

**МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ**  
**И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ**

Академия Государственной противопожарной службы

И. Р. Бегишев

# **ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**  
(методические указания по выполнению  
курсовой работы)

Для слушателей  
Института заочного и дистанционного обучения

*Утверждено Редакционно-издательским советом  
Академии ГПС МЧС России  
в качестве учебно-методического пособия*

Москва 2010

УДК 544  
ББК 38.96  
А 66

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой физики

*В. И. Служев*

Доктор технических наук, профессор  
начальник кафедры общей и специальной химии

*С.С. Воевода*

**Бегишев И.Р.**

А 66 Курсовая работа по дисциплине «Теория горения и взрыва» (методические указания по выполнению курсовой работы для слушателей ИЗИ-ДО): Учебно-методическое пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 60 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для слушателей Академии ГПС МЧС России

УДК 544  
ББК 38.96

В авторской редакции

© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2010

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Теория горения и взрыва» ставит своей целью формирование у слушателей теоретического фундамента для глубокого осмысления всей системы показателей пожарной опасности веществ и материалов как совокупности предельных условий и параметров возникновения и прекращения горения.

В курсовой работе предлагается теоретически на основании расчетных методов определить параметры горения и взрыва выбранного горючего вещества, охарактеризовать его пожаровзрывоопасные свойства и сравнить полученные расчетные значения с экспериментально установленными показателями пожарной опасности, имеющимися в справочной литературе. Для помещений заданных размеров определить массу горючего вещества, при испарении которого в помещении образуется наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь, определить тротиловый эквивалент взрыва такой смеси, рассчитать безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны и количество флегматизатора, необходимого для предотвращения взрыва.

Прежде чем приступить к выполнению курсовой работы слушателям рекомендуется самостоятельно изучить материал учебного пособия «Теория горения и взрыва» (авторы: Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П.) в рамках рабочей программы по этой дисциплине и познакомиться с методами расчета параметров горения и взрыва, представленными в разделе 2 настоящих методических указаний. В этом же разделе приведены конкретные примеры, которые помогут слушателям при выполнении расчетов по курсовой работе.

Выполненная курсовая работа высылается в Академию на проверку. Защита курсовой работы проводится в период экзаменационной сессии при собеседовании с преподавателями кафедры процессов горения. В период экзаменационной сессии слушателям института заочного и дистанционного обучения преподаватели кафедры читают лекции, проводят практические и лабораторные занятия. Изучение дисциплины «Теория горения и взрыва» завершается сдачей дифференцированного зачета.

## 2. ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. МЕТОДЫ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

### 2.1. Некоторые важные понятия молекулярной физики

В молекулярной физике количество вещества удобно выражать в молях или киломолях. 1 *моль вещества* – количество вещества в граммах, масса которого численно равна молекулярной массе. Например, масса 1 моля водорода  $H_2$  равна 2 г/моль или  $2 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, а масса 1 моля метана  $CH_4$  – 16 г/моль или  $16 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. 1 киломоль вещества в тысячу раз больше 1 моля, поэтому его масса в  $10^3$  раз больше, например, для метана масса 1 киломоля составляет 16 кг/кмоль.

*Примечание.* При определении массы моля вещества можно воспользоваться табл. I приложения, в которой приведены атомные массы элементов.

В связи с тем, что масса 1 моля вещества численно равна его молекулярной массе, то в 1 моле любого вещества содержится одинаковое количество молекул. Оно составляет  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  молекул/моль (число Авогадро). Поэтому в газообразном состоянии 1 моль любого вещества при нормальных условиях занимает один и тот же объем, равный 22,4 л. Таким образом, объем 1 моля любого газа при  $T_0 = 273$  К и  $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па составляет 22,4 л/моль или  $22,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/моль. Объем 1 киломоля в тысячу раз больше и равен 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль.

Объем 1 моля газа можно определить из уравнения состояния (Клапейрона – Менделеева)

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (1)$$

где  $m$  – масса вещества,  $M$  – масса одного моля вещества,  $\frac{m}{M}$  – число молей вещества,  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,31$  Дж/(моль·К)).

Для 1 моля вещества ( $m/M = 1$ ) объем газа при нормальных условиях составит

$$V_\mu = \frac{RT_0}{P_0} = \frac{8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} 273 \text{ К}}{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль},$$

где Дж = Н · м, Па = Н/м<sup>2</sup>.

Плотность вещества в газообразном состоянии при нормальных условиях

$$\rho = \frac{M}{V_0}. \quad (2)$$

Если условия отличаются от нормальных, необходимо ввести поправки на температуру и давление. Для этого можно использовать объединенный газовый закон:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} \rightarrow V = V_0 \frac{P_0T}{PT_0}. \quad (3)$$

Использование таких величин, как масса и объем 1 моля вещества позволяет значительно упростить решение многих практических важных задач, когда необходимо по известной массе вещества найти его объем в газообразном состоянии или наоборот.

**Пример 1.** Какой объем паров образуется при испарении 20 кг ацетона? Условия считать нормальными ( $T = 273 \text{ К}$ ,  $P = 101,3 \text{ кПа}$ ).

**Решение.** Воспользовавшись табл. I приложения, где приведены атомные массы углерода, водорода и кислорода, найдем молекулярную массу ацетона ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )

$M = 12 \cdot 3 + 1 \cdot 6 + 16 \cdot 1 = 58$ , это означает, что масса 1 кмоль ацетона равна  $M_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} = 58 \text{ кг/кмоль}$ , а количество киломолей испарившегося ацетона составит

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} = \frac{m}{M_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}}} = \frac{20 \text{ кг}}{58 \text{ кг/кмоль}} \approx 0,35 \text{ кмоль}.$$

Тогда объем паров ацетона  $V_{\text{паров}} = V_{\mu} \cdot n$ , где  $V_{\mu}$  – объем 1 кмоль вещества при нормальных условиях,  $V_{\text{паров}} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль} \cdot 0,35 \text{ кмоль} = 7,8 \text{ м}^3$ .

**Пример 2.** В баллоне объемом 40 л находится кислород под давлением 150 ат. Найти массу этого кислорода. Температуру принять равной нормальной ( $T=273 \text{ К}$ ).

**Решение.** Найдем объем кислорода при нормальных условиях. Согласно объединенному газовому закону (формула 3)

$$V_0 = V \frac{PT_0}{P_0T},$$

по условию задачи  $T = T_0 = 273 \text{ К}$ ,  $P = 150 P_0$ .

Тогда  $V_0 = V \cdot 150 = 40 \text{ л} \cdot 150 = 6000 \text{ л} = 6 \text{ м}^3$  (при н.у.).

Масса кислорода, находящегося в баллоне, составит

$$m = \frac{V_0}{V_\mu} \cdot M_{O_2},$$

где  $V_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ,  $M_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль}$  (см. табл. I и II приложения).

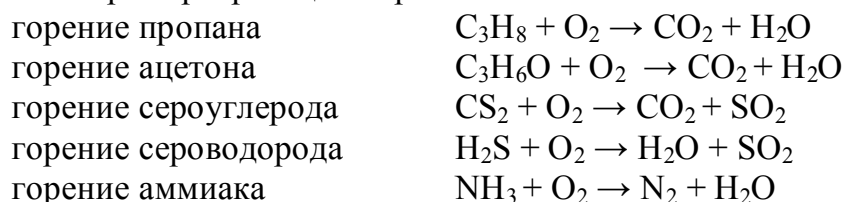
$$m = \frac{6 \text{ м}^3}{22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}} \cdot 32 \text{ кг/кмоль} \approx 8,6 \text{ кг}$$

## 2.2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

### 2.2.1. Уравнение материального баланса

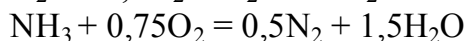
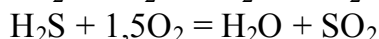
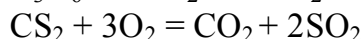
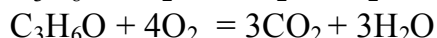
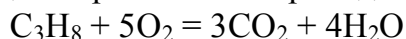
При горении веществ в воздухе происходит быстрая химическая реакция между горючим веществом и кислородом воздуха с интенсивным тепловыделением. В результате этой реакции образуются в основном окислы элементов, входящих в состав горючего вещества. При сгорании углеводородов, состоящих из атомов С и Н, образуется  $CO_2$  (двуокись углерода) и  $H_2O$  (вода). При неполном сгорании наряду с ними образуются  $CO$  (окись углерода) и  $C_{п(\text{тверд})}$  (углерод) в виде сажи. При написании уравнения горения и составлении материального баланса, как правило, записывают только продукты полного окисления  $CO_2$  и  $H_2O$ . Если в составе горючего вещества есть сера (S), то при сгорании образуется  $SO_2$ . Азот (N), входящий в состав горючего вещества, при горении в воздухе не окисляется, а выделяется в виде свободного азота ( $N_2$ ). Объясняется это тем, что при горении в воздухе температура горения относительно невысокая (1500-2000 К) и при такой температуре окислы азота не образуются.

Примеры реакций горения:



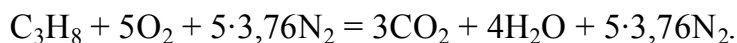
Согласно закону сохранения массы количество атомов каждого элемента в левой и правой части химического уравнения должно быть одинаковым. Для того, чтобы уравнивать обе части уравнения, рекомендуется сначала расставить коэффициенты перед окислами в правой части с тем, чтобы уравнивать число атомов элементов горючего вещества (С, Н, S, N ...). Затем, подсчитав количество атомов кислорода в правой части уравнения, поставить коэффициент перед кислородом в левой части уравнения. При этом необходимо учесть кислород, который может входить в состав молекулы горючего вещества (например, как это имеет место в ацетоне  $C_3H_6O$

или этиловом спирте  $C_2H_5OH$ ). С учетом вышесказанного запишем уравнения реакций горения вышеприведенных веществ:



Необходимо помнить, что записанные уравнения химических реакций горения являются брутто-уравнениями, которые показывают только начальное и конечное состояние системы, т.е. какие исходные вещества вступают в реакцию и какие продукты при этом образуются. Они не отражают механизма химического взаимодействия при горении, который достаточно сложен и протекает через ряд промежуточных стадий с участием атомов и радикалов (см. учебное пособие: Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. «Теория горения и взрыва»).

Уравнение материального баланса процесса горения отличается от уравнения химической реакции тем, что в него для удобства расчетов включают азот, содержащийся в воздухе и не участвующий в химическом превращении. Поскольку воздух состоит из 21 % (об.) кислорода и 79 % (об.) азота, т.е. в нем на 1 моль кислорода приходится  $79/21 = 3,76$  молей, в уравнении материального баланса перед азотом ставят коэффициент 3,76. Например, уравнение материального баланса для горения пропана будет следующим:



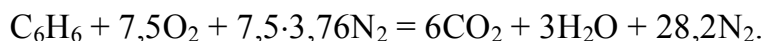
Коэффициент, который записывают перед  $O_2$  (в данном случае 5) необходимо повторить и перед  $N_2$ , так как азот и кислород в воздухе неразделимы.

### 2.2.2. Объем воздуха, необходимый для горения, и объем продуктов горения

Уравнение материального баланса позволяет рассчитывать количество воздуха, необходимое для горения любого горючего вещества и количество образующихся продуктов горения.

Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы количества (кг, кмоль,  $m^3$ ) горючего вещества, называется **теоретическим количеством воздуха**  $V_v^0$ .

Рассмотрим для примера материальный баланс процесса горения бензола в воздухе:



Из этого уравнения видно, что для полного сгорания 1 кмоль бензола требуется  $(7,5 + 7,5 \cdot 3,76)$  кмоль воздуха, который состоит из 7,5 кмоль  $O_2$  и  $7,5 \cdot 3,76$  кмоль, не принимающего участия в горении  $N_2$ . При сгорании 1 кмоль бензола образуется 6 кмоль  $CO_2$ , 3 кмоль  $H_2O$  и остается не участвовавший в химическом превращении  $7,5 \cdot 3,76 = 28,2$  кмоль  $N_2$ .

В общем виде формула для расчета количества воздуха:

$$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_r}, \quad (4)$$

где  $n_{O_2}$ ,  $n_{N_2}$ ,  $n_r$  – число кмоль кислорода, азота и горючего вещества в уравнении материального баланса, кмоль.

А для расчета объема продуктов горения:

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_r}, V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_r} \quad \text{и} \quad V_{N_2}^0 = \frac{n_{N_2}}{n_r}, \quad (5)$$

где  $n_{CO_2}$ ,  $n_{H_2O}$ ,  $n_{N_2}$  – количество кмоль веществ в правой части уравнения материального баланса,  $V_{N_2}^0$  – объем азота из воздуха, участвовавшего в горении, кмоль/кмоль.

Общий объем продуктов горения определяется по формуле:

$$V_{пр}^0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}^0. \quad (6)$$

Горючая газовоздушная смесь, соответствующая уравнению материального баланса называется **стехиометрической**. В такой смеси нет ничего лишнего, горючее и окислитель находятся в пропорции, обеспечивающей полное ее сгорание.

Для вышеприведенного примера стехиометрическая смесь состоит из 1 объема бензола (пары в газообразном состоянии), 7,5 объемов кислорода и  $7,5 \cdot 3,76$  объемов азота. При сгорании такой смеси в продуктах горения будет только  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$  в объемах, соответствующих правой части уравнения.

При горении расход воздуха может отличаться от теоретически необходимого. Отношение количества воздуха, участвовавшего в горении к теоретически необходимому, называется **коэффициентом избытка воздуха**

$$\alpha = \frac{V_a}{V_a^0}.$$



Действительный расход воздуха на единицу горючего записывается как  $V_B = \alpha V_B^0$ . Разность между действительным и теоретически необходимым количеством воздуха называется **избытком воздуха**

$$\Delta V = V_B - V_B^0 \quad \text{или} \quad \Delta V_B = V_B^0(\alpha - 1). \quad (7)$$

Для стехиометрической смеси  $\alpha = 1$  и  $\Delta V_B = 0$ .

Если горение происходит с избытком воздуха ( $\alpha > 1$ ), то азота в продуктах горения будет больше (добавится азот из избытка воздуха):

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79\Delta V_B \quad (8)$$

и в продуктах горения появится кислород

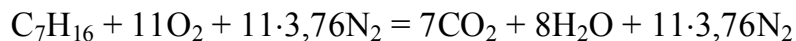
$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_B. \quad (9)$$

В этом случае полный объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_B \quad \text{или} \quad V_{\text{пр}} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (10)$$

Для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения чаще всего проводят в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Так как 1 кмоль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях  $22,4 \text{ м}^3$ ), то объем, рассчитанный в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то, как правило, расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в  $\text{м}^3/\text{кг}$ . Для этого кмоль воздуха или продукта горения переводят в  $\text{м}^3$ , умножая на объем одного кмоль газа ( $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ), а кмоль горючего переводят в кг, умножая на массу одного кмоль горючего ( $M_r$ , кг/кмоль). Например, при сгорании 1 кг гептана



требуется воздуха

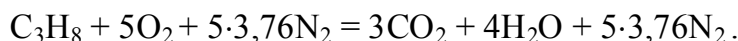
$$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2})22,4}{n_r M_r} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

образуется  $V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2} \cdot 22,4}{n_r M_r} = \frac{7 \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 1,57 \text{ м}^3/\text{кг}$

и далее по химическому уравнению.

**Пример 3.** Определить какое количество воздуха потребуется для сгорания 1 м<sup>3</sup> пропана и какое количество продуктов сгорания при этом образуется. Сгорание происходит при  $\alpha = 1$  (стехиометрическая смесь; температура и давление считать нормальными).

**Решение.** Запишем уравнение материального баланса горения пропана



Объем воздуха, необходимый для горения

$$V_a^0 = \frac{n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}}{n_2} = \frac{5 + 5 \cdot 3,76}{1} = 23,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов горения

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_2} = \frac{3}{1} = 3 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_2} = \frac{4}{1} = 4 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_2} = \frac{5 \cdot 3,76}{1} = 18,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3,$$

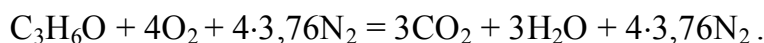
так как  $\alpha = 1$ , избыток воздуха  $\Delta V_{\text{в}} = 0$ , тогда полный объем продуктов горения

$$V_{n_2}^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 = 3 + 4 + 18,8 = 25,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3.$$

Таким образом, для сгорания 1 м<sup>3</sup> пропана требуется 23,8 м<sup>3</sup> воздуха, объем продуктов сгорания при этом составит 25,8 м<sup>3</sup> (при н.у.).

**Пример 4.** Определить объемы воздуха и продуктов горения при нормальных условиях, если при пожаре на складе сгорело 1000 кг ацетона, а горение протекало при  $\alpha = 2$ .

**Решение.** Запишем уравнение материального баланса горения ацетона в воздухе



Объем воздуха, необходимого для сгорания 1 кг ацетона

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})22,4}{n_{\text{г}}M_{\text{г}}},$$

учитывая, что масса одного киломоля ацетона составляет 58 кг/моль, получим

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{(4 + 4 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 58} = 7,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Действительный объем воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 2$ .

$$\Delta V_{\text{в}} = \alpha V_{\text{в}}^0 = 2 \cdot 7,4 = 14,8 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

а избыток воздуха

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}} - V_0 = V_{\text{в}}^0(\alpha - 1) = 7,4(2 - 1) = 7,4 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}}^0 = \frac{(n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2})22,4}{n_{\text{г}}M_{\text{г}}} = \frac{(3 + 3 + 4 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 58} = 8,1 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

С учетом избытка воздуха полный объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_{\text{в}} = 8,1 + 7,4 = 15,5 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

При сгорании 1000 кг ацетона объем воздуха при нормальных условиях составит  $14,8 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1000 \text{ кг} = 14\,800 \text{ м}^3$ , а объем продуктов горения  $15,5 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1000 \text{ кг} = 15\,500 \text{ м}^3$ .

*Примечание.* Если в процессе горения были заданы другие значения температуры и давления, то объем продуктов горения и воздуха рассчитывается с учетом объема, который занимает один кмоль газа при этих условиях:

$$V = \frac{22,4P_0T}{T_0P},$$

где  $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ ;  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ ;  $T$  и  $P$  – заданные температура и давление.

## 2.3. Тепловой баланс процессов горения

### 2.3.1. Теплота сгорания вещества

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<sup>3</sup>), называют низшей теплотой сгорания  $Q_n$ .

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. Напомним, что количество теплоты, выделяющееся при конденсации паров, равно количеству теплоты, затраченному на парообразование. Тогда:

$$Q_v = Q_n + r, \quad (11)$$

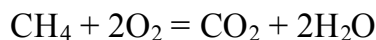
где  $Q_v$  – высшая теплота сгорания вещества, а  $r$  – удельная теплота парообразования воды.

При расчетах температуры горения пользуются величиной  $Q_n$ , так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии. Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводятся в справочной литературе. Эта величина может быть рассчитана по закону Гесса, который говорит о том, что тепловой эффект химической реакции равен разности сумм теплоты образования продуктов реакции и теплоты образования исходных веществ:

$$Q_n = \left( \sum \Delta H_{f_i}^{\circ} n_i \right)_{\text{прод}} - \left( \sum \Delta H_{f_i}^{\circ} n_i \right)_{\text{исх}}, \quad (12)$$

где  $\Delta H_{f_i}^{\circ}$  – теплота образования  $i$ -того вещества,  $n_i$  – количество молей  $i$ -го вещества.

Напомним из курса химии, что теплота образования сложного вещества равна количеству теплоты, выделившейся при его образовании из простых веществ. Теплота образования простого вещества (вещества, молекулы которого состоят из атомов одного элемента, например, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, S, C...) принимается равной нулю. Теплота образования некоторых горючих веществ приведена в табл. II и III приложения. При сгорании метана



низшая теплота сгорания, согласно закону Гесса (12), равна

$$Q_n = \Delta H_{f_{CO_2}}^{\circ} n_{CO_2} + \Delta H_{f_{H_2O}}^{\circ} n_{H_2O} - \Delta H_{f_{CH_4}}^{\circ} n_{CH_4} - \Delta H_{f_{O_2}}^{\circ} n_{O_2}. \quad (13)$$

Учитывая, что кислород – простое вещество и для него  $\Delta H_{f_{O_2}}^{\circ} = 0$ ,

$$Q_n = \Delta H_{f_{CO_2}}^{\circ} n_{CO_2} + \Delta H_{f_{H_2O}}^{\circ} n_{H_2O} - \Delta H_{f_{CH_4}}^{\circ} n_{CH_4}. \quad (14)$$

Подставляя значения теплоты образования  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $CH_4$  из табл. II приложения, окончательно получим

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

### 2.3.2. Температура горения

Под температурой горения понимают максимальную температуру, до которой нагреваются продукты горения. Принято различать адиабатическую температуру горения, рассчитываемую без учета потерь тепла в окружающее пространство, и действительную температуру горения, учитывающую эти теплопотери.

Для расчета температуры горения составим уравнение теплового баланса, считая, что выделившееся в результате сгорания тепло нагревает продукты горения ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ...) от начальной температуры  $T_0$  до температуры  $T_g$ , увеличивая их теплосодержание.

$$Q_n(1-\eta) = \sum [H_{nri}(T_g) - H_{nri}(T_0)] \cdot V_{nri} \quad (15)$$

где  $\eta$  – коэффициент теплопотерь (доля потерь тепла на излучение);  $H_{nri}(T_g)$  и  $H_{nri}(T_0)$  – значения теплосодержания (энтальпии)  $i$ -го продукта горения при температуре горения и начальной температуре;  $V_{nri}$  – объем  $i$ -го продукта горения.

Если теплосодержание продуктов горения при  $T = 273 \text{ К}$  принять равным нулю, то

$$Q_n(1-\eta) = \sum H_{nri}(T_g) \cdot V_{nri} \quad (16)$$

Задача состоит в том, чтобы по известной зависимости теплосодержания газов от температуры методом последовательных приближений найти температуру, при которой будет справедливо это равенство.

Напомним, что адиабатическим называют процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, поэтому температуру горения, рассчитанную при условии отсутствия теплопотерь, называют адиабатической. И так для адиабатического процесса, так как  $\eta = 0$

$$Q_n = \sum H_{\text{пр}i}(T_r)V_{\text{пр}i} \quad (17)$$

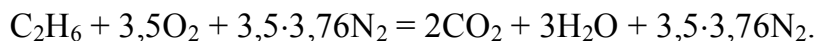
Температура горения зависит от концентрации горючего в горючей смеси. Если горение происходит с избытком воздуха, т.е. при  $\alpha > 1$ , то выделившееся в результате сгорания тепло частично затрачивается на нагрев этого лишнего воздуха. В горючей смеси с  $\alpha < 1$  из-за недостатка воздуха полное сгорание горючего вещества произойти не может, поэтому и тепло-выделение в такой смеси будет неполным. Из этого можно сделать вывод, что максимальная температура горения будет при сгорании стехиометрической смеси, т.е. при  $\alpha = 1$ .

Адиабатическую температуру горения, как правило, рассчитывают для стехиометрической смеси, т.е. при условии  $\alpha = 1$ .

**Пример 5.** Найти адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси этана с воздухом, начальная температура горючей смеси  $T_0 = 273 \text{ К}$ .

**Решение.** Адиабатическую температуру горения вещества находят при условии отсутствия теплотерь ( $\eta = 0$ ) для стехиометрической смеси горючего с воздухом, т.е. при  $\alpha = 1$ .

Запишем уравнение горения этана в воздухе



Объем продуктов горения составляет  $V_{\text{CO}_2} = 2$  моль / моль;  
 $V_{\text{H}_2\text{O}} = 3$  моль / моль;  $V_{\text{N}_2}^0 = 3,5 \cdot 3,76 = 13,2$  моль / моль.

Избыток воздуха  $\Delta V_B = 0$ , так как  $\alpha = 1$ .

Низшую теплоту сгорания этана рассчитаем по закону Гесса, взяв значения теплоты образования веществ из табл. II приложения.

$$Q_n = 2\Delta H_{f\text{CO}_2}^\circ + 3\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^\circ - \Delta H_{f\text{C}_2\text{H}_6}^\circ = 2 \cdot 396,6 + 3 \cdot 242,2 - 88,4 = 1431,4 \text{ кДж / моль}.$$

Так как теплотери отсутствуют, то все выделившееся тепло идет на нагревание продуктов горения. Среднее теплосодержание продуктов горения будет составлять

$$H_{\text{ср}} = \frac{Q_n}{\sum V_{\text{пр}i}} = \frac{Q_n}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0} = \frac{1431,4}{2 + 3 + 13,2} = 78,6 \text{ кДж / моль}.$$

Воспользовавшись зависимостью теплосодержания газов от температуры (табл. IV приложения), можно установить, какой температуре соответствует такое теплосодержание. Лучше всего это сделать, ориентируясь на азот, так как его больше всего в продуктах горения. Из табл. IV прило-

жения видно, что при температуре 2300 °С теплосодержание азота 77,8 кДж/моль. Уточним, сколько потребовалось бы тепла, чтобы нагреть продукты горения до такой температуры.

При  $T_1 = 2300$  °С

$$Q_1 = H_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + H_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2}^0,$$

подставляя численные значения теплосодержаний этих газов из табл. IV приложения, получим

$$Q_1 = 126,9 \cdot 2 + 104,2 \cdot 3 + 77,8 \cdot 13,2 = 1593 \text{ кДж/моль.}$$

Но это больше, чем выделилось тепла в результате реакции горения

$$Q_1 > Q_{\text{н}}.$$

Поэтому можно сказать, что температура горения меньше, чем 2300 °С. Определим, сколько тепла потребуется для нагревания продуктов горения до 2200 °С.

При  $T_2 = 2200$  °С

$$Q_2 = 120,8 \cdot 2 + 98,8 \cdot 3 + 74,1 \cdot 13,2 = 1516 \text{ кДж/моль.}$$

Но и  $Q_2 > Q_{\text{н}}$ , значит  $T_{\text{г}} < 2200$  °С.

Сделаем следующий шаг (в этом и состоит суть метода последовательных приближений), выберем  $T_3 = 2100$  °С, при этой температуре

$$Q_3 = 114,7 \cdot 2 + 93,4 \cdot 3 + 70,4 \cdot 13,2 = 1439 \text{ кДж/моль.}$$

Это совсем немного больше, чем  $Q_{\text{н}}$ .

При  $T_4 = 2000$  °С

$$Q_4 = 108,6 \cdot 2 + 88,1 \cdot 3 + 66,8 \cdot 13,2 = 1363 \text{ кДж/моль.}$$

$Q_4$  уже меньше, чем  $Q_{\text{н}}$ , из этого можно сделать вывод, что температура горения имеет значение между 2000 °С и 2100 °С. Уточним эту температуру линейной интерполяцией между двумя этими ближайшими значениями

$$T_{\text{г}}^{\text{ад}} = T_4 + \frac{T_3 - T_4}{Q_3 - Q_4} (Q_{\text{н}} - Q_4) = 2000 + \frac{2100 - 2000}{1439 - 1363} (1431 - 1363) = 2090 \text{ °С} = 2363 \text{ К}$$

Действительную температуру горения рассчитывают с учетом теплопотерь и для любого заданного состава горючей смеси тем же методом последовательных приближений.

Для приближенных расчетов действительной температуры горения можно использовать формулу

$$T_r = T_0 + \frac{Q_n(1-\eta)}{\sum C_{p_{mi}} \cdot V_{mi}}, \quad (18)$$

где  $C_{p_{mi}}$  – среднее значение теплоемкости  $i$ -го продукта горения при постоянном давлении в интервале температур от 273 К до  $T_r$ , которая принята равной 1500 К.

Чем больше полученное значение  $T_r$  отличается от 1500 К, тем большая погрешность вносится в ее определение. Средние значения теплоемкости продуктов горения при постоянном давлении в температурном интервале 273-1500 К приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Удельные теплоемкости продуктов горения

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Удельная теплоемкость, $c_{p_i}$	
			кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	кДж/(моль·К)
1	Азот	N <sub>2</sub>	1,41	3,18·10 <sup>-2</sup>
2	Вода (пар)	H <sub>2</sub> O	1,78	3,98·10 <sup>-2</sup>
3	Воздух	O <sub>2</sub> + 3,76N <sub>2</sub>	1,44	3,23·10 <sup>-2</sup>
4	Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	2,28	5,11·10 <sup>-2</sup>
5	Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	2,27	5,08·10 <sup>-2</sup>
6	Оксид углерода	CO	1,50	3,37 ·10 <sup>-2</sup>

### 2.3.3. Температура 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  $Q_{\text{взр}} \approx Q_n$ . 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  $Q_{\text{взр}} \approx Q_n$ , а изменение энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции происходит лишь в результате изменения внутренней энергии ( $dH = dU + pdV = dU$  при  $dV =$



0), уравнение теплового баланса для взрыва можно записать в следующем виде

$$Q_n = \sum [U_{\text{пр}i}(T_{\text{взр}}) - U_{\text{пр}i}(T_0)] \cdot V_{\text{пр}i} \quad (19)$$

где  $U_{\text{пр}i}(T_{\text{взр}})$  и  $U_{\text{пр}i}(T_0)$  – значения внутренней энергии  $i$ -го продукта взрыва (горения) при температуре взрыва и начальной температуре.

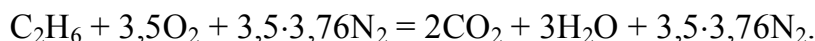
Если для удобства расчетов принять, что внутренняя энергия газов при  $T = 273 \text{ K}$  равна нулю, то полная внутренняя энергия продуктов взрыва при температуре взрыва будет равна количеству теплоты, выделившейся в результате химической реакции

$$Q_n = \sum U_{\text{пр}i}(T_{\text{взр}}) \cdot V_{\text{пр}i} \quad (20)$$

Температуру взрыва находят методом последовательных приближений так же как адиабатическую температуру горения (пример 5). Только при расчетах вместо зависимости теплосодержания от температуры используют зависимость внутренней энергии от температуры (табл. V приложения).

**Пример 6.** Определить температуру взрыва газовой стехиометрической смеси этана с воздухом. Начальная температура горючей смеси  $T_0 = 273 \text{ K}$ .

**Решение.** Рекомендуются сравнить с решением примера 5. Температуру взрыва находят при условии отсутствия теплотерь ( $\eta = 0$ ). Запишем уравнение химического превращения при взрыве (аналогично уравнению горения)



Объем продуктов взрыва составляет  $V_{\text{CO}_2} = 2$  моль/моль;  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 3$  моль/моль;  $V_{\text{N}_2}^0 = 3,5 \cdot 3,76 = 13,2$  моль/моль. Избыток воздуха  $\Delta V_{\text{в}} = 0$ , так как смесь стехиометрическая ( $\alpha = 1$ ).

Низшую теплоту сгорания этана рассчитываем по закону Гесса, взяв значение теплот образования веществ из табл. II приложения.

$$\begin{aligned} Q_n &= 2\Delta H_{f\text{CO}_2}^0 + 3\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{f\text{C}_2\text{H}_6}^0 = 2 \cdot 396,6 + 3 \cdot 242,2 - 88,4 = \\ &= 1431 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

Так как процесс взрыва адиабатно-изохорный (теплотери отсутствуют и нагревание продуктов происходит без расширения газовой смеси), все выделившееся тепло расходуется на увеличение внутренней энергии системы. Среднее значение внутренней энергии продуктов взрыва составит

$$U_{\text{ср}} = \frac{Q_n}{\sum V_{\text{пр}i}} = \frac{Q_n}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0} = \frac{1431}{2 + 3 + 13,2} = 78,6 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Воспользовавшись зависимостью внутренней энергии газов от температуры (табл. V приложения), можно установить, какой температуре соответствует такое значение внутренней энергии. Сделаем это по азоту, так как его больше всего в продуктах взрыва. Из табл. V приложения следует, что при температуре 2900 К внутренняя энергия 1 моля азота составляет 76,4 кДж/моль. Проверим расчетом, какое количество тепла требуется для того, чтобы продукты взрыва нагреть до этой температуры.

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

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

подставляя численные значения внутренней энергии для этих газов из таблицы V приложения, получим

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

Это значительно больше той энергии  $Q_{\text{н}}$ , которая выделилась при взрыве. Поэтому выберем следующее более низкое значение температуры  $T_2 = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$  и определим, какое количество тепла при этой температуре будут содержать продукты взрыва.

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

Это тоже больше, чем количество тепла, выделившегося при взрыве ( $Q_2 > Q_{\text{н}}$ ), и означает, что температура взрыва ниже этого значения. Рассчитаем, какое количество тепла содержат продукты взрыва при температуре  $T_3 = 2600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

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

Это значение уже меньше, чем  $Q_{\text{н}}$ , на этом основании можно сделать вывод, что температура взрыва этановоздушной смеси находится между значениями  $T_3 = 2600 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Уточним значение температуры взрыва методом линейной интерполяции

$$T_{\text{взр}} = T_3 + \frac{T_2 - T_3}{Q_2 - Q_3} (Q_{\text{н}} - Q_3) = 2600 + \frac{2700 - 2600}{1491 - 1430} (1431 - 1430) =$$

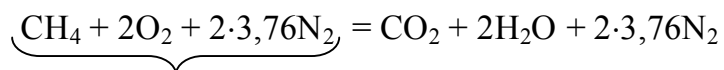
$$= 2602 \text{ }^\circ\text{C} = 2875 \text{ K.}$$

Если сравнить полученное значение температуры взрыва с адиабатической температурой горения (см. ответ в примере 5), можно прийти к выводу, что температура взрыва примерно на 500 К выше адиабатической температуры горения. Таким образом, химическое превращение, протекающее в форме взрыва (изохорно-адиабатический процесс), происходит со значительно большим разогревом.

## 2.4. Газовоздушные горючие смеси

### 2.4.1. Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) и стехиометрическая концентрация

Газовая смесь горючего с окислителем способна воспламениться и распространять пламя только при определенных концентрациях горючего. Минимальная концентрация горючего, при которой смесь способна воспламениться 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 негорючи. Например, для метана  $\text{CH}_4$  концентрационные пределы распространения пламени составляют НКПР – 5 об. %, а ВКПР – 15 об. % (см. табл. X приложения), для аммиака  $\text{NH}_3$  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 пожаровзрывоопасны. Концентрацию горючего в стехиометрической смеси рассчитывают по уравнению материального баланса процесса горения. Например, из уравнения горения видно, что стехиометрическая смесь метана с воздухом



стехиометрическая смесь

содержит 1 моль метана, 2 моля кислорода и  $2 \cdot 3,76$  молей азота. Концентрация горючего в такой смеси

$$\varphi_{\text{стех}} = \frac{n_{\text{CH}_4} \cdot 100}{n_{\text{CH}_4} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 2 + 2 \cdot 3,76} = 9,5 \%. \quad (21)$$

Для некоторых газов стехиометрические концентрации приведены в табл. X приложения. Значения концентрационных пределов распространения пламени, приведенные в справочной литературе, установлены экспериментально. В настоящем пособии для некоторых веществ они приведены в табл. X и XI приложения. Для большинства веществ их можно приближенно рассчитать.

## 2.4.2. Расчет КПР по аппроксимационной формуле

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

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{an + b}, \quad (22)$$

где  $n$  – число молей кислорода, необходимое для полного сгорания одного моля горючего вещества, находят из уравнения реакции горения (стехиометрический коэффициент при кислороде);  $a$  и  $b$  – константы, имеющие определенные значения для нижнего и верхнего пределов в зависимости от значения  $n$ , приведены в табл. 2.

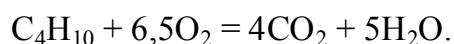
Таблица 2

Величины  $a$  и  $b$  для расчета КПР

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

**Пример 7.** Рассчитать КПР бутана в воздухе. Расчет провести по аппроксимационной формуле.

Решение. Для расчета необходимо знать число молей кислорода, необходимое для полного сгорания 1 моля бутана. Запишем уравнение горения бутана



Из уравнения видно, что  $n = 6,5$ .

Рассчитываем нижний концентрационный предел распространения пламени по аппроксимационной формуле, воспользовавшись значениями  $a$  и  $b$  из табл. 3,

$$\varphi_{н} = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 6,5 + 4,679} = 1,64 \%$$

Аналогично находим верхний концентрационный предел, учитывая, что  $n < 7,5$  (табл. 3).

$$\varphi_{в} = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{1,550 \cdot 6,5 + 0,560} = 9,4 \%$$

Экспериментальные значения КПР, приводимые в справочной литературе, составляют 1,86 и 8,41 %. Сравнивая их с расчетными, убеждаемся,

что для бутана расхождение расчетных и экспериментальных данных не-  
большое.

### 2.4.3. Зависимость 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.

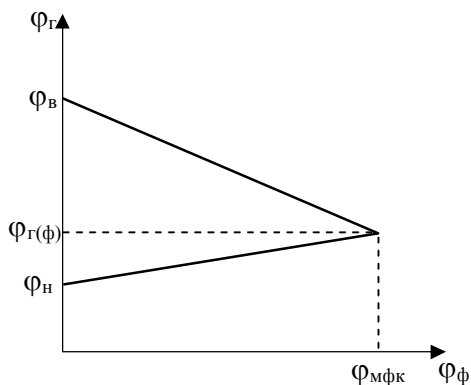


Рис. 1. Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора в газовой смеси

Чаще всего в качестве флегматизаторов используют нейтральные газы (нерагающие в пламени), такие, как углекислый газ  $\text{CO}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ . 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 флегматизатора, при которой происходит смыкание нижнего и верхнего концентрационных пределов, называется **минимальной флегматизирующей концентрацией (МФК)**. По сути, это минимальное количество флегматизатора, которое необходимо ввести в газоздушную смесь стехиометрического состава, чтобы сделать ее негорючей. Речь идет о стехиометрической смеси, так как она наиболее пожаровзрывоопасна.

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 уравнению (18), которое для этого случая запишется так

$$T_z = T_0 + \frac{Q_n}{\sum Cp_i V_{ngi} + Cp_\phi V_\phi}, \quad (23)$$

где  $Cp_\phi$  – среднее значение теплоемкости флегматизатора при постоянном давлении для температурного интервала 273-1500 К,  $V_\phi$  – количество флегматизатора в исходной горючей смеси. Тогда из (23) получим

$$V_\phi = \frac{Q_n - (T_r - T_0) \sum Cp_{nri} V_{nri}}{(T_r - T_0) Cp_\phi}. \quad (24)$$

Если в уравнение (24) подставить значение  $T_r = 1500$  К, то получим количество флегматизатора в исходной горючей смеси, при котором достигается эта предельная температура горения.

$$V_{\text{МФК}} = \frac{Q_n - (1500 - T_0) \sum Cp_{nri} V_{nri}}{(1500 - T_0) Cp_\phi}, \quad (25)$$

где  $T_0 = 273$  К.

А минимальная флегматизирующая концентрация в % об. составит:

$$\varphi_{\text{МФК}} = \frac{V_\phi 100}{V_r + V_{O_2} + V_{N_2} + V_\phi} \quad \text{или} \quad \varphi_{\text{МФК}} = \frac{n_\phi 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_\phi} \quad (26)$$

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

Концентрацию горючего в смеси, соответствующей точке флегматизации, в % об.

$$\varphi_{r(\phi)} = \frac{V_r 100}{V_r + V_{O_2} + V_{N_2} + V_\phi} \quad \text{или} \quad \varphi_{r(\phi)} = \frac{n_r 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_\phi}. \quad (27)$$

Концентрацию кислорода в этой же смеси (в точке флегматизации) называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (МВСК), она будет равна

$$\varphi_{O_2(\phi)} = \frac{V_{O_2} 100}{V_r + V_{O_2} + V_{N_2} + V_\phi} \quad \text{или} \quad \varphi_{O_2(\phi)} = \frac{n_{O_2} 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_\phi}. \quad (28)$$

*Примечание.* Значения МВСК, полученные экспериментально для некоторых газозоудушных смесей при разбавлении их  $CO_2$ , приведены в табл. X приложения.

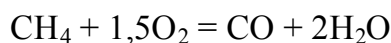
**Пример 8.** Рассчитать значение МФК и МВСК при разбавлении метановоздушной смеси водяным паром. Построить зависимость КПР от концентрации флегматизатора.

Решение. МФК найдем из условия предельной адиабатической температуры горения стехиометрической метановоздушной смеси, формула (24), где  $T_r = 1500$  К:

$$V_{\phi} = \frac{Q_H - (T_r - T_0) \sum c_{p_i} V_{\text{пр}i}}{(T_r - T_0) c_{p_{\phi}}}$$

Поскольку при этих условиях сгорание идет в основном с образованием СО, определим низшую теплоту сгорания метана для такого случая.

Запишем химическое уравнение горения метана



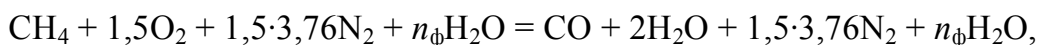
Низшая теплота сгорания метана в этом случае по закону Гесса

$$Q_H = \Delta H_{\text{fCO}}^0 + 2 \cdot \Delta H_{\text{fH}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{\text{fCH}_4}^0$$

Подставляя значения теплот образования, взятых из табл. II приложения, получим

$$Q_H = 112,7 + 2 \cdot 242,2 - 75 = 522,1 \text{ кДж/моль.}$$

Теперь составим уравнение материального баланса процесса горения метана, включив в него и флегматизатор ( $\text{H}_2\text{O}$ )



где  $n_{\phi}$  – число молей флегматизатора.

Уравнение (24) для данного случая примет вид:

$$V_{\phi} = \frac{Q_H - (T_r - T_0) [Cp_{\text{CO}} \cdot V_{\text{CO}} + Cp_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + Cp_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^0]}{(T_r - T_0) Cp_{\text{H}_2\text{O}}}$$

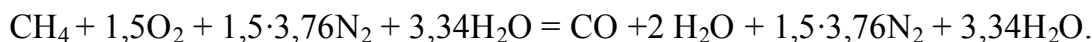
Из правой части уравнения материального баланса видно, что объем продуктов горения

$$V_{\text{CO}} = 1 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}; \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}; \quad V_{\text{N}_2}^0 = 1,5 \cdot 3,76 = 5,64 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}$$

Подставляя значения  $Q_{н}$ ,  $T_{г} = 1500 \text{ К}$ ,  $Cp_{пгi}$  взятые из табл. 1 на стр. 16, получим, что объем флегматизатора, соответствующий МФК

$$V_{\phi} = \frac{522,1 - (1500 - 273)[3,37 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 3,98 \cdot 10^{-2} \cdot 2 + 3,18 \cdot 10^{-2} \cdot 5,64]}{(1500 - 273) \cdot 3,98 \cdot 10^{-2}} = 3,34 \text{ моль/моль.}$$

Перепишем уравнение материального баланса для сгорания смеси предельного состава



В исходной горючей смеси (левая часть уравнения) на 1 моль метана приходится  $n_{\text{O}_2} = 1,5$  моль кислорода,  $n_{\text{N}_2} = 1,5 \cdot 3,76$  моль азота и  $n_{\phi(\text{H}_2\text{O})} = 3,34$  моль флегматизатора.

Минимальная флегматизирующая концентрация паров воды будет равна

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{n_{\phi} 100}{n_{г} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} = \frac{3,34 \cdot 100}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 29,1 \%,$$

а концентрация горючего в точке флегматизации

$$\varphi_{г(\phi)} = \frac{n_{г} 100}{n_{г} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 8,7 \%.$$

Концентрационные пределы распространения пламени для метана в воздухе составляют 5 и 15 % (об.). Этих данных достаточно для построения зависимости КПР от концентрации флегматизатора (рис. 2).

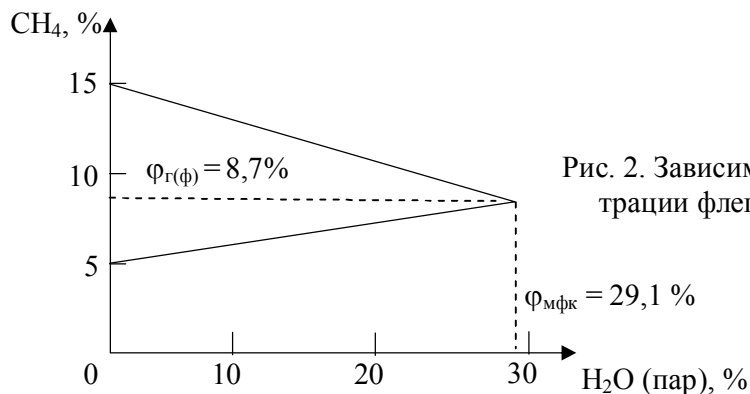


Рис. 2. Зависимость КПР метана от концентрации флегматизатора (водяной пар)

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (концентрация кислорода в точке флегматизации)



$$\varphi_{O_2\phi} = \frac{n_{O_2} 100}{n_r + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} = \frac{1,5}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 13,0 \text{ \%}.$$

## 2.5. Температурные параметры пожарной опасности

### 2.5.1. Температурные пределы распространения пламени (ТПР)

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 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.

Допустим, известен НКПР пламени паров горючей жидкости. Необходимо найти НТПР, т. е. температуру, при которой концентрация насыщенных паров над поверхностью этой жидкости будет равна НКПР. По концентрации паров  $\varphi_n$  (значение НКПР) можно найти парциальное давление насыщенных паров

$$P_n = \frac{\varphi_n P_0}{100}, \quad (29)$$

где  $P_0$  – атмосферное давление (общее давление паровоздушной смеси).

По давлению насыщенного пара нетрудно установить соответствующую температуру жидкости, которая и будет значением НТПР. Зависимость давления насыщенного пара от температуры для большинства жидкостей известна и приведена в справочной литературе в виде таблиц, графиков или задана уравнением Антуана  $\lg P = f(T)$  (табл. III приложения).

**Пример 9.** Определить значение НТПР метилового спирта по нижнему концентрационному пределу распространения пламени. Принять, что атмосферное давление равно нормальному ( $P_0 = 101,3$  кПа).

Решение. 1. По справочнику или расчетом находим, что НКПР метилового спирта равен 6 % об. Затем определяем, какому давлению насыщенного пара соответствует значение нижнего концентрационного предела:

$$P_n = \frac{\varphi_n P_0}{100} = \frac{6 \cdot 101,3}{100} = 6,08 \text{ кПа}.$$

2. Для нахождения значения НТПР ( $T_H$ ) по известной величине  $P_H$  можно, воспользоваться уравнением Антуана, выражающим зависимость давления насыщенного пара от температуры жидкости.

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t}, \quad (30)$$

где  $P$  выражено в кПа, а  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$ .

Константы уравнения Антуана приведены в табл. III приложения.

Решая уравнение относительно  $t$ , получим

$$t = \frac{B}{A - \lg P} - C \quad (31)$$

Для метилового спирта  $A = 7,3527$ ,  $B = 1660,454$ ,  $C = 245,818$ . Подставляя численные значения в уравнение (31), получим:

$$t_H = \frac{1660,454}{7,3527 - \lg 6,08} - 245,818 = 7^{\circ}\text{C} \text{ или } 280 \text{ K.}$$

В табл. XI приложения приведены показатели пожарной опасности некоторых жидкостей, из которой видно, что для метанола справочное значение НТПР составляет 280 К.

## 2.5.2. Температура самовоспламенения

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

Метод пригоден для расчета  $T_{\text{св}}$  алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов.

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

*Углеродная цепь* – это цепочка атомов углерода от одного конца молекулы до другого.

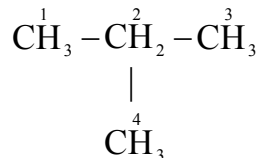
*Длина цепи* – это число атомов углерода в такой цепи.

Например, в нормальном гептane



одна углеродная цепь и ее длина равна 7.

В изобутане



три цепи с одинаковой длиной (1–2–3, 1–2–4 и 3–2–4), длина каждой цепи равна 3. Средняя длина углеродных цепей в этом соединении тоже равна 3.

Определив среднюю длину цепи, далее по табл. VII–IX приложения находят  $T_{\text{св}}$ .

Например, для *n*-гептана  $T_{\text{св}} = 496$  К, а для изобутана  $T_{\text{св}} = 743$  К (табл. VII приложения для предельных углеводородов).

В молекуле химического соединения со сложной структурой бывает трудно сразу найти все углеродные цепи. Поэтому для определения числа цепей используют формулу:

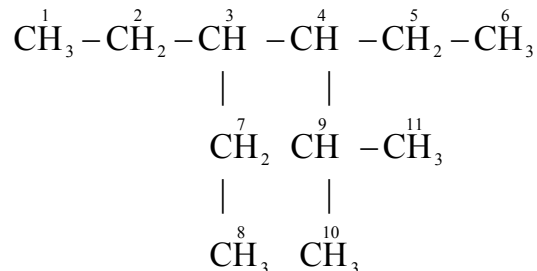
$$m = \frac{M_p (M_p - 1)}{2}, \quad (32)$$

где  $M_p$  – число концевых функциональных групп, таких как: метил ( $-\text{CH}_3$ ), гидроксил ( $-\text{OH}$ ) и фенил ( $-\text{C}_6\text{H}_5$ ).

Например, в *n*-гептане две группы  $\text{CH}_3$ , т. е.  $M_p = 2$ , из формулы (32) следует, что число цепей равно 1. В изобутане  $M_p = 3$ , подставляя это значение в формулу (32), получим  $m = 3$ .

**Пример 10.** Вычислить температуру самовоспламенения 3-этил-4-изо-пропилгексана

Решение. 1. Записываем структурную формулу соединения, нумеруем все атомы углерода:



2. В молекуле соединения пять концевых метильных групп  $\text{CH}_3$ , т. е.  $M_p = 5$ . Определяем число цепей:

$$m = \frac{M_p(M_p - 1)}{2} = \frac{5(5 - 1)}{2} = 10.$$

3. Найдем эти цепи и установим их длину. Для удобства составим следующую таблицу

Углеродная цепь $m_i$	1-6	1-8	1-10	1-11	6-8	6-10	6-11	8-10	8-11	10-11
Длина цепи $\ell_i$	6	5	6	6	6	5	5	6	6	3

4. Определим среднее арифметическое значение длины углеродных цепей

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{6 \cdot 6 + 5 \cdot 3 + 3}{10} = 5,4.$$

5. По табл. VII приложения находим температуру самовоспламенения 3-этил-4-изопропилгексана по значению средней длины цепи в молекуле соединения:

$$T_{\text{св}} = 522 \text{ К} = 249 \text{ }^\circ\text{С}.$$

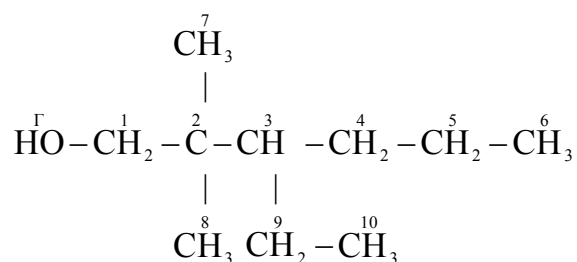
### Особенности расчета $T_{\text{св}}$ алифатических спиртов

При определении длины углеродных цепей в молекуле алифатического спирта необходимо учитывать следующее правило. Гидроксильная группа в углеродной цепи увеличивает ее длину на единицу.

**Пример 11.** Вычислить температуру самовоспламенения 2,2-диметил-3-этилгексанола-1.

Решение.

1. Запишем структурную формулу соединения и пронумеруем все атомы углерода, группу -ОН обозначим буквой Г (гидроксил)



2. В молекуле пять концевых групп: четыре метильных (-CH<sub>3</sub>) и одна гидроксильная (-ОН), т. е.  $M_p = 5$ . Тогда число цепей

$$M = \frac{M_p(M_p - 1)}{2} = \frac{5 \cdot (5 - 1)}{2} = 10.$$

3. Составим таблицу, в которую внесем цепи и их длину.

Углеродная цепь $m_i$	Г-6	Г-7	Г-8	Г-10	7-6	7-8	7-10	6-8	6-10	8-10
Длина цепи $\ell_i$	7	4	4	6	6	3	5	6	6	5

Длина первых четырех цепей, содержащих гидроксильную группу -ОН на единицу больше, чем число атомов углерода в цепи.

4. Рассчитываем среднюю длину углеродных цепей

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{7 + 6 \cdot 4 + 5 \cdot 2 + 4 \cdot 2 + 3}{10} = 5,2.$$

5. По табл. VIII прил. находим соответствующую температуру самовоспламенения  $T_0 = 582 \text{ K} = 309 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Особенности расчета $T_{\text{св}}$ ароматических соединений

При определении числа цепей и их длины в молекуле ароматического соединения следует иметь в виду следующие правила:

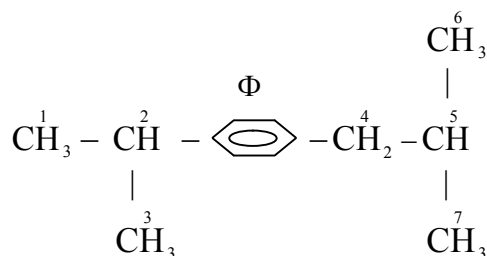
1. Фенил (бензольное кольцо), находящийся внутри углеродной цепи, считается и как концевой.

2. При определении углеродной цепи атомы углерода в бензольном кольце в расчет не принимаются.

3. Фенил, находящийся в углеродной цепи, укорачивает ее на единицу.

**Пример 12.** Вычислить температуру самовоспламенения 1-изопропил-4-изобутилбензола.

Решение. 1. Записываем структурную формулу соединения и вводим обозначения:



2. В молекуле соединения четыре концевые метильные группы -CH<sub>3</sub> и одна - фенил, т. е.  $M_p = 5$ :

$$m = \frac{M_p (M_p - 1)}{2} = \frac{5 \cdot (5 - 1)}{2} = 10.$$

3. В этом соединении согласно первому правилу концевым необходимо считать и фенил. В этом случае углеродные цепи будут заканчиваться не только на метильных группах  $-\text{CH}_3$ , но и на бензольном кольце. Составим таблицу, в которую внесем углеродные цепи и их длину.

Углеродная цепь $m_i$	1-6	1-7	3-6	3-7	1-Ф	3-Ф	6-Ф	7-Ф	1-3	6-7
Длина цепи $\ell_i$	4	4	4	4	1	1	2	2	3	3

Обратите внимание, что при определении длины цепи атомы углерода, имеющиеся в бензольном кольце, в расчет не принимаются (правило 2). У восьми углеродных цепей, которые имеют в своем составе фенил как в середине, так и в конце цепи, длина цепи на единицу меньше, чем число атомов углерода (правило 3).

4. Рассчитаем среднюю длину углеродных цепей

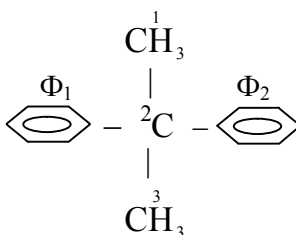
$$\ell_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 2}{10} = 2,8.$$

5. По табл. IX приложения найдем  $T_{\text{св}}$  ароматического соединения с соответствующей длиной цепи  $T_{\text{св}} = 698 \text{ K} = 425 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Пример 13.** Вычислить температуру самовоспламенения 2,2-дифенил-пропана.

Решение.

1. Записываем структурную формулу соединения и вводим обозначения



2. Определим число цепей. В соединении четыре концевых группы (две метильные и две фенила), поэтому  $M_p = 4$ :

$$m = \frac{M_p(M_p - 1)}{2} = \frac{4(4 - 1)}{2} = 6.$$

В этом соединении шесть цепей.

3. Найдем эти цепи и определим их длину

Углеродная цепь $m_i$	$\Phi_1-\Phi_2$	$\Phi_1-1$	$\Phi_1-3$	$\Phi_2-1$	$\Phi_2-3$	1-3
Длина цепи $\ell_i$	-1	1	1	1	1	3

Цепи, содержащие фенил, укорачиваются на единицу. Так как в цепи  $\Phi_1-\Phi_2$  содержится два фенила, то ее длина уменьшится на два.

4. Средняя длина цепи будет равна

$$\ell_{\text{ср}} = \frac{-1 + 1 \cdot 4 + 3}{6} = 1,0.$$

5. По табл. IX приложения находим, что  $T_{\text{св}} = 712 \text{ К} = 439 \text{ }^\circ\text{С}$ .

## 2.6. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей

К показателям взрывоопасности веществ относятся такие параметры, как максимальное давление взрыва, тротилловый эквивалент вещества и тротилловый эквивалент взрыва или мощность взрыва.

### 2.6.1. Максимальное давление взрыва

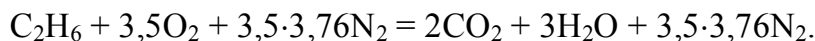
*Максимальное давление взрыва* – это давление, которое возникает в результате сгорания или детонации парогазовых смесей в изохорно-адиабатических условиях. При сгорании парогазовой смеси в замкнутом объеме изменение давления в системе вызвано повышением температуры и изменением числа молей газа, которое происходит в результате химического превращения. Исходя из этого, максимальное давление взрыва парогазовых смесей рассчитывают по формуле

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = P_0 \frac{T_{\text{взр}} n_{\text{пр}}}{T_0 n_c}, \quad (33)$$

где  $P_0$ ,  $T_0$  и  $n_c$  – давление, температура и количество молей горючей смеси до взрыва;  $T_{\text{взр}}$  и  $n_{\text{пр}}$  – температура взрыва и количество молей продуктов горения.

**Пример 14.** Рассчитать максимальное 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  $n_c$  и после взрыва  $n_{\text{пр}}$

$$n_c = n_r + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 1 + 3,5 + 3,5 \cdot 3,76 = 17,7 \text{ моль};$$

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} = 2 + 3 + 3,5 \cdot 3,76 = 18,2 \text{ моль}.$$

Температуру взрыва можно определить методом последовательных приближений (пример 6, п. 2.3.3). Воспользуемся расчетами, проведенными в примере 6, где было получено значение температуры взрыва для стехиометрической этановоздушной смеси  $T_{\text{взр}} = 2875 \text{ К}$ . Подставляя значения величин в формулу (33), получим

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = 101,3 \cdot \frac{2875 \cdot 18,2}{273 \cdot 17,7} = 1096,9 \text{ кПа}.$$

Избыточное давление взрыва

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

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

### 2.6.2. Мощность взрыва и безопасное расстояние по действию воздушных ударных волн

Для оценки мощности взрыва используется понятие тротилового эквивалента. Известно, что при взрыве 1 кг тротила (тринитротолуола - ТНТ) выделяется энергия, равная  $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$ . Исходя из этого, мощность любого взрыва можно условно характеризовать количеством тротила, которое может произвести во взрыве выделение такого же количества энергии.

Количество тротила или тротильный эквивалент взрыва будет равен

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (34)$$

где  $Q_{\text{взр}}$  – количество теплоты (энергии), выделяющейся при взрыве в кДж/кг;  $m$  – масса горючего вещества, участвующего во взрыве;  $\gamma$  – доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию взрыва.

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

Учитывая, что  $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$ , уравнение (45) можно записать в виде



$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (35)$$

Величину

$$\eta_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (36)$$

называют тротиловым эквивалентом вещества.

Размер безопасной зоны по действию давления ударной воздушной волны взрыва  $R_{\text{без}}$ , м, рассчитывают по формуле

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}} \quad (37)$$

**Пример 15.** Определить тротиловый эквивалент взрыва паровоздушного облака, образовавшегося при аварийном разливе и испарении 500 кг ацетона. Оценить безопасное расстояние по действию ударной воздушной волны.

**Решение.** Для определения тротилового эквивалента взрыва паровоздушного облака необходимо знать  $Q_{\text{н}}$  ацетона. Величину  $Q_{\text{н}}$  можно рассчитать по закону Гесса (пример 5, п. 2.3.2) или взять из табл. XI приложения. Согласно справочным данным для ацетона  $Q_{\text{н}} = 1668$  кДж/моль. Учитывая, что масса 1 моля ацетона равна  $58 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,

$$Q_{\text{н}} = \frac{1668}{58 \cdot 10^{-3}} = 28,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию при взрыве облака парогазовой смеси принимается равной  $\gamma = 0,4$ . Энергия взрыва 1 кг тротила  $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3$  кДж/кг.

Подставляя эти величины в формулу (35), получим

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{28,8 \cdot 10^3 \cdot 500 \cdot 0,4}{4,19 \cdot 10^3} = 1375 \text{ кг тротила.}$$

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 согласно (36) будет равно

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{1375} \approx 170 \text{ м.}$$

### **3. ВЫБОР ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ И ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Номер варианта задания выбирается по последним двум цифрам номера зачетной книжки. Для цифр от 01 до 50 номер варианта соответствует номеру зачетной книжки. Если последние две цифры составляют число больше 50 (от 51 до 00), то для нахождения номера варианта задания из этого числа необходимо вычесть 50. Например, две последние цифры номера зачетной книжки 67, в этом случае номер варианта задания будет  $(67 - 50) = 17$ .

Курсовую работу необходимо выполнить в отдельной тетради или на листах формата А4. На титульном листе в обязательном порядке должны быть указаны наименование работы, ф.и.о слушателя, выполнившего ее, номер зачетной книжки и номер выбранного варианта задания. **Работы, в которых не указан номер зачетной книжки преподавателями проверяться не будут, так как они не могут быть зачтены.**

По ходу выполнения курсовой работы необходимо давать подробные пояснения к проводимым расчетам. Расчетные формулы необходимо записывать в общем виде, а затем подставлять в них численные значения величин. При использовании справочных и табличных значений необходимо указывать в тексте работы, откуда взята та или иная величина.

## 4. ЗАДАНИЕ ПО КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Курсовая работа состоит из трех частей.

### **Часть 1. Расчет параметров горения и взрыва.**

Для вещества  $A$  (выбрать в табл. 3 в соответствии с номером варианта задания) рассчитать следующие параметры горения и взрыва:

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

### **Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными**

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

### **Часть 3. Определение параметров взрыва паровоздушной смеси в помещении**

Для помещений заданных размеров  $a \times b \times h$  (выбрать в табл. 3 в соответствии с номером варианта задания) определить:

- какое количество вещества  $A$  (кг) должно испариться в этом помещении, чтобы в нем создалась наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь,
- тротиловый эквивалент взрыва этой паровоздушной смеси,
- безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны взрыва,
- минимальное количество диоксида углерода (кг), которое потребуется для предотвращения взрыва в этом помещении.

При расчетах принять, что пары вещества равномерно распределены по помещению и помещение относительно герметично. Давление и температуру в помещении считать нормальными.

Таблица 3

## Варианты заданий по курсовой работе

Номер варианта	Вещество	Химическая формула	Размеры помещения $a \times b \times h$ , м
01	амилбензол	$C_{11}H_{16}$	4,0×3,5×3,0
02	трет-амиловый спирт (2-метил-2-бутанол)	$C_5H_{12}O$	5,0×4,0×2,5
03	трет-бутилбензол (2-метил-2-фенилпропан)	$C_{10}H_{14}$	4,5×4,0×3,0
04	2,2-диметилбутан	$C_6H_{14}$	5,5×4,0×3,0
05	2,4-диметилгексан	$C_8H_{18}$	6,0×4,5×3,0
06	3,3-диметилгептан	$C_9H_{20}$	7,0×5,0×3,5
07	2,6-диметил-4-гептанол	$C_9H_{20}O$	6,5×4,0×3,0
08	4,5-диметилоктан	$C_{10}H_{22}$	7,5×5,0×4,0
09	2,2-диметилпентан	$C_7H_{16}$	8,0×5,5×4,0
10	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	8,5×5,0×4,0
11	2,4-диметил-3-этилпентан	$C_9H_{20}$	7,5×4,0×4,0
12	1,4-диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	8,0×5,0×3,5
13	3,5-диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	9,0×5,5×4,0
14	втор-изоамиловый спирт (3-метил-2-бутанол)	$C_5H_{12}O$	9,5×5,0×4,0
15	изобутиловый спирт (2-метил-1-пропанол)	$C_4H_{10}O$	6,5×6,0×4,0
16	изогексиловый спирт (4-метил-1-пентанол)	$C_6H_{14}O$	10,0×6,0×3,5
17	4-изопропилгептан	$C_{10}H_{22}$	9,5×6,0×4,0
18	п-ксилол (1,4-диметилбензол)	$C_8H_{10}$	10,0×4,5×3,0
19	2-метил-1-бутанол	$C_5H_{12}O$	6,0×5,0×2,5
20	3-метилгексан (изогептан)	$C_7H_{16}$	8,5×4,0×3,0
21	2-метилгептан (изооктан)	$C_8H_{18}$	9,0×6,0×5,5
22	4-метилоктан	$C_9H_{20}$	6,53,0×3,0
23	3-метилпентан (2-этильуган)	$C_6H_{14}$	8,0×6,0×4,5
24	4-метил-2-пентанол (метиламиловый спирт)	$C_6H_{14}O$	10,5×6,0×5,0
25	3-метил-4-этилгексан	$C_9H_{20}$	6,0×4,5×3,0
26	2-метил-3-этилпентан	$C_8H_{18}$	8,0×5,0×4,0
27	4-метил-2-этилпентанол (2-этилизогексанол)	$C_8H_{18}O$	7,0×4,0×3,0

Номер варианта	Вещество	Химическая формула	Размеры помещения <i>a×b×h, м</i>
28	пентаметилбензол	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	6,0×4,0×3,0
29	пропилбензол (фенилпропан)	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	9,0×5,0×4,0
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	10,0×5,0×4,0
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	10,5×5,0×4,0
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	7,0×5,0×4,0
33	1,2,3-триметилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	5,0×4,0×3,0
34	2,2,3-триметилбутан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	8,0×4,0×3,5
35	3,3,4-триметилгексан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	4,0×4,5×3,0
36	2,5,5-триметилгептан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	6,0×3,5×3,0
37	2,2,3-триметилпентан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	4,5×5,0×4,0
38	этилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	5,5×5,0×3,0
39	3-этилоктан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	7,5×5,0×4,0
40	метаэтилтолуол (1-метил-3-этилбензол)	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	6,0×6,0×4,5
41	3,3-диэтилпентан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	5,5×4,0×3,0
42	втор-октиловый спирт	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	6,0×4,5×3,0
43	изобутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	7,0×5,0×3,5
44	изобутилбензол	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	6,5×4,0×3,0
45	изогексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	7,5×5,0×4,0
46	кумол (изопропилбензол)	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	8,0×5,5×4,0
47	цимол (1-изопропил-4-метилбензол)	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	8,5×5,0×4,0
48	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	7,5×4,0×4,0
49	2-метилнонан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	8,0×5,0×3,5
50	3-пентанол	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	9,0×5,5×4,0

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ РАСЧЕТОВ В КУРСОВОЙ РАБОТЕ

### Часть 1. Расчет параметров горения и взрыва

1.1. Для определения адиабатической температуры горения необходимо знать объем продуктов горения и количество теплоты, выделившееся при сгорании вещества. Объем продуктов горения находят из уравнения материального баланса (см. раздел 2.2.1 и 2.2.2), а теплоту сгорания вещества  $Q_H$  по закону Гесса (раздел 2.3.1). Расчет адиабатической температуры горения ( $T_r^{ад}$ ) проводят методом последовательных приближений, используя зависимость теплосодержания продуктов горения от температуры (см. раздел 2.3.2 и пример 5).

1.2. Температуру взрыва находят тем же методом последовательных приближений, только в этом случае используют зависимость внутренней энергии продуктов горения (взрыва) от температуры (см. раздел 2.3.3 и пример 6).

1.3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени (КПР) рекомендуется провести по аппроксимационной формуле 22 (см. раздел 2.4.2. и пример 7).

1.4. Для расчета минимальной флегматизирующей концентрации (МФК) азота в паровоздушной смеси используют уравнение теплового баланса и понятие предельной адиабатической температуры горения (см. раздел 2.4.3 и пример 8).

1.5. Концентрацию горючего в точке флегматизации находят по формуле 27 (см. там же, раздел 2.4.3. и пример 8).

1.6. По полученным расчетным значениям КПР, МФК и концентрации горючего в точке флегматизации строят графическую зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора (см. там же, раздел 2.4.3 и пример 8).

1.7. Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) рассчитывают по формуле 28 (раздел 2.4.3 и пример 8).

1.8. Температурные пределы распространения пламени (ТПР) определяют по расчетным значениям концентрационных пределов. Для установления зависимости давления паров жидкости от температуры необходимо использовать уравнение Антуана (см. раздел 2.5.1 и пример 9). Значения констант в уравнении Антуана приведены в табл. III приложения настоящих методических указаний. Обратите внимание, что в этой таблице коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  приведены для случая, когда давление ( $P$ ) выражено в кПа, а температура ( $t$ ) в °С.

1.9. Температуру самовоспламенения веществ ( $T_{св}$ ) определяют по средней длине углеродной цепи (см. раздел 2.5,2 и примеры 10-13). Структурные формулы веществ приводятся в табл. VI приложения.

1.10. Максимальное давление взрыва ( $P_{взр}^{max}$ ) рассчитывают по формуле (33) (см. раздел 2.6.1 и пример 14), в которой используют полученное ранее значение температуры взрыва.

1.11. Тропиловый эквивалент вещества ( $\eta_{ТНТ}$ ) определяют по формуле 36 (см. раздел 2.6.2).

## Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

2.1. Все рассчитанные параметры горения и взрыва вещества  $A$  заносят в табл. 4.

Таблица 4

**Расчетные значения параметров горения и взрыва вещества  $A$**

Параметр горения и взрыва	Адиабат. тем-ра горения, $T_{ад}$	Тем-ра зрыва, $T_{взр}$	КПР	МФК ( $N_2$ )	МВСК	ТПР	Тем-ра само-воспл., $T_{св}$	Макс. авление взрыва, $P_{max}$	Тропил эквивалент вещества, $\eta_{ТНТ}$
Значение параметра									

В справочной литературе или в Интернете для вещества  $A$  находят известные показатели пожарной опасности вещества и также составляют таблицу справочных значений. Причем здесь необходимо указать, из каких источников взяты эти величины.

Таблица 5

**Справочные значения показателей пожарной опасности вещества  $A$**

Показатель пожарной опасности							
Значение показателя							

2.2. На основании анализа параметров горения и взрыва вещества  $A$  и сравнения расчетных и экспериментальных значений делают вывод о пожарной опасности вещества и погрешности расчетных методик.

### Часть 3. Определение параметров взрыва паровоздушной смеси в помещении

3.1. Количество вещества  $A$  (в кг), которое должно испариться в помещении размерами  $a \times b \times h$  чтобы в тем создалась наиболее взрывоопасная паровоздушная смесь, находят из условия образования в помещении паровоздушной смеси стехиометрического состава. Для этого из уравнения материального баланса горения находят стехиометрическую концентрацию вещества  $A$  (см. пример расчета стехиометрической концентрации метана в разделе 2.4.1). По рассчитанной концентрации вещества и известному объему помещения находят объем паров вещества  $A$ . Зная объем паров, рассчитывают их массу, воспользовавшись понятием киломоля вещества (см. раздел 2.1 и пример 1).

3.2. Трогильный эквивалент взрыва ( $M_{\text{ТНТ}}$ ) парогазовой смеси в помещении рассчитывают по формуле 34 (см. раздел 2.6.2 и пример 15), принимая, что теплота взрыва приблизительно равна низшей теплоте сгорания вещества, а доля потенциальной энергии перешедшей в кинетическую энергию взрыва ( $\gamma$ ) при взрыве паровоздушной смеси в помещении равна 1.

3.3. Размер безопасной зоны ( $R_{\text{без}}$ ) по действию давления воздушной ударной волны находят по формуле 37 (см. там же, раздел 2.6.2 и пример 15).

3.4. Для определения количества диоксида углерода ( $M_{\text{CO}_2}$  в кг), необходимого для предотвращения взрыва в помещении, находят его минимальную флегматизирующую концентрацию как в пункте 1.4, затем его объем и массу как в пункте 3.1.

3.5. Результаты расчетов, выполненных по пунктам 3.1-3.4, оформляются в виде таблицы (табл. 6).

Таблица 6

**Параметры взрыва паровоздушной смеси вещества  $A$  в помещении объемом  $V$ , м<sup>3</sup>**

Расчетные параметры	Наиболее взрывоопасная концентрация вещества $A$ в паровоздушной смеси, $\varphi_{\text{стех}}$ , % (об.)	Количество вещества, создающее наиболее взрывоопасную паровоздушную смесь в помещении $m$ , кг	Трогильный эквивалент взрыва $M_{\text{ТНТ}}$ , кг	Безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны $R_{\text{без}}$ , м	Количество необходимого $\text{CO}_2$ для предотвращения взрыва $M_{\text{CO}_2}$ , кг
Численные значения параметров					



В конце работы формулируются общие выводы по курсовой работе и указывается использованная литература.

### **6. Рекомендуемая литература**

1. Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. Теория горения и взрыва: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 240 с.
2. Андросов А.С., Салеев Е.П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва»: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 80 с.
3. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочн. Изд. В 2-х книгах, 1990. - М.: Химия. – 384 с.
4. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник в 2-х частях. – М.: Асс. «Пожнаука», 2000. – 709 с.

## 7. ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица I

Атомные массы некоторых элементов

Название	Химический знак	Порядковый номер	Атомная масса
Азот	N	7	14,00
Водород	H	1	1,01
Кислород	O	8	16,00
Сера	S	16	32,06
Углерод	C	6	12,01

Таблица II

Основные физические константы некоторых газов

Название или химическая формула	$M$ , кг/кмоль	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{пл}$ , К	$T_{кип}$ , К	$\Delta H_f^0$ , кДж/моль
Воздух	28,98	1,293	60	81	0
CO	28,01	1,250	68	81	112,7
CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	216,4	194,5	396,9
CH <sub>4</sub>	16,04	0,717	90,5	112,4	75
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,06	1,357	90,5	184,4	88,4
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,10	2,019	85,6	230,9	109,4
H <sub>2</sub>	2,02	0,090	13,8	20,3	0
H <sub>2</sub> O (пар)	18,02	0,768	273	373,0	242,2
N <sub>2</sub>	28,01	1,251	63	77,2	0
O <sub>2</sub>	32,00	1,429	54,6	90,1	0

*Примечание.*  $M$  – молекулярная масса газа;  $\rho$  – плотность при нормальных условиях;  $T_{пл}$  и  $T_{кип}$  – температуры плавления и кипения при давлении 101,325 кПа;  $\Delta H_f^0$  – теплота образования.

**Теплота образования веществ, температура кипения и значения коэффициентов  
A, B, C**

в уравнении Антуана  $\lg P = A - \frac{B}{C+t}$ , где  $P$  в кПа, а  $t$  в °С

№	Вещество	Теплота образования $\Delta H_f$ кДж/моль	Температура кипения,  °С	Коэффициенты уравнения Антуана		
				A	B	C
1	амилбензол	34,4	202,0	6,68328	2069,486	210,431
2	трет-амиловый спирт	330,0	102,3	6,44711	1252,216	180,301
3	трет-бутилбензол	22,68	168,0	6,68934	1911,894	239,664
4	2,2-диметилбутан	177,8	49,7	5,93476	1127,187	228,9
5	2,4-диметилгексан	219,4	109,4	5,97799	1287,876	214,79
6	3,3-диметилгептан	241,6	137,0	6,21073	1509,585	221,989
7	2,6-диметил-4-гептанол	412,1	176,5	5,66299	1144,81	135,0
8	4,5-диметилоктан	253,4	162,1	6,31873	1645,436	219,378
9	2,2-диметилпентан	206,1	79,2	5,93972	1190,033	223,303
10	2,4-диметил-3-пентанол	370,5	138,7	5,61923	1029,6	146,1
11	2,4-диметил-3-этилпентан	235,0	136,7	6,16233	1490,02	221,908
12	1,4-диэтилбензол	22,2	183,8	6,41434	1820,632	230,413
13	3,5-диэтилтолуол	56,0	201,0	6,50299	1926,654	229,367
14	втор-изоамиловый спирт	314,2	112,0	6,9421	1090,9	157,2
15	изобутиловый спирт	283,2	107,8	7,83005	2058,392	245,642
16	изогексиловый спирт	325,7	151,6	7,05114	1273,35	153,56
17	4-изопропилгептан	251,1	158,0	6,31693	1628,498	219,75
18	п-ксилол	24,4	138,3	6,25485	1537,082	223,608
19	2-метил-1-бутанол	305,8	128,0	6,29693	1258,332	109,165
20	3-метилгексан	194,9	92,0	5,99812	1236,026	219,545
21	2-метилгептан	215,5	117,6	6,0423	1337,468	213,693
22	4-метилоктан	233,3	142,4	6,27293	1553,088	221,45
23	3-метилпентан	171,6	63,3	5,97380	1152,368	227,129
24	4-метил-2-пентанол	344,2	133,0	7,59199	2174,869	257,78
25	3-метил-4-этилгексан	229,9	140,6	6,21413	1524,093	221,543
26	2-метил-3-этилпентан	211,2	115,6	5,98851	1318,120	215,306
27	4-метил-2-этилпентанол	385,0	177,3	5,70756	1134,599	129,195
28	пентаметилбензол	73,5	232,0	6,68333	2069,486	210,431
29	пропилбензол	7,9	159,0	6,29713	1627,827	220,499

Продолжение таблицы III

№	Вещество	Теплота образования $\Delta H_f$ , кДж/моль	Температура кипения, °С	Коэффициенты уравнения Антуана		
				<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	41,9	204,5	6,24188	1693,156	195,234
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	276,2	184,0	6,28723	1715,271	216,609
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	236,2	141,5	5,98454	1417,473	214,705
33	1,2,3-триметилбензол	9,46	176,1	6,44298	1791,164	227,844
34	2,2,3-триметилбутан	204,8	80,8	5,91723	1200,563	226,05
35	3,3,4-триметилгексан	235,9	140,4	6,15073	1499,426	221,333
36	2,5,5-триметилгептан	269,0	152,8	6,24873	1587,259	220,119
37	2,2,3-триметилпентан	220,0	109,8	5,95039	1294,875	218,42
38	этилбензол	29,9	136,2	6,35879	1590,660	229,581
39	3-этилоктан	251,1	166,4	6,38063	1686,45 3	219,039
40	метаэтилтолуол	1,8	161,3	6,35228	1676,538	224,676
41	3,3-диэтилпентан	231,9	146,0	6,01755	1451,245	215,575
42	втор-октиловый спирт	380,5	178,5	6,02004	1335,88	151,798
43	изобутан	134,5	11,7	5,95318	916,054	243,783
44	изобутилбензол	21,5	172,8	6,72744	1977,892	246,029
45	изогексан	174,3	60,3	5,96403	1135,41	226,572
46	кумол (изопропилбензол)	21,5	152,4	6,06756	1461,643	207,56
47	цимол (1-изопропил-4-метилбензол)	-28,8	177,0	6,64988	1893,381	232,655
48	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	28,4	139,0	6,58807	1906,796	234,917
49	2-метилнонан	256,8	167,0	6,12003	1521,3	202,75
50	3-пентанол	316,0	116,0	6,57423	1354,42	183,41

Таблица IV

## Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, $T, ^\circ\text{C}$	H, кДж/моль					
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
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

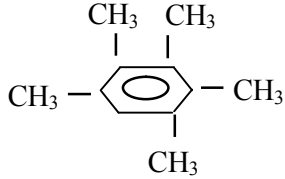

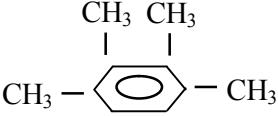
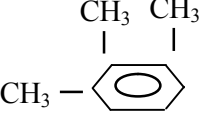
Температура $T$ , °C	$U$ , кДж/моль						Температура $T$ , °C
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	
0	0	0	0	0	0	0	0
100	2,2	2,1	2,1	2,9	2,5	3,3	100
200	4,1	4,1	4,1	6,3	5,1	6,8	200
300	6,6	6,3	6,4	10,0	7	10,7	300
400	9,1	8,5	8,6	14,6	10,7	14,9	400
500	11,5	10,7	10,9	18,1	13,6	19,1	500
600	14,1	13,1	13,3	22,5	16,7	23,5	600
700	16,7	15,5	15,7	27,0	20	28,1	700
800	19,4	18	18,1	31,6	23,3	32,7	800
900	22,1	20,5	20,7	36,3	27,7	37,3	900
1000	24,8	23	23,3	41,1	30,3	42	1000
1100	27,7	25,7	26,0	46,0	34,1	46,8	1100
1200	30,4	28,2	28,6	50,9	37,8	51,5	1200
1300	33,2	30,9	31,3	56	41,8	56,4	1300
1400	35,1	33,7	34,0	61,1	45,8	61,2	1400
1500	39,0	36,3	36,7	66,1	49,8	65,9	1500
1600	41,9	39,1	39,5	71,3	54,0	70,8	1600
1700	44,9	41,8	42,3	76,4	58,3	75,7	1700
1800	47,8	44,5	45,0	81,6	62,6	80,6	1800
1900	50,8	47,3	47,8	86,8	67,0	85,4	190
2000	53,8	50,2	50,7	92,0	71,5	90,5	2000
2100	56,7	52,9	53,5	97,2	75,9	95,2	2100
2200	59,8	55,8	56,4	102,5	80,5	100,2	2200
2300	62,9	58,7	59,3	107,8	85,1	105,1	2300
2400	65,9	61,6	62,2	113,0	89,7	110,0	2400
2500	69,1	64,3	65,1	118,3	94,3	115	2500
2600	72,4	67,4	67,7	123,7	97,8	120,0	260
2700	75,5	70,2	70,7	128,9	102,4	124,9	2700
2800	78,5	73,1	73,5	134,2	107,0	130,0	2800
2900	81,0	76,4	76,9	139,7	111,7	134,7	2900
3000	85,2	78,9	79,3	145,0	116,3	139,8	3000



9	2,2-диметилпентан	$C_7 H_{16}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - C - CH_2 - CH_2 - CH_3 \\   \\ CH_3 \end{array}$
10	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7 H_{16}O$	$\begin{array}{c} OH \\   \\ CH_3 - CH - CH - CH - CH_3 \\   \quad \quad   \\ CH_3 \quad \quad CH_3 \end{array}$
11	2,4-диметил-3-этилпентан	$C_9 H_{20}$	$\begin{array}{c} CH_3 - CH - CH - CH - CH_3 \\   \quad \quad   \quad \quad   \\ CH_3 \quad CH_2 \quad CH_3 \\   \\ CH_3 \end{array}$
12	1,4-диэтилбензол	$C_{10} H_{14}$	$CH_3 - CH_2 - \text{C}_6\text{H}_4 - CH_2 - CH_3$
13	3,5-диэтилтолуол	$C_{11} H_{16}$	$\begin{array}{c} \quad \quad \quad CH_2 - CH_3 \\ \quad \quad \quad / \\ CH_3 - \text{C}_6\text{H}_3 \\ \quad \quad \quad \backslash \\ \quad \quad \quad CH_2 - CH_3 \end{array}$
14	втор-изоамиловый спирт (3-метил-2-бутанол)	$C_5 H_{12}O$	$\begin{array}{c} OH \quad CH_3 \\   \quad   \\ CH_3 - CH - CH - CH_3 \end{array}$
15	изобутиловый спирт (2-метил-1-пропанол)	$C_4 H_{10}O$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ OH - CH_2 - CH - CH_3 \end{array}$
16	изогексиловый спирт (4-метил-1-пентанол)	$C_6 H_{14}O$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ OH - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH - CH_3 \end{array}$
17	4-изопропилгептан	$C_{10} H_{22}$	$\begin{array}{c} CH_3 - CH - CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}$



18	п-ксилол (1,4-диметилбензол)	$C_8 H_{10}$	$CH_3 - \text{C}_6\text{H}_4 - CH_3$
19	2-метил-1-бутанол	$C_5 H_{12}O$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ OH - CH_2 - CH - CH_2 - CH_3 \end{array}$
20	3-метилгексан (изогептан)	$C_7 H_{16}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}$
21	2-метилгептан (изооктан)	$C_8 H_{18}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}$
22	4-метилоктан	$C_9 H_{20}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_2 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_2 - CH_2 \\   \qquad \qquad \qquad   \\ CH_3 \qquad \qquad \qquad CH_3 \end{array}$
23	3-метилпентан (2-этилбутан)	$C_6 H_{14}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH_2 - CH_3 \end{array}$
24	4-метил-2-пентанол (метиламиловый спирт)	$C_6 H_{14}O$	$\begin{array}{c} OH \qquad \qquad CH_3 \\   \qquad \qquad   \\ CH_3 - CH - CH_2 - CH - CH_3 \end{array}$
25	3-метил-4-этилгексан	$C_9 H_{20}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH_2 - CH - CH - CH_2 - CH_3 \\   \\ CH_2 - CH_3 \end{array}$
26	2-метил-3-этилпентан	$C_8 H_{18}$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ CH_3 - CH - CH - CH_2 - CH_3 \\   \\ CH_2 - CH_3 \end{array}$

27	4-метил-2-этилпентанол (2-этилизогексанол)	$C_8 H_{18} O$	$  \begin{array}{ccccccc}  & & CH_2 - CH_3 & & & & \\  & &   & & & & \\  OH - CH_2 - CH - CH_2 - CH - CH_3 & & & & & & \\  & & & & & &   \\  & & & & & & CH_3  \end{array}  $
28	пентаметилбензол	$C_{11} H_{16}$	
29	пропилбензол (фенилпропан)	$C_9 H_{12}$	$CH_3 - CH_2 - CH_2 - $ 
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	$C_{10} H_{14}$	
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	$C_{11} H_{24}$	$  \begin{array}{ccccccc}  & CH_3 & CH_3 & & & & \\  &   &   & & & & \\  CH_3 - C - C - CH_2 - CH_2 - CH_2 & & & & & & \\  &   &   & & & &   \\  & CH_3 & CH_3 & & & & CH_3  \end{array}  $
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	$C_9 H_{20}$	$  \begin{array}{ccccccc}  & CH_3 & CH_3 & CH_3 & & & \\  &   &   &   & & & \\  CH_3 - CH - C - CH - CH_3 & & & & & & \\  & & &   & & & \\  & & & CH_3 & & &  \end{array}  $
33	1,2,3-триметилбензол	$C_9 H_{12}$	
34	2,2,3-триметилбутан	$C_7 H_{16}$	$  \begin{array}{ccccccc}  & CH_3 & & & & & \\  &   & & & & & \\  CH_3 - C - CH - CH_3 & & & & & & \\  &   &   & & & & \\  & CH_3 & CH_3 & & & &  \end{array}  $

35	3,3,4-триметилгексан	$C_9 H_{20}$	$  \begin{array}{ccccccc}  & & CH_3 & & & & \\  & &   & & & & \\  CH_3 - & CH_2 - & C - & CH - & CH_2 - & & CH_3 \\  & &   & &   & & \\  & & CH_3 & & CH_3 & &   \end{array}  $
36	2,5,5-триметилгептан	$C_{10} H_{22}$	$  \begin{array}{cccccccc}  & & CH_3 & & & & CH_3 & \\  & &   & & & &   & \\  CH_3 - & CH - & CH_2 - & CH_2 - & C - & CH_2 - & & CH_3 \\  & & & &   & & & \\  & & & & CH_3 & & &   \end{array}  $
37	2,2,3-триметилпентан	$C_8 H_{18}$	$  \begin{array}{ccccccc}  & & CH_3 & & CH_3 & & \\  & &   & &   & & \\  CH_3 - & C - & CH - & CH_2 - & & & CH_3 \\  &   & & & & & \\  & CH_3 & & & & &   \end{array}  $
38	этилбензол	$C_8 H_{10}$	$CH_3 - CH_2 - \text{C}_6\text{H}_5$
39	3-этилоктан	$C_{10} H_{22}$	$  \begin{array}{cccccccc}  & & CH_2 - CH_3 & & & & & CH_3 \\  & &   & & & & &   \\  CH_2 - & CH - & CH_2 - & CH_2 - & CH_2 - & & & CH_2 \\  &   & & & & & & \\  & CH_3 & & & & & &   \end{array}  $
40	метаэтилтолуол (1-метил-3-этилбензол)	$C_9 H_{12}$	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\  / \\  \text{CH}_3 - \text{C}_6\text{H}_4  \end{array}  $
41	3,3-диэтилпентан	$C_9 H_{20}$	$  \begin{array}{ccccccc}  & & CH_2 - CH_3 & & & & \\  & &   & & & & \\  CH_3 - & CH_2 - & C - & CH_2 - & & & CH_3 \\  & &   & & & & \\  & & CH_2 - CH_3 & & & &   \end{array}  $



**Температура самовоспламенения некоторых предельных углеводородов  
в зависимости от средней длины углеродной цепи**

$l_{cp}$	$T_{cb}, K$	$l_{cp}$	$T_{cb}, K$	$l_{cp}$	$T_{cb}, K$	$l_{cp}$	$T_{cb}, K$
3,0	743	6,0	507	9,0	482	12,0	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,4	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,5	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,6	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4,0	686	7,0	496	10,0	479	13,0	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477
4,3	665	7,3	494	10,3	479	13,3	477
4,4	654	7,4	493	10,4	478	13,4	477
4,5	643	7,5	492	10,5	478	13,5	476
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5,0	560	8,0	488	11,0	478	14,0	476
5,1	547	8,1	487	11,1	478	14,1	476
5,2	535	8,2	486	11,2	478	14,2	476
5,3	528	8,3	486	11,3	478	14,3	476
5,4	522	8,4	485	11,4	478	14,4	476
5,5	517	8,5	484	11,5	478	14,5	476
5,6	513	8,6	484	11,6	477	14,6	476
5,7	511	8,7	483	11,7	477	14,7	476
5,8	509	8,8	483	11,8	477	14,8	476
5,9	508	8,9	482	11,9	477	14,9	476
–	–	–	–	–	–	15,0	475

**Температура самовоспламенения некоторых предельных одноатомных спиртов  
в зависимости от средней длины углеродной цепи**

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

**Температура самовоспламенения некоторых ароматических углеводородов  
в зависимости от средней длины углеродной цепи**

$\ell_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$ , К	$\ell_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$ , К	$\ell_{\text{ср}}$	$T_{\text{с}}$ , К
-2	843	—	—	—	—
-1,9	842	0,1	810	2,1	702
-1,8	841	0,2	794	2,2	701
-1,7	840	0,3	774	2,3	701
-1,6	840	0,4	753	2,4	700
-1,5	839	0,5	733	2,5	700
-1,4	838	0,6	723	2,6	699
-1,3	837	0,7	718	2,7	699
-1,2	837	0,8	715	2,8	698
-1,1	836	0,9	713	2,9	698
-1	835	1	712	3	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
-0,2	827	1,8	704	3,8	696
-0,1	824	1,9	703	3,9	696
0	819	2	703	4	695

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название вещества	$T_{св}$ , К	КПР, об. %	$U_{н}$ , м/с	МВСК при разбавлении $CO_2$	$E_{мин}$ , мДж	Огнетушащая концентрация, об. %		$T_i$ , К	Стехиометрическая концентрация горючего	$Q_{и}$ , кДж/моль
						$CO_2$	$N_2$			
Аммиак	923	15–28	0,23	16,2	680	–	–	1777	21,9	317,2
Ацетилен	608	2–81	1,35	9	–	57	70	2307	7,7	1260
Окись углерода	883	12,5–74,2	0,42	9,8	–	53	69	2000	28,5	283,9
Водород	783	4–74,2	2,67	7,9	0,017	62	76	2072	29,5	242,2
Метан	810	5–15	0,37	15,6	0,26	26	39	1927	9,5	806
Этан	745	3,22–12,45	0,40	13,8	0,24	34	46	1922	5,64	1431
Пропан	739	2,37–9,5	0,38	14,3	0,25	32	45	1987	4,02	2049
Бутан	678	1,86–8,41	0,37	14,9	0,25	29	41	2010	3,12	2665
Этилен	813	3,75–29,6	0,63	12,1	0,12	42	52	2067	6,5	1326
Сероводород	519	4,3–45,5	–	8	–	62	–	–	12,24	–
Коксовый газ	913	5,6–30,8	–	–	–	–	–	–	–	–
Природный газ (Саратовский)	823–1023	5,1–12,1	–	–	–	–	–	–	–	–
Доменный газ	–	6,5–73,9	–	–	–	–	–	–	–	–

*Примечание.* Состав газовых смесей: коксовый газ  $CO$  – 6,8 %,  $CO_2$  – 2,8 %,  $N_2$  – 7,8 %,  $H_2$  – 58 %,  $CH_4$  – 22,5 %; природный газ  $CO$  – 3,3 %,  $CH_4$  – 94 %,  $C_nH_m$  – 2,5 %; доменный газ  $CO$  – 28 %,  $CO_2$  – 10,5 %,  $N_2$  – 58,5 %,  $H_2$  – 2,7 %,  $CH_4$  – 0,3 %.



Таблица XI

## Показатели пожарной опасности некоторых горючих жидкостей

Название вещества	$T_{всп}, K^*$	$T_{всп}, K^{**}$	ТПР, К	$T_{св}, K$	КПР, об. %	$T_i, K$	$Q_{ц},$ кДж/моль	$E_{мин},$ мДж	$V_{выг},$ см/ч	МВСК (при $CO_2$ )
Ацетон	255	268	253–278	738	2,2–13	2160	1668	–	20	14,9
Бензол	262	–	259–286	807	1,4–7,1	2375	3141	0,22	30	14,4
Гексан	250	–	247–277	507	1,24–7,5	2238	3864	0,25	–	14,6
Глицерин 98 %	411	476	455–480	668	2,6–11,3	–	1483	–	–	–
Пентан	229	239	225–250	560	1,4–7,8	2007	–	0,22	–	14,8
Метанол	281	286	280–312	737	6–34,7	–	642	–	–	13,4
Этанол	286	–	284–314	677	3,6–19	–	1242	–	12–15	14,9
Пропанол-1	296	302	–	644	2,1–13,5	–	1852	–	–	–
Бутанол-1	307	314	307–341	618	1,7–12	–	2456	–	–	–
Амиловый спирт	300– 316	–	321–353	573	1,2–(10)	–	3077	–	–	–
Голуол	277	–	273–303	763	1,3–6,7	2344	3741	–	20	–
Диэтиловый эфир	232	–	228–286	437	1,7–49	–	2514	0,2	–	13
Уксусноэтиловый эфир	275	–	274–304	673	3,5–16,8	–	2075	–	–	–
Этиленгликоль	393	–	385–397	663	3,8–6,4	–	1064	–	–	–
Бензин А-76	239	–	239–269	573	0,79–5,16	2375	46928***	–	–	–
Керосин тракторный	300	–	300–342	533	1,4–7,5	–	41481–46090***	–	–	–
Трансформаторное масло	–	–	395–396	573	–	–	–	–	–	–
Вазелиновое масло	420	–	397–463	563	–	–	–	–	–	–
Масло подсолнечное	502	–	477–502	643	–	–	–	–	–	–
Нефть (Туймазинская)	252	–	252–298	593	–	–	–	–	–	–
Скипидар	307	–	305–326	573	0,8	–	–	–	–	–

Примечание: \* – в закрытом тигле; \*\* – в открытом тигле \*\*\* – в кДж/кг.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение .....	3
2. Параметры горения и взрыва. Методы и примеры расчета .....	4
2.1. Некоторые важные понятия молекулярной физики .....	4
2.2. Материальный баланс процессов горения .....	6
2.2.1. Уравнение материального баланса .....	6
2.2.2. Количество воздуха, необходимое для горения и объем продуктов горения .....	7
2.3. Тепловой баланс процессов горения .....	12
2.3.1. Теплота сгорания вещества .....	12
2.3.2. Температура горения .....	13
2.3.3. Температура взрыва .....	16
2.4. Газовоздушные горючие смеси .....	19
2.4.1. Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) и стехиометрическая концентрация горючего .....	19
2.4.2. Расчет КПР по аппроксимационной формуле .....	20
2.4.3. Зависимость КПР от концентрации флегматизатора .....	21
2.5. Температурные параметры пожарной опасности ...	25
2.5.1. Температурные пределы распространения пламени (ТПР) .....	25
2.5.2. Температура самовоспламенения .....	26
2.6. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей	31
2.6.1. Максимальное давление взрыва .....	31
2.6.2. Мощность взрыва и безопасное расстояние по действию воздушных ударных волн .....	32
3. Выбор варианта задания и общие методические рекомендации по выполнению курсовой работы .....	34
4. Задание по курсовой работе .....	35
5. Методические указания по проведению расчетов в курсовой работе .....	38
6. Рекомендуемая литература .....	40
7. Приложение (справочные данные) .....	42

Учебное издание

Бегишев Ильдар Рафатович

# **ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

## **КУРСОВАЯ РАБОТА**

**по дисциплине «Теория горения и взрыва»**  
(методические указания по выполнению  
курсовой работы для слушателей ИЗИДО)

В авторской редакции

Подписано в печать \_\_\_\_\_ г. Формат 60×90 1/16. Печ.л. 3,75  
Уч.изд.л. 2,7. Бумага офсетная. Тираж 300 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Академия ПС МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4