясь, будет конденсироваться. Так как, в процессе конденсации паров тепло выделяется, то общее количество теплоты, полученное при сгорании вещества, будет больше на эту величину. Количество теплоты, выделяющееся при конденсации паров, равно количеству теплоты затраченное на парообразование:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{н}} + r \quad (20)$$

где: $Q_{\text{в}}$ - высшая теплота сгорания вещества;
 r - удельная теплота парообразования воды

Тепловой эффект химической реакции согласно закону Гесса, не зависит от пути, по которому протекает реакция, а зависит лишь от начального и конечного состояния системы и равен разности сумм - теплоты образования продуктов реакции и теплоты образования исходных веществ:

$$Q_{\text{н}} = (\sum_{\Delta} H^0_{f i} n_i)_{\text{прод}} - (\sum_{\Delta} H^0_{f i} n_i)_{\text{исх}}, \text{ кДж/моль} \quad (21)$$

где: ΔH_{fi} - теплота образования i -го вещества;
 n_i - количество молей i -го вещества;

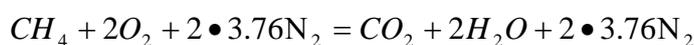
Теплота образования сложного вещества равна количеству теплоты, выделившейся при его образовании из простых веществ. Следует помнить,

что теплота образования простого вещества, молекулы которого состоят из одного атома элемента, например N_2 , O_2 , H_2 , S , C и др. равны нулю (справочные данные стандартных энтальпий образования представлены в прил. 1 и 3)

Пример 5. При сгорании метана определим низшую теплоту сгорания:

Расчет низшей теплоты при сгорании метана производится в следующей последовательности:

1. Составим уравнение материального баланса горения метана:



2. Запишем уравнение закона Гесса:

$$Q_H = \Delta H^0_{f_{CO_2}} \cdot n_{CO_2} + \Delta H^0_{f_{H_2O}} \cdot n_{H_2O} - \Delta H^0_{f_{CH_4}} \cdot n_{CH_4} - \Delta H^0_{f_{O_2}} \cdot n_{O_2},$$

3. Подставляя значения теплоты образования (прил. 1 и 3) получим:

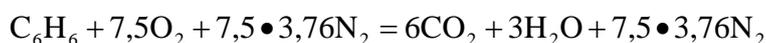
$$Q_H = 396,6 \cdot 1 + 242,2 \cdot 2 - 75 = 806 \text{ кДж/моль.}$$

Низшая теплота при сгорании метана составила 806 кДж/моль.

Пример 6. Определим, по закону Гесса низшую теплоту горения бензола (кДж/моль, кДж/кг, кДж/м³).

Расчет низшей теплоты горения бензола производится в следующей последовательности:

1. Запишем уравнение реакции горения:



2. Определим стехиометрические коэффициенты в уравнении:

$$m_{CO_2} = 6; m_{H_2O} = 3; n^{\Gamma}_{C_6H_6} = 1$$

3. Запишем уравнение закона Гесса:

$$Q_H = m_{CO_2} \cdot \Delta H_{CO_2} + m_{H_2O} \cdot \Delta H_{H_2O} - n^{\Gamma}_{C_6H_6} \cdot \Delta H_{C_6H_6}$$

Значение величины теплосодержания, ΔH_f для продуктов: CO_2 , H_2O принимаем по справочным данным, согласно (прил 1).

$$Q_H = 6 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - (-34,8) = 3142,8 \text{ кДж/моль} = 3142,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}.$$

4. Низшую теплоту горения ΔH_f для продуктов: CO_2 , H_2O , полученных при сгорании 1 кг бензола, определим исходя из закона Авогадро и определения киломоля:

1 киломоль вещества при нормальных условиях занимает объем равный $22,4 \text{ м}^3$.

Киломоль химического вещества равен его молекулярной массе.

Следовательно, при сгорании 1 кмоль бензола, равного 78 кг бензола выделяется теплота $Q_H = 3142,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}$.

5. Пересчитаем сколько выделится теплоты (Q'_H) при сгорании 1 кг бензола:

$$Q'_H = \frac{Q_H}{M}, \text{ кДж/кг} \quad (22)$$

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

6. Определим теплоту горения 1 м^3 паров бензола при н.у., используя следствие закона Авогадро: при сгорании 1 кмоль = $22,4 \text{ м}^3$ паров выделяется теплота, равная:

$$Q''_H = \frac{Q'_H}{22,4} \quad (23)$$

$$Q''_H = \frac{3142,8}{22,4} = 140303,6, \text{ кДж/м}^3$$

Таким образом, теплота горения 1 м^3 паров бензола при нормальных условиях равна $140303,6 \text{ кДж}$, теплота горения 1 кг бензола равна $40,292 \text{ кДж}$.

1.3.2. Расчет температуры горения

Пожарная опасность горючих веществ характеризуется температурными параметрами, одним из которых является температура горения.

Максимальная температура, до которой нагреваются продукты горения, называется температурой горения.

Температура горения определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_H = \sum C_{p_i(v)_i} \cdot V_{\text{ПГ}} \cdot (T_{\Gamma} - T_0) \quad (24)$$

Различают адиабатическую температуру горения, рассчитанную без учета потерь тепла в окружающее пространство, и действительную, учитывающие эти теплотери.

При этом адиабатическая температура горения равна:

$$T_{\Gamma}^* = T_0 + \frac{Q_H}{\sum V_{\text{ПГ}}^0 \cdot C_{p_i}}, \text{ К} \quad (26)$$

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{ПГ}}}{\sum V_{\text{ПГ}} \cdot C_{p_i}}, \text{ К} \quad (27)$$

где: T_{Γ}^* - адиабатическая температура горения, К;

T_{Γ} - действительная температура горения, К;

T_0 - начальная температура, К;

$Q_{\text{ПГ}}$ - количество теплоты, затраченной на нагрев продуктов горения, кДж/моль, кДж/кг, кДж/м³;

Q_H - низшая теплота горения вещества, кДж/моль, кДж/кг, кДж/м³;

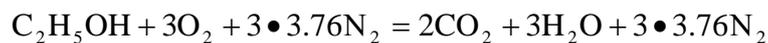
$V_{\text{ПГ}}$ - объем i-го компонента продуктов горения, кмоль/кмоль, м³/кг, м³/м³;

C_{p_i} - удельная теплоемкость i-го компонента продуктов горения, кДж/(м³·К), кДж/(кмоль·К). Значения C_{p_i} представлены в прил. 2;

Пример 7. Определим адиабатическую температуру горения этилового спирта.

Расчет низшей адиабатической температуры горения этилового спирта производится в следующей последовательности:

1. Запишем уравнение материального баланса реакции горения:



2. Определим количество молей продуктов горения:

$$V_{H_2O} = 3 \text{ моля}; V_{N_2} = 11.28 \text{ моля}; V_{ПГ} = 16.28 \text{ моля};$$

3. Определим низшую теплоту сгорания по закону Гесса, взяв значения стандартные теплоты образования веществ из прил. 1 и 3:

$$Q_H = 2 \cdot 396,9 + 2 \cdot 242,2 - 278,2 = 1242,2 \text{ кДж/моль};$$

4. Средняя энтальпия продуктов горения составит:

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

5. Определим приближенную температуру горения, воспользовавшись зависимостью теплосодержания газов от температуры (прил. 4), устанавливающей зависимость температуры от теплосодержания. Лучше всего это сделать ориентируясь на азот, так как его в продуктах горения больше всего. Из таблицы прил. 4 видно, что при температуре 2100°C теплосодержание азота 70,4 кДж/моль. Уточним, сколько потребовалось бы тепла, чтобы нагреть продукты горения до такой температуры $T_1 = 2100$ °C.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения

$$Q = H_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + H_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + H_{N_2} \cdot V_{N_2}^0, \text{ кДж / моль}$$

При $T = 2100$ °C:

$$Q_1 = 114,7 \cdot 2 + 93,4 \cdot 3 + 70,4 \cdot 11,28 = 1303,7 \text{ кДж/моль};$$

7. Сравниваем Q_H и $Q_{ПГ}$, так как $Q_1 > Q_H$, выбираем температуру горения равной 2000°C:

При $T_2 = 2000$ °C:

$$Q_2 = 108,6 \cdot 2 + 88,1 \cdot 3 + 66,8 \cdot 11,28 = 1235 \text{ кДж/моль};$$

8. Так как $Q_2 < Q_H < Q_1$, определим адиабатическую температуру горения по формуле:

$$T_r = T_1 + \frac{(Q_{H(ПГ)} - Q_{ПГ}) \cdot (T_2 - T_1)}{(Q_1 - Q_2)}, \text{ К} \quad (27)$$

$$T_r = 2000 + \frac{(1242,2 - 1235) \cdot (2100 - 2000)}{(1303,7 - 1235)} = 2010^\circ\text{C} = 2283\text{K}$$

Адиабатическая температура горения этилового спирта составила 2283К.

1.4. Концентрационные пределы распространения пламени

1.4.1. Расчет стехиометрической концентрации

Газовая смесь горючего с окислителем способна воспламеняться и распространять пламя только при определенных концентрациях горючего.

Минимальная концентрация горючего, при которой смесь способна воспламеняться и распространять пламя, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), а максимальная концентрация горючего – верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР).

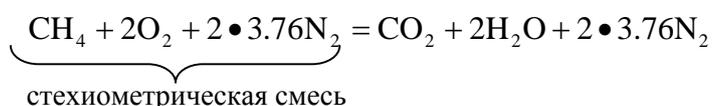
При концентрациях горючего ниже НКПР и выше ВКПР его смеси с воздухом не горючи.

Так, например, для метана CH_4 концентрационные пределы распространения пламени составляют согласно справочным данным (НКПР – 5 об. %, а ВКПР – 15 об. %), для аммиака NH_3 (НКПР – 15 об. %, а ВКПР – 28 об. %).

Скорость распространения пламени и его температура минимальны в предельных смесях, т.е. при концентрациях горючего, равных НКПР и ВКПР. Максимальные значения скорости и температуры пламени, как правило, имеют смеси стехиометрического состава. Поэтому, эти смеси наиболее пожаро-взрывоопасны. Концентрацию горючего в стехиометрической смеси рассчитывают по уравнению материального баланса процесса горения.

Пример 8. Определим концентрацию метана в стехиометрической смеси.

Из уравнения горения видно, что стехиометрическая смесь метана с воздухом содержит 1 моль метана, 2 моля кислорода и 2·3,76 молей азота.



Концентрация горючего в такой смеси определяется по формуле:

$$\varphi_{смex} = \frac{n_{CH_4} \cdot 100}{n_{CH_4} + n_{O_2} + n_{N_2}} \quad (28)$$

$$\varphi_{смex} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 2 + 2 \cdot 3.76} = 9.5\%$$

Концентрация метана в стехиометрической смеси составит 9,5%.

1.4.2. Расчет концентрационных пределов распространения пламени

Значения как нижнего, так и верхнего концентрационных пределов распространения пламени (КПР) можно рассчитать по аппроксимационной формуле:

$$\varphi_{n(e)} = \frac{100}{a \cdot n + b}, \% \quad (29)$$

где: n - число молей кислорода, необходимое для полного сгорания одного моля горючего вещества
a и b - константы, имеющие определенные значения для нижнего и верхнего пределов, в зависимости от значения n

В таблице 1 представлены величины a и b для расчета КПР, в зависимости от значения n.

Таблица 1.

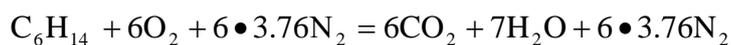
Величины a и b для расчета КПР

Область применения	a	b
Для вычисления нижнего предела	8,684	4,679
Для вычисления верхнего предела n < 7,5	1,550	0,560
Для вычисления верхнего предела n > 7,5	0,768	6,554

Пример 9. Рассчитаем КПР гексана.

Расчет КПР гексана производится в следующей последовательности:

1. Запишем уравнение реакции горения гексана:



2. Рассчитаем нижний концентрационный предел распространения пламени, используя формулу 29:

$$\varphi_{\text{H}} = \frac{100}{8,684 \cdot 6 + 4,679} = 1,76\%$$

3. Рассчитаем верхний концентрационный предел распространения пламени, используя формулу 29:

$$\varphi_{\text{e}} = \frac{100}{1,550 \cdot 6 + 0,560} = 10,14\%$$

Экспериментальные значения КПР, приведенные в справочной литературе составляют 1,24 и 7,5 %. Сравнивая их с расчетными, убеждаемся, что для гексана, расхождение расчетных и экспериментальных данных небольшое.

1.4.3. Построение зависимости КПР от концентрации флегматизатора

Концентрационная область распространения пламени горючей смеси сужается при введении негорючих компонентов. Изменение концентрационных пределов зависит от природы и концентрации негорючего вещества, используемого в качестве флегматизатора.

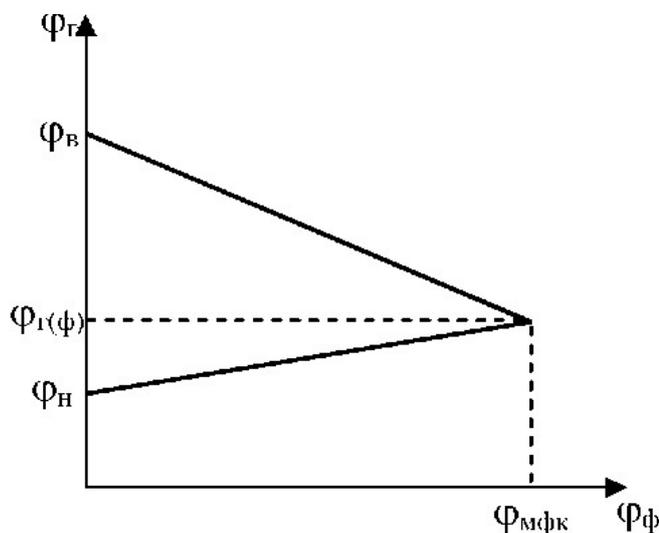


Рис. 1. Зависимость КПР от концентрации флегматизатора

Чаще всего в качестве флегматизаторов используют нейтральные газы, такие, как углекислый газ CO_2 , азот N_2 , водяной пар H_2O . При увеличении концентрации флегматизатора в горючей смеси верхний концентрационный предел уменьшается, а нижний, как правило, незначительно увеличивается. При некоторой определенной для каждого флегматизатора концентрации нижний и верхний концентрационные пределы смыкаются (рис. 1). Эта точка называется экстремальной точкой области распространения пламени или точкой флегматизации. Концентрация инертного газа (флегматизатора), при которой верхний и нижний пределы воспламенения смыкаются, называется **минимальной флегматизирующей концентрацией (МФК)**. Это минимальное количество флегматизатора, которое необходимо ввести в газоздушную смесь стехиометрического состава, чтобы сделать ее негорючей. Минимальную флегматизирующую концентрацию можно рассчитать, если исходить из того, что адиабатическая температура горения смеси стехиометрического состава не может быть меньше 1500 К.

Если за предельную адиабатическую температуру горения принять температуру, равную 1500 К, то достаточно точно расчет МФК можно провести по формуле (27), которое можно записать так:

$$V_{\phi} = \frac{Q_H - (T_{\Gamma} - T_0) \cdot \sum C_{p_{\Gamma i}} \cdot V_{\Gamma i}}{(1500 - T_0) \cdot C_{p\phi}}, \% \quad (30)$$

Подставив в формулу (30), значение $T_{\Gamma}=1500\text{К}$, то получим, количество флегматизатора в исходной горючей смеси, при котором достигается предельная температура горения:

$$V_{\text{МФК}} = \frac{Q_H - (1500 - T_0) \cdot \sum C_{p_{\Gamma i}} \cdot V_{\Gamma i}}{(1500 - T_0) \cdot C_{p\phi}} \quad (31)$$

где $T_0=273\text{ К}$.

А минимальная флегматизирующая концентрация в % об. составит:

$$\varphi_{\text{МФК}} = \frac{V_{\phi} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} = \frac{n_{\phi} \cdot 100}{n_{\Gamma} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}}, \% \quad (32)$$

При расчете МФК принимают, что при сгорании горючего вещества на этом пределе углерод, содержащийся в нем, окисляется до СО.

Концентрацию горючего в точке флегматизации, определяют по формуле:

$$\varphi_{\Gamma(\Phi)} = \frac{V_{\Gamma} \cdot 100}{V_{\Gamma} \cdot V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}} = \frac{n_{\Gamma} \cdot 100}{n_{\Gamma} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\Phi}}, \% \quad (33)$$

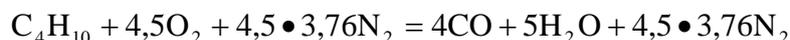
Концентрацию кислорода в точке флегматизации называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода :

$$\varphi_{O_2(\Phi)} = \frac{V_{O_2} \cdot 100}{V_{\Gamma} + V_{O_2} + V_{N_2} + V_{\Phi}} = \frac{n_{O_2} \cdot 100}{n_{\Gamma} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\Phi}}, \% \quad (34)$$

Пример 10. Рассчитать параметры точки флегматизации при разбавлении бутановоздушной смеси диоксидом углерода.

Расчет параметров точки флегматизации производится в следующей последовательности:

1. Запишем уравнение химической реакции окисления бутана.



2. Из прил. 1 и 3, находим теплоты образования продуктов реакции и рассчитываем низшую теплоту горения:

$$Q_H = 4 \cdot 112,7 + 5 \cdot 242,2 - 1 \cdot 132 = 1529,4 \text{ кДж / моль}$$

3. Рассчитаем количество молей в точке флегматизации:

$$n_{\Phi} = \frac{1529,4 - (1500 - 295) \cdot (33,73 + 39,85 \cdot 5 + 31,81 \cdot 4,5 \cdot 3,76) \cdot 10^{-3}}{50,85 \cdot 10^{-3} \cdot (1500 - 295)} = 7,8 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$$

4. Рассчитаем МФК диоксида углерода, по формуле (32).

$$\varphi_{\Phi} = \frac{7,8 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 26\%$$

5. Рассчитаем концентрацию горючего в точке флегматизации по формуле (33), а по формуле (34) концентрацию кислорода в точке флегматизации:

$$\varphi_{O_2} = \frac{4,5 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 14,9\%$$

$$\varphi_{\Gamma} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 4,5 + 4,5 \cdot 3,76 + 7,8} = 3,3\%$$

1.5. Температурные параметры пожарной опасности

1.5.1. Расчет температурных пределов распространения пламени

Температурными пределами распространения характеризуют пожарную опасность жидких горючих веществ. Нижний температурный предел распространения (НТПР) - это температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров над ее поверхностью равна нижнему концентрационному пределу распространения пламени (НКПР). Аналогично при верхнем температурном пределе распространения пламени (ВТПР) концентрация насыщенных паров жидкости равна (ВКПР). Из этого следует, что если для горючего вещества известны КПР, то по зависимости давления насыщенного пара от температуры могут быть найдены температурные пределы:

$$P_{H(B)} = \frac{\varphi_{H(B)} \cdot P_0}{100}, \text{Па} \quad (35)$$

- где: $P_{H(B)}$ - давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения, Па;
 $\varphi_{H(B)}$ - нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения, %;
 P_0 - атмосферное давление, Па;

Температуру вещества, при которой достигается данное давление определим по уравнению Антуана:

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t} \quad (36)$$

- где: A, B, C - константы Антуана (Прил 3);
 t - температура, °С (температурные пределы);

Зависимость давления насыщенного пара от температуры, заданная уравнением Антуана $\lg P = f(T)$ для большинства жидкостей известна и приведена в справочной литературе в виде таблиц (прил. 3).

Пример 11. Определим значение НТПР метилового спирта по нижнему концентрационному пределу распространения пламени. Принять, что атмосферное давление равно нормальному ($P_0 = 101,3$ кПа).

Расчет значение НТПР метилового спирта по нижнему концентрационному пределу распространения пламени производится в следующей последовательности:

1. Используя справочные данные или формулу (29) определим НКПР метилового спирта. Согласно справочным данным НКПР метилового спирта равен - 6 % об.

2. Рассчитаем, какому давлению насыщенного пара соответствует значение нижнего концентрационного предела, используя формулу (35):

$$P_H = \frac{6 \cdot 101,3}{100} = 6,08 \text{ кПа}$$

1. Из уравнение Антуана (37), выразим значение НТПР для метилового спирта:

$$t_{H(B)} = \frac{B}{A - \lg P} - C \quad (37)$$

$$t_H = \frac{1660}{7,3527 - \lg 6,08} - 245,818 = 7^\circ C = 280K$$

Значение НТПР метилового спирта по нижнему концентрационному пределу распространения пламени составило 280К.

1.5.2. Расчет температуры самовоспламенения

Многие горючие вещества способны к самовоспламенению, то есть возгоранию без источника зажигания. Процесс самовоспламенения протекает

при определенной температуре, характерной только для определенного вещества.

Самая низкая температура вещества, при которой пламенное горение паро-, газообразных продуктов разложения возникает самопроизвольно за счет химической реакции окисления горючего вещества, будет являться температурой самовоспламенения ($T_{св}$).

Температура самовоспламенения $T_{св}$, приведенная в справочниках, получена экспериментально по стандартной методике для горючей смеси стехиометрического состава. Установлено, что в пределах гомологического ряда величина $T_{св}$ является функцией длины углеродной цепи в молекуле. Чем длиннее цепь, тем ниже температура самовоспламенения. Метод расчета $T_{св}$ основан на эмпирической зависимости $T_{св}$ от средней длины углеродной цепи.

Углеродная цепь - это цепочка атомов углерода от одного конца молекулы до другого. *Длина цепи* - это число атомов углерода в такой цепи.

Данный метод пригоден для расчета $T_{св}$ алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов.

Задача состоит в том, чтобы по структурной формуле химического соединения найти для него среднюю длину углеродных цепей.

Для определения числа цепей используют формулу:

$$m = \frac{M_p \cdot (M_p - 1)}{2} \quad (38)$$

где: M_p - число концевых функциональных групп (метил (-CH₃), гидроксил (-OH) и фенил (-C₆H₅));

Для расчета средней длины углеродных цепей применяют формулу:

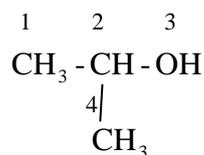
$$l_{ср} = \frac{\sum ni \cdot li}{\sum ni} \quad (39)$$

А затем по значению средней длины цепи, в молекуле используя справочные данные (Прил.6) или расчетным путем можно определить температуру самовоспламенения:

Пример 13. Определим температуру самовоспламенения изопропилового спирта.

Расчет температуры самовоспламенения изопропилового спирта, производится в следующей последовательности:

1. Запишем структурную формулу горючего вещества:



2. Определим число концевых функциональных групп:

В молекуле изопропилового спирта содержится три концевых функциональных группы $M_p=3$ (две метильных (-CH₃) и одна гидроксильная (-OH) группы).

3. Рассчитаем число цепей, используя формулу (39):

$$m = \frac{3 \cdot (3 - 1)}{2} = 3$$

4. Находим длину каждой цепи и её среднюю длину:

В цепях 1- содержится по углерода и одна	Углеродная цепь, m_i	1-3	3-4	1-4	3 и 3-4 два атома группа OH.
	Длина цепи, l_i	2+1	2+1	3	

5. Рассчитаем среднее арифметическое значение длины углеродных цепей:

$$l_{CP} = \frac{3 \cdot 3}{3} = 3$$

6. Используя справочные данные (Прил.6) определим температуру самовоспламенения (при средней длине цепи) изопропилового спирта, которая составила 706 К.

7. Определим температуру самовоспламенения расчетным путем, используя формулу (40):

$$T_{\text{св}} = 300 + 116 \cdot \sqrt{5 - 3} = 464^{\circ}\text{C} = 737\text{K}$$

8. Относительная ошибка расчета составила:

$$\Delta = \frac{737 - 706}{706} \cdot 100 = 4,5\%$$

Итак, температура самовоспламенения изопропилового спирта 737 К.

II. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ГАЗО- И ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

2.1. Расчет температуры и максимального давления взрыва

Принципиальное различие между горением и взрывом заключается в скорости процесса.

При взрыве химическое превращение происходит настолько быстро, что все выделившееся тепло остается в системе, а образовавшиеся продукты не успевают расшириться, т. е. процесс взрыва является адиабатическим и изохорным ($V = \text{const}$). Количество теплоты, выделившееся при взрыве, примерно равно низшей теплоте сгорания вещества $Q_{\text{взр}} \sim Q_{\text{н}}$.

Температура взрыва значительно выше адиабатической температуры горения, так как при горении часть тепла, выделившегося при химическом превращении, затрачивается на совершение работы расширения газа, а при взрыве все выделившееся тепло расходуется только на увеличение внутренней энергии системы. Учитывая, что $Q_{\text{взр}} \sim Q_{\text{н}}$, а изменение энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции происходит лишь в

результате изменения внутренней энергии ($dH = dU + pdV = dU$ при $dV=0$), уравнение теплового баланса примет следующий вид:

$$Q_{ВЗР} = (\sum_{\Delta} U^0_{f_i} n_i)_{\text{прод}} - (\sum_{\Delta} U^0_{f_i} n_i)_{\text{исх}}, \text{ кДж/моль} \quad (42)$$

Так процесс взрыва адиабатно-изохорный, полное отсутствие теплопотерь и нагревание продуктов происходит без расширения газовой смеси, все выделившееся тепло расходуется на увеличение внутренней энергии системы. Тогда среднее значение внутренней энергии продуктов взрыва составит:

$$U_{\text{CP}} = \frac{Q_{\text{H}}}{\sum_{\text{ПГi}}} = \frac{Q_{\text{H}}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V^0_{\text{N}_2}} \quad (43)$$

Максимальное давление взрыва зависит от температуры взрыва и отношения числа молекул продуктов горения к числу молекул взрывчатой смеси:

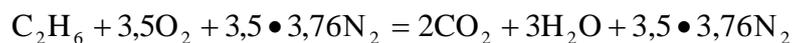
$$P_{\text{ВЗР}} = \frac{P_0 \cdot T_{\text{ВЗР}}}{T_0} \cdot \frac{\sum n_i}{\sum n_{\text{CM}}}, \text{ МПа} \quad (44)$$

где: P_0 - начальное давление взрывчатой смеси, МПа;
 T_0 и $T_{\text{ВЗР}}$ - начальная температура взрывчатой смеси и температура взрыва, К;
 $\sum n_i$ - число молекул газов продуктов сгорания после взрыва;
 $\sum n_{\text{CM}}$ - число молекул газов смеси до взрыва

Пример 14. Определим температуру и максимальное давление взрыва этано-воздушной смеси, если $P_0=101,3$ кПа, $T_0=273+27=300\text{К}$.

Расчет температуры взрыва этана производится в следующей последовательности:

1. Запишем уравнение материального баланса реакции:



2. Определим количество молей продуктов взрыва:

$$V_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль/моль}; V_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \text{ моль/моль}; V_{\text{N}_2} = 3,5 \cdot 3,76 \text{ моль/моль};$$

3. Определим низшую теплоту сгорания этана по закону Гесса, взяв значения теплот образования веществ прил.1 и 3.

$$Q_H = 2 \cdot 396,9 + 3 \cdot 242,2 - 88,4 = 1431 \text{ кДж/моль};$$

4. Среднее значение внутренней энергии продуктов взрыва определим по формуле (43):

$$U_{\text{CP}} = \frac{Q_H}{\sum_{\text{пг}i}} = \frac{1431}{2 + 3 + 13,2} = 78,6 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

4. Определим приближенную температуру горения, воспользовавшись зависимостью теплосодержания газов от температуры (Прил.4), можно установить, какой температуре соответствует такое значение внутренней энергии. Сделаем это по азоту, так как в продуктах горения его больше. Из прил. 5, следует, что при температуре 2900°C внутренняя энергия 1 моля азота составляет 76,4 кДж/моль.

5. Проверим расчетом, какое количество тепла требуется для того, чтобы продукты взрыва нагреть до этой температуры.

$$T_1 = 2900^\circ\text{C};$$

$$Q_1 = U_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2} + U_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} - U_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^0$$

Подставляя численные значения внутренней энергии для этих газов из прил. 5, получим:

$$Q_1 = 139,7 \cdot 2 + 111,7 \cdot 3 + 76,4 \cdot 13,2 = 1623 \text{ кДж / моль}$$

8. Значение Q_1 , значительно больше той энергии Q_H , которая выделилась при взрыве. Поэтому, выберем более низкое значение температуры $T_2 = 2700^\circ\text{C}$, и определим, какое количество тепла при этой температуре будет содержать продукты взрыва.

$$T_2 = 2700^\circ\text{C};$$

$$Q_2 = 128,9 \cdot 2 + 102,4 \cdot 3 + 70,2 \cdot 13,2 = 1491,6 \text{ кДж / моль}$$

9. Значение Q_2 , тоже больше той энергии Q_H , которая выделилась при взрыве ($Q_2 > Q_H$), это означает, что температура взрыва ниже этого

значения. Рассчитаем, какое количество тепла содержат продукты взрыва при температуре $T_3=2600^\circ\text{C}$.

$T_3=2600^\circ\text{C}$:

$$Q_3 = 123,7 \cdot 2 + 97,8 \cdot 3 + 67,4 \cdot 13,2 = 1430,5 \text{ кДж / моль}$$

Значение $Q_3 < Q_H$, следовательно, температура взрыва этано-воздушной смеси находится между значениями $T_3=2600^\circ\text{C}$ и $T_2=2700^\circ\text{C}$.

Уточним значение температуры взрыва, методом линейной интерполяции:

$$T_{\text{взр}} = T_3 + \frac{T_2 - T_3}{Q_2 - Q_3} \cdot (Q_H - Q_3) = 2600 + \frac{2700 - 2600}{1491 - 1430} \cdot (1431 - 1430) = 2602^\circ\text{C} = 2875 \text{ K}$$

9. Рассчитаем максимальное давление взрыва этано-воздушной смеси, используя формулу (44):

$$\Sigma n_i = 2 + 3 + 3,5 \cdot 3,76 = 18,16 \text{ моль (по уравнению горения);}$$

$$\Sigma \text{см} = 1 + 3,5 + 3,5 \cdot 3,76 = 17,16 \text{ моль (по уравнению горения);}$$

$$P_{\text{взр}} = \frac{101,3 \cdot 2875}{273 + 27} \cdot \frac{18,16}{17,16} = 1027,36 \text{ кПа}$$

Температура взрыва этано-воздушной смеси составила 2875K, а максимальное давление взрыва 1027,36 кПа.

III. Выбор варианта задания и общие методические рекомендации по выполнению курсовой работы

В курсовой работе студентам предлагается самостоятельно обосновать теоретический вопрос и на основании расчетных методов определить основные параметры горения и взрыва индивидуального химического соединения, охарактеризовать его пожаровзрывоопасные свойства и сравнить полученные значения с экспериментально установленными показателями пожарной опасности в справочной технической литературе.

Таблица 2. Варианты заданий.

№ вар	Вещество А	Хим. ф-ла
1.	Метан	CH_4
2.	Этан	C_2H_6
3.	Пропан	C_3H_8
4.	Бутан	C_4H_{10}
5.	2,2 -диметилбутан	C_6H_{14}
6.	Пентан	C_5H_{12}
7.	2,2-диметилпентан	C_7H_{16}
8.	2,4-диметил-3-этилпентан	C_9H_{20}
9.	Гексан	C_6H_{14}
10.	Гептан	C_7H_{16}
11.	2,5,5-триметилгептан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$
12.	4-изопропилгептан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$
13.	Октан	C_8H_{18}
14.	4-метилоктан	C_9H_{20}
15.	3-метил-2-бутанол	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$
16.	Этанол	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
17.	Пропанол-1	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$
18.	Бутанол-2	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$
19.	3-пентанол	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$
20.	2,6-диметил-4-гептанол	$\text{C}_9\text{H}_{19}\text{OH}$
21.	4-метил-2-этилпентанол	$\text{C}_8\text{H}_{17}\text{OH}$
22.	2-метил-1-пропанол	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$

Варианты заданий выбираются студентами самостоятельно, согласно порядковому номеру списка группы.

Часть 1. Теоретическое обоснование процессов горения и взрыва.

1. Определение горения: условия для его возникновения, окислители и источники зажигания.
2. Полное и неполное горение.
3. Виды и режимы горения.
4. Стадии процесса горения.
5. Теплота горения.
6. Температуры - горения и воспламенения.
7. Самовоспламенение: условия, влияющие на температуру и методы определения.
8. Вспышка и воспламенение жидкостей.
9. Пределы воспламенения горючей смеси: концентрационные и температурные.
10. Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения); влияние давления.
11. Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения); влияние мощности источника зажигания.
12. Концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения); влияние содержания инертных газов и химически активных ингибиторов. Минимальная флегматизирующая концентрация (МФК), минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК).
13. Взаимосвязь температуры горения и концентрации горючего в парогазовоздушных смесях.
14. Элементы (основы) тепловой теории самовоспламенения. Критические условия.
15. Температура самовоспламенения – показатель пожарной опасности веществ. Влияние концентрации горючего в парогазовоздушной смеси.
16. Температура зажигания – предельный параметр возникновения горения. Влияние состава парогазовоздушной смеси.
17. Взрывные процессы при горении парогазовоздушных смесей.
18. Разновидности взрывов.
19. Случайные взрывы.
20. Характеристика ударных волн.
21. Тепловое действие взрыва.
22. Прогнозная оценка последствий взрыва..

Часть 2. Расчет основных параметров горения и взрыва.

Для вещества *A* (выбрать из табл. 2 в соответствии с номером варианта задания) рассчитать следующие параметры горения и взрыва:

- горючесть вещества (*K*);
- объем воздуха, необходимый при горении;
- объем продуктов сгорания;

- адиабатическую температуру горения ($T_{ад}$);
- концентрацию горючего вещества в стехиометрической смеси;
- концентрационные пределы распространения пламени (КПР);
- минимальную флегматизирующую концентрацию (МФК);
- концентрацию горючего в точке флегматизации;
- зависимость КПР от концентрации флегматизатора;
- минимально взрывоопасное содержание кислорода (МВСК);
- температурные пределы распространения пламени (ТПР);
- температуру самовоспламенения ($T_{св}$);
- температуру взрыва ($T_{взр}$);
- максимальное давление взрыва ($P_{взр}$).

Часть 3. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

Найти в справочной литературе пожаровзрывоопасные характеристики вещества A и сравнить их с полученными расчетными значениями. Сделать выводы.

IV. Рекомендуемая литература

1. Ассовский И.Г. Теория горения и внутренняя баллистика
Издательство: Наука, 2005. – 357с.
2. ГОСТ 12.1.044. -89 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.
Номенклатура показателей и методы их определения.
3. Девесилов В.А., Теория горения и взрыва: практикум: учебное
пособие/ В.А. Девесилов, Т.И. Дроздова, С.С Тимофеева. – М.: ФОРУМ,2012.
– 352 с.
4. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ:
Учебное пособие. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984.-278 с.
5. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П.. Горение и свойства
горючих веществ. - Москва, Химия, 1981.- 272 с.
6. Карауш С.А. Теория горения и взрыва: М.:Academia, 2013. – 208 с.
7. Кукин П.П. Теория горения и взрыва/ П.П. Кукин, В.В. Юшин, С.Г.
Емельянов. – М.: Юрайт, 2012. – 448с.
- 8.Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их
тушения (Справочное издание в двух книгах) / Баратов А.Н., Корольченко
А.Я.,Кравчук Г.Н. и др. - М.: Химия, 1990.
- 9.Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва/ В.А. Портола,
Луговцова Н.Ю., Торосян Е.С. –Томск: Томский политехнический
университет, 2012. – 108 с.
10. Тотая А.В., Казакова О.Г. Теория горения и взрыва: учебник и
практикум / О.Г. Казаков [и др.]; под общ. ред. А.В. Тотая, О.Г. Казакова. – 2-
е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт,2013. – 352 с.

V. Приложения

Приложение 1.

Стандартные энтальпии образования и энтропии некоторых веществ.

№п/п	Вещество	M, кг/моль	ρ , кг/м ³	Tпл, К	Tкип, К	ΔH_f^0 , кДж/моль
1	Воздух	28,98	1,293	60	81	0
2	CO	28,01	1,250	68	81	112,7
3	CO ₂	44,01	1,977	216,4	194,5	396,9
4	CH ₄	16,04	0,717	90,5	112,4	75
5	C ₂ H ₆	30,06	1,357	90,5	184,4	88,4
6	C ₃ H ₈	44,10	2,019	85,6	230,9	109,4
7	H ₂	2,02	0,090	13,8	20,3	0
8	H ₂ O	18,02	0,768	273	373,0	242,2
9	N ₂	28,01	1,251	63	77,2	0
10	O ₂	32,00	1,429	54,6	90,1	0

Приложение 2.

Удельные теплоемкости продуктов горения

№п/п	Вещество	Химическая формула	Удельная теплоемкость, C _{pi}	
			кДж(м ³ ·К)	кДж/(моль·К)
1	Азот	N ₂	1,41	3,18·10 ⁻²
2	Вода (пар)	H ₂ O	1,78	3,98·10 ⁻²
3	Воздух	O ₂ +3.76N ₂	1,44	3,23·10 ⁻²
4	Диоксид серы	SO ₂	2,28	5,11·10 ⁻²
5	Диоксид углерода	CO ₂	2,27	5,08·10 ⁻²
6	Оксид углерода	CO	1,5	3,37·10 ⁻²

**Теплота образования веществ, температура кипения и значения коэффициентов
А,В,С**

Приложение 3

№ п/п	Вещество А	Теплота образова- ния, ΔH_f , кДж/моль	Температура кипения, °С	Коэффициенты уравнения Антуана $\lg P=A-(B/(C+t))$, Р, кПа		
				А	В	С
1.	Метан	-74,85	-161,6	15,2243	897,84	-7,16
2.	Этан	-84,48	-88,6	15,6637	1511,42	-17,16
3.	Пропан	-109,4	-42,09	15,7260	1872,46	-25,16
4.	Бутан	-132,0	-0,5	15,6782	2154,90	-34,42
5.	2,2-диметилбутан	177,8	49,7	5,93476	1127,187	228,9
6.	Пентан	-173,33	36,07	15,8333	2477,07	-39,94
7.	2,2-диметилпентан	206,1	79,2	5,93972	1190,033	233,303
8.	2,4-диметил-3-этилпентан	235,0	136,7	6,16233	1490,02	221,908
9.	Гексан	-167,19	68,0	15,8366	2697,55	-48,78
10.	Гептан	-187,78	98,42	15,8737	2911,32	-56,51
11.	2,5,5-триметилгептан	269,0	152,8	6,24873	1587,259	220,119
12.	4-изопропилгептан	251,1	158,0	6,31693	1628,498	219,75
13.	Октан	-208,45	125,52	15,9426	3120,29	-63,63
14.	4-метилоктан	233,3	142,4	6,27293	1553,088	221,45
15.	3-метил-2-бутанол	314,2	112,0	6,9421	1090,9	157,2
16.	Этанол	-278,2	78,4	18,9119	3803,98	-41,68
17.	Пропанол-1	-257,33	97,4	17,5439	3166,38	-80,15
18.	Бутанол-2	-274,43	99,5	17,2102	3026,03	-86,65
19.	3-пентанол	316	116,0	6,57423	1354,42	183,41
20.	2,6-диметил-4-гептанол	412,1	176,5	5,66299	1144,81	135,0
21.	4-метил-2-этилпентанол	385,0	177,3	5,70756	1134,599	129,195
22.	2-метил-1-пропанол	283,2	107,8	7,83005	2058,392	245,642

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Приложение 4.

Температура, °С	H, кДж/моль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
0	0	0	0	0	0	0
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,3
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7
2200	78,1	74,1	74,7	120,8	98,8	118,5
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	119,4	141,5
2700	97,9	92,6	93,1	151,5	124,8	147,3
2800	101,8	96,4	96,8	157,6	130,3	153,0
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7

Внутренняя энергия газов

Приложение 5

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

**Температура самовоспламенения предельных углеводородов в зависимости от
средней длины углеводородной цепи**

Приложение 6

l_{ср}	Т_{св}, К	l_{ср}	Т_{св}, К	l_{ср}	Т_{св}, К
2,0	737	5,2	582	8,4	525
2,1	736	5,3	579	8,5	524
2,2	734	5,4	577	8,6	523
2,3	732	5,5	574	8,7	522
2,4	730	5,6	572	8,8	521
2,5	728	5,7	569	8,9	520
2,6	725	5,8	567	9,0	519
2,7	721	5,9	564	9,1	519
2,8	716	6,0	562	9,2	518
2,9	711	6,1	560	9,3	517
3,0	706	6,2	557	9,4	516
3,1	696	6,3	555	9,5	516
3,2	693	6,4	553	9,6	515
3,3	636	6,5	551	9,7	514
3,4	678	6,6	549	9,8	513
3,5	669	6,7	547	9,9	513
3,6	658	6,8	545	10	512
3,7	649	6,9	543	10,5	509
3,8	642	7,0	542	11,0	507
3,9	634	7,1	540	11,5	506
4,0	628	7,2	539	12,0	505
4,1	623	7,3	537	12,5	505
4,2	619	7,4	536	13,0	504
4,3	614	7,5	535	13,5	504
4,4	610	7,6	534	14,0	503
4,5	606	7,7	533	14,5	503
4,6	602	7,8	531	15,0	502
4,7	599	7,9	530	15,5	502
4,8	595	8,0	529	16,0	501
4,9	592	8,1	528	16,5	501
5,0	588	8,2	527	17,0	500
5,1	585	8,3	526	17,5	500

План выпуска учеб.-метод. документ. 2015 г., поз. 30

Публикуется в авторской редакции

Подписано в свет 21.12.2015.

Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 2,6. Объем данных 0,3 Мбайт

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
<http://www.vgasu.ru>, info@vgasu.ru