

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

Академия Государственной противопожарной службы

И. Р. Бегишев

**Расчет и анализ параметров горения и взрыва
паровоздушных смесей горючего вещества**

**Методические рекомендации по выполнению
курсовой работы
по дисциплине «Теория горения и взрыва»**

**Для слушателей бакалавриата
Института заочного и дистанционного обучения**

Москва 2014

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

Академия Государственной противопожарной службы

И. Р. Бегишев

Расчет и анализ параметров горения и взрыва паровоздушных
смесей горючего вещества

Методические рекомендации по выполнению
курсовой работы
по дисциплине «Теория горения и взрыва»

Для слушателей бакалавриата
Института заочного и дистанционного обучения

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

Москва 2014

УДК 544
ББК 38.96
Б 37

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой физики

В. И. Слугев

Доктор технических наук, профессор
начальник кафедры общей и специальной химии

С.С. Воевода

Бегишев И.Р.

Б 37 Расчет и анализ параметров горения и взрыва паровоздушных смесей горючего вещества: методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория горения и взрыва» для слушателей бакалавриата ИЗИДО. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 43 с.

Издано в авторской редакции

УДК 544
ББК 38.96

© Академия Государственной противопожарной
службы МЧС России, 2014

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 тротильный 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 $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³/моль. Объем 1 киломоля в тысячу раз больше и равен 22,4 м³/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

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

где Дж = Н · м, Па = Н/м².

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_{μ} – 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

$$m = \frac{V_0}{V_{\mu}} \cdot M_{\text{O}_2},$$

где $V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$, $M_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг/кмоль}$ (см. табл. I и II приложения).

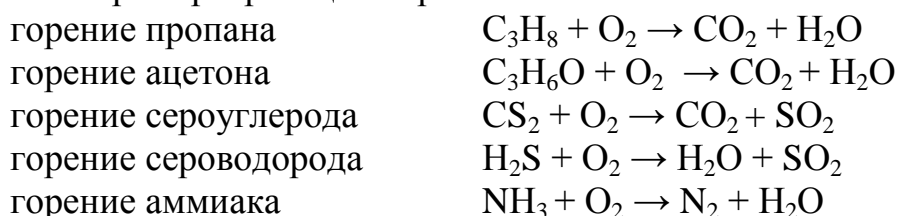
$$m = \frac{6\text{м}^3}{22,4\text{м}^3/\text{кмоль}} \cdot 32\text{кг/кмоль} \approx 8,6 \text{ кг}$$

2.2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

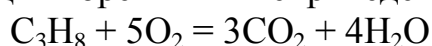
2.2.1. Уравнение материального баланса

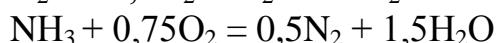
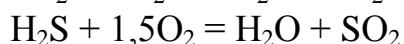
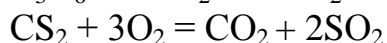
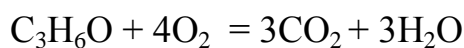
При горении веществ в воздухе происходит быстрая химическая реакция между горючим веществом и кислородом воздуха с интенсивным тепловыделением. В результате этой реакции образуются в основном окислы элементов, входящих в состав горючего вещества. При сгорании углеводородов, состоящих из атомов С и Н, образуется CO_2 (двуокись углерода) и H_2O (вода). При неполном сгорании наряду с ними образуются CO (окись углерода) и $\text{C}_{\text{п(тверд)}}$ (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:



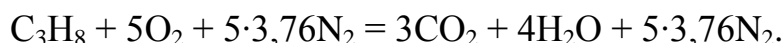
Согласно закону сохранения массы количество атомов каждого элемента в левой и правой части химического уравнения должно быть одинаковым. Для того, чтобы уравнивать обе части уравнения, рекомендуется сначала расставить коэффициенты перед окислами в правой части с тем, чтобы уравнивать число атомов элементов горючего вещества (С, Н, S, N ...). Затем, подсчитав количество атомов кислорода в правой части уравнения, поставив 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 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ или этиловом спирте $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). 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:



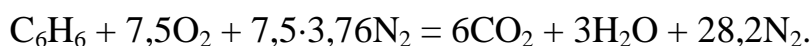
Коэффициент, который записывают перед O_2 (в данном случае 5) необходимо повторить и перед N_2 , так как азот и кислород в воздухе неразделимы.

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, м^3) горючего вещества, называется **теоретическим количеством воздуха** $V_{\text{в}}^0$.

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:

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

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

А для расчета объема продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{Г}}}, V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{Г}}} \quad \text{и} \quad V_{\text{N}_2}^0 = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{Г}}}, \quad (5)$$

где n_{CO_2} , $n_{\text{H}_2\text{O}}$, n_{N_2} – количество кмоль веществ в правой части уравнения материального баланса, $V_{\text{N}_2}^0$ – объем азота из воздуха, участвовавшего в горении, кмоль/кмоль.

Общий объем продуктов горения определяется по формуле:

$$V_{\text{пр}}^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0. \quad (6)$$

Горючая газоздушная 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**

$$\alpha = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{в}}^0}.$$

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

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

Для стехиометрической смеси $\alpha = 1$ и $\Delta V_{\text{в}} = 0$.

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

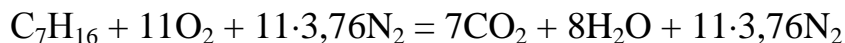
$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_B. \quad (9)$$

В этом случае полный объем продуктов горения

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

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 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

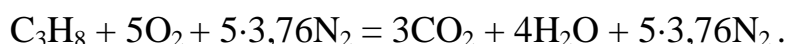
$$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2})22,4}{n_r M_r} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

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^3 пропана и какое количество продуктов сгорания при этом образуется. Сгорание происходит при $\alpha = 1$ (стехиометрическая смесь; температуру и давление считать нормальными).

Решение. Запишем уравнение материального баланса горения пропана



Объем воздуха, необходимый для горения

$$V_6^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_2} = \frac{5 + 5 \cdot 3,76}{1} = 23,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов горения

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_2} = \frac{3}{1} = 3 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_2} = \frac{4}{1} = 4 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{N_2}^0 = \frac{n_{N_2}}{n_2} = \frac{5 \cdot 3,76}{1} = 18,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3,$$

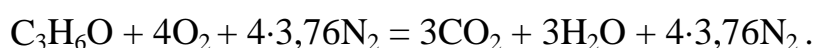
так как $\alpha = 1$, избыток воздуха $\Delta V_B = 0$, тогда полный объем продуктов горения

$$V_{n_2}^0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}^0 = 3 + 4 + 18,8 = 25,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3.$$

Таким образом, для сгорания 1 м^3 пропана требуется $23,8 \text{ м}^3$ воздуха, объем продуктов сгорания при этом составит $25,8 \text{ м}^3$ (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

$$V_B^0 = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2})22,4}{n_r M_r},$$

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

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

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

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

а избыток воздуха

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

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

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

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^3), называют низшей теплотой сгорания $Q_{\text{н}}$.

Если горючее имеет в своем составе водород, то при его сгорании образуется вода в газообразном состоянии, которая, охлаждаясь, будет конденсироваться. Так как в процессе конденсации паров тепло выделяется, то

общее количество теплоты, полученное при сгорании вещества, будет больше на эту величину. Напомним, что количество теплоты, выделяющееся при конденсации паров, равно количеству теплоты, затраченному на парообразование. Тогда:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{н}} + r, \quad (11)$$

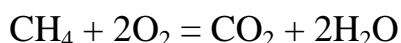
где $Q_{\text{в}}$ – высшая теплота сгорания вещества, а r – удельная теплота парообразования воды.

При расчетах температуры горения пользуются величиной $Q_{\text{н}}$, так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии. Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводится 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:

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

где ΔH_{fi}° – 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_2 , O_2 , H_2 , 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

$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{f\text{CO}_2}^{\circ} n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^{\circ} n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{f\text{CH}_4}^{\circ} n_{\text{CH}_4} - \Delta H_{f\text{O}_2}^{\circ} n_{\text{O}_2}. \quad (13)$$

Учитывая, что кислород – простое вещество и для него $\Delta H_{f\text{O}_2}^{\circ} = 0$,

$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{f\text{CO}_2}^{\circ} n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^{\circ} n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{f\text{CH}_4}^{\circ} n_{\text{CH}_4}. \quad (14)$$

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

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

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.

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

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

Если теплосодержание продуктов горения при $T = 273$ К принять равным нулю, то

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

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 $\eta = 0$

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

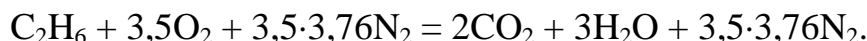
Температура горения зависит от концентрации горючего в горючей смеси. Если горение происходит с избытком воздуха, т.е. при $\alpha > 1$, то выделившееся в результате сгорания тепло частично затрачивается на нагрев этого лишнего воздуха. В горючей смеси с $\alpha < 1$ из-за недостатка воздуха полное сгорание горючего вещества произойти не может, поэтому и тепловыделение 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 $T_0 = 273$ К.

Решение. Адиабатическую температуру горения вещества находят при условии отсутствия теплопотерь ($\eta = 0$) 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 теплопотери отсутствуют, то все выделившееся тепло идет на нагревание продуктов горения. Среднее теплосодержание продуктов горения будет составлять

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

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 приложения 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

$$Q_1 > Q_n.$$

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 $Q_2 > Q_n$, значит $T_r < 2200$ °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_n .

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_n , 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

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

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

Для приближенных расчетов действительной температуры горения можно использовать формулу

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

где $C_{p_{\text{m}i}}$ – 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.

Удельные теплоемкости продуктов горения

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

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 $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$. Температура взрыва значительно выше адиабатической температуры горения, так как при горении часть тепла, выделившегося при химическом превращении, затрачивается на совершение работы расширения газа, а при взрыве все выделившееся тепло расходуется только на увеличение внутренней энергии системы. Учитывая, что $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$, а изменение энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции происходит лишь в результате изменения внутренней энергии ($dH = dU + pdV = dU$ при $dV = 0$), уравнение теплового баланса для взрыва можно записать в следующем виде

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

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.

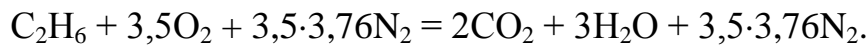
Если для удобства расчетов принять, что внутренняя энергия газов при $T = 273$ К равна нулю, то полная внутренняя энергия продуктов взрыва при температуре взрыва будет равна количеству теплоты, выделившейся в результате химической реакции

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

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. Рекомендуется 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_n , 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 ($Q_2 > Q_n$), 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_n , 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

$$\begin{aligned} T_{\text{взр}} &= T_3 + \frac{T_2 - T_3}{Q_2 - Q_3} (Q_n - Q_3) = 2600 + \frac{2700 - 2600}{1491 - 1430} (1431 - 1430) = \\ &= 2602 \text{ }^\circ\text{C} = 2875 \text{ К.} \end{aligned}$$

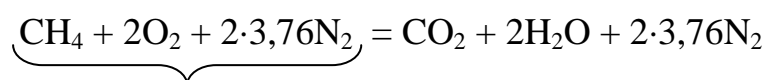
Если сравнить полученное значение температуры взрыва с адиабатической температурой горения (см. ответ в примере 5), можно прийти к выводу, что температура взрыва примерно на 500 К выше адиабатической температуры горения. Таким образом, химическое превращение, протекающее в форме взрыва (изохорно-адиабатический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

трация горючего – верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР). При концентрациях горючего ниже НКПР и выше ВКПР его смеси с воздухом негорючи. Например, для метана CH_4 концентрационные пределы распространения пламени составляют НКПР – 5 об. %, а ВКПР – 15 об. % (см. табл. X приложения), для аммиака NH_3 НКПР – 15 об. %, а ВКПР – 28 об. %. Скорость распространения пламени и его температура минимальны в предельных смесях, т.е. при концентрациях горючего, равных НКПР и ВКПР. Максимальные значения скорости и температуры пламени, как правило, имеют смеси стехиометрического состава. Поэтому эти смеси наиболее 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

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

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.

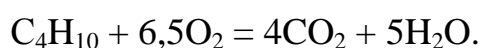
Таблица 2

Величины a и b для расчета КПП

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 КПП 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,

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

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

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

Экспериментальные значения КПП, приводимые в справочной литературе, составляют 1,86 и 8,41 %. Сравнивая их с расчетными, убеждаемся, что для бутана расхождение расчетных и экспериментальных данных небольшое.

2.4.3. Зависимость КПП 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.

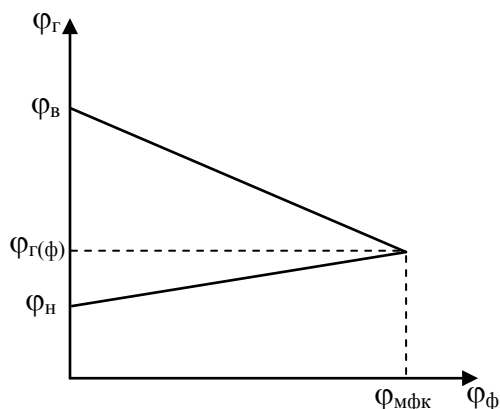


Рис. 1. Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора в газовой смеси

Чаще всего в качестве флегматизаторов используют нейтральные газы (нераагирующие в пламени), такие, как углекислый газ CO_2 , азот N_2 , водяной пар H_2O . При увеличении концентрации флегматизатора в горючей смеси верхний концентрационный предел уменьшается, а нижний, как правило, незначительно увеличивается. При некоторой определенной для каждого флегматизатора концентрации нижний и верхний концентрационные пределы смыкаются (рис. 1). Эта точка называется экстремальной точкой области распространения пламени или точкой флегматизации. Концентрация 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

$$T_c = T_0 + \frac{Q_n}{\sum C_{p_i} V_{n_{gi}} + C_{p_\phi} V_\phi}, \quad (23)$$

где C_{p_ϕ} – среднее значение теплоемкости флегматизатора при постоянном давлении для температурного интервала 273-1500 К, V_ϕ – количество флегматизатора в исходной горючей смеси. Тогда из (23) получим

$$V_{\phi} = \frac{Q_n - (T_r - T_0) \sum C p_{\text{пр}i} V_{\text{пр}i}}{(T_r - T_0) C p_{\phi}}. \quad (24)$$

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.

$$V_{\text{МФК}} = \frac{Q_n - (1500 - T_0) \sum C p_{\text{пр}i} V_{\text{пр}i}}{(1500 - T_0) C p_{\phi}}, \quad (25)$$

где $T_0 = 273$ К.

А минимальная флегматизирующая концентрация в % об. составит:

$$\varphi_{\text{МФК}} = \frac{V_{\phi} 100}{V_r + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad \text{или} \quad \varphi_{\text{МФК}} = \frac{n_{\phi} 100}{n_r + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} \quad (26)$$

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.

$$\varphi_{\text{Г}(\phi)} = \frac{V_r 100}{V_r + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad \text{или} \quad \varphi_{\text{Г}(\phi)} = \frac{n_r 100}{n_r + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}}. \quad (27)$$

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

$$\varphi_{\text{O}_2(\phi)} = \frac{V_{\text{O}_2} 100}{V_r + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad \text{или} \quad \varphi_{\text{O}_2(\phi)} = \frac{n_{\text{O}_2} 100}{n_r + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}}. \quad (28)$$

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

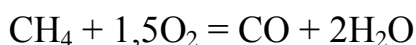
Пример 8. Рассчитать значение МФК и МВСК при разбавлении метановоздушной смеси диоксидом углерода. Построить зависимость КПП от концентрации флегматизатора.

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

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

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

Запишем химическое уравнение горения метана



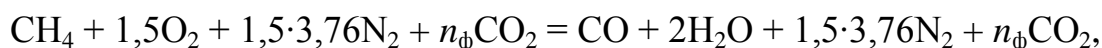
Низшая теплота сгорания метана в этом случае по закону Гесса

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

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

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

Теперь составим уравнение материального баланса процесса горения метана, включив в него и флегматизатор (CO_2)



где $n_{\text{ф}}$ – число молей флегматизатора.

Уравнение (24) для данного случая примет вид:

$$V_{\text{ф}} = \frac{Q_{\text{н}} - (T_{\text{Г}} - T_0) [Cp_{\text{CO}} \cdot V_{\text{CO}} + Cp_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + Cp_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^0]}{(T_{\text{Г}} - T_0) Cp_{\text{CO}_2}}$$

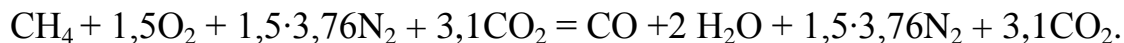
Из правой части уравнения материального баланса видно, что объем продуктов горения

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

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

$$V_{\text{ф}} = \frac{522,1 - (1500 - 273) [3,37 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 3,98 \cdot 10^{-2} \cdot 2 + 3,18 \cdot 10^{-2} \cdot 5,64]}{(1500 - 273) \cdot 5,08 \cdot 10^{-2}} = 3,1 \text{ МОЛЬ/МОЛЬ.}$$

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 $n_{\text{ф}(\text{CO}_2)} = 3,1$ моль флегматизатора.

Минимальная флегматизирующая концентрация диоксида углерода будет равна

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{n_{\text{ф}} 100}{n_{\text{г}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\text{ф}}} = \frac{3,1 \cdot 100}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,1} = 27,6 \%,$$

а концентрация горючего в точке флегматизации

$$\varphi_{\text{г(ф)}} = \frac{n_{\text{г}} 100}{n_{\text{г}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\text{ф}}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,1} = 8,9 \%.$$

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).

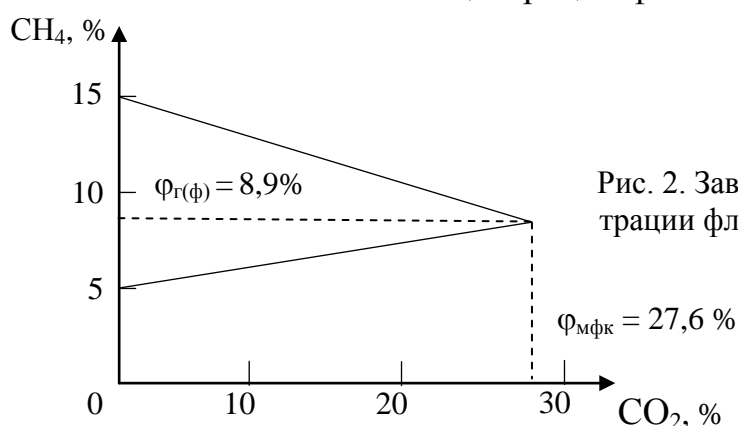


Рис. 2. Зависимость КПР метана от концентрации флегматизатора (диоксид углерода)

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (концентрация кислорода в точке флегматизации)

$$\varphi_{\text{O}_2\text{ф}} = \frac{n_{\text{O}_2} 100}{n_{\text{г}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\text{ф}}} = \frac{1,5}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,1} = 13,3 \%.$$

2.5. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей

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

2.5.1. 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

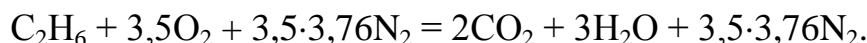
объеме изменение давления в системе вызвано повышением температуры и изменением числа молей газа, которое происходит в результате химического превращения. Исходя из этого, максимальное давление взрыва парогазовых смесей рассчитывают по формуле

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = P_0 \frac{T_{\text{взр}} n_{\text{пр}}}{T_0 n_c}, \quad (29)$$

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 9. 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 $n_{\text{пр}}$

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

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

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.

2.5.2. Мощность взрыва и безопасное расстояние по действию воздушных ударных волн

Для оценки мощности взрыва используется понятие тротилового эквива-

лента. Известно, что при взрыве 1 кг тротила (тринитротолуола - ТНТ) выделяется энергия, равная $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3$ 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 тротилового эквивалент взрыва будет равен

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (30)$$

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

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

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

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}. \quad (31)$$

Величину

$$\eta_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (32)$$

называют тротиловым эквивалентом вещества.

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

$$R_{\text{бз}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}}. \quad (33)$$

Пример 10. 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.

3. 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 диоксида углерода (МФК);
- концентрацию горючего в точке флегматизации;
- зависимость КПР от концентрации флегматизатора;
- минимально взрывоопасное содержание кислорода (МВСК);
- 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 помещения 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.

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-диметиллоктан	$C_{10}H_{22}$	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-этильутан)	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	$C_{11}H_{16}$	6,0×4,0×3,0
29	пропилбензол (фенилпропан)	C_9H_{12}	9,0×5,0×4,0
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	10,0×5,0×4,0
31	2,2,3,3-тетраметилпентан	$C_{11}H_{24}$	10,5×5,0×4,0
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	C_9H_{20}	7,0×5,0×4,0
33	1,2,3-триметилбензол	C_9H_{12}	5,0×4,0×3,0
34	2,2,3-триметилбутан	C_7H_{16}	8,0×4,0×3,5
35	3,3,4-триметилгексан	C_9H_{20}	4,0×4,5×3,0
36	2,5,5-триметилпентан	$C_{10}H_{22}$	6,0×3,5×3,0
37	2,2,3-триметилпентан	C_8H_{18}	4,5×5,0×4,0
38	этилбензол	C_8H_{10}	5,5×5,0×3,0
39	3-этилоктан	$C_{10}H_{22}$	7,5×5,0×4,0
40	метаэтилтолуол (1-метил-3-этилбензол)	C_9H_{12}	6,0×6,0×4,5
41	3,3-диэтилпентан	C_9H_{20}	5,5×4,0×3,0
42	втор-октиловый спирт	$C_8H_{18}O$	6,0×4,5×3,0
43	изобутан	C_4H_{10}	7,0×5,0×3,5
44	изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	6,5×4,0×3,0
45	изогексан	C_6H_{14}	7,5×5,0×4,0
46	кумол (изопропилбензол)	C_9H_{12}	8,0×5,5×4,0
47	цимол (1-изопропил-4-метилбензол)	$C_{10}H_{14}$	8,5×5,0×4,0
48	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	C_8H_{10}	7,5×4,0×4,0
49	2-метилнонан	$C_{10}H_{22}$	8,0×5,0×3,5
50	3-пентанол	$C_5H_{12}O$	9,0×5,5×4,0

4. 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_n 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) диоксида углерода 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. Максимальное давление взрыва ($P_{взр}^{max}$) рассчитывают по формуле (29) (см. раздел 2.6.1 и пример 9), в которой используют полученное ранее значение температуры взрыва.

1.9. Тротиловый эквивалент вещества ($\eta_{ТНТ}$) определяют по формуле 32 (см. раздел 2.6.2).

Часть 2. Сравнение полученных расчетных значений со справочными данными

2.1. Все рассчитанные параметры горения и взрыва вещества A занесут 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 взрыва, $T_{взр}$	КПР	МФК (CO_2)	МВСК	Давление взрыва, P_{max}	Тротил эквивалент вещества, $\Gamma_{тнт}$
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 создавалась 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 объ-

ему 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. Тротиловый эквивалент взрыва ($M_{\text{ТНТ}}$) парогазовой смеси в помещении рассчитывают по формуле 34 (см. раздел 2.6.2 и пример 10), принимая, что теплота взрыва приблизительно равна низшей теплоте сгорания вещества, а доля потенциальной энергии перешедшей в кинетическую энергию взрыва (γ) 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 33 (см. там же, раздел 2.6.2 и пример 10).

3.4. Для определения количества диоксида углерода (M_{CO_2} в кг), необходимого для предотвращения взрыва в помещении, используют ранее рассчитанные значения минимальной флегматизирующей концентрации. Находят его объем диоксида углерода, а затем его 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 , м³

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	Тротиловый эквивалент взрыва $M_{\text{ТНТ}}$, кг	Безопасное расстояние по действию воздушной ударной волны $R_{\text{без}}$, м	Количество необходимого CO_2 для предотвращения взрыва M_{CO_2} , кг
Численные значения параметров					

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

5. 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.

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

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

Температура кипения и теплота образования химических веществ

№	Вещество	Химическая формула	Температура кипения, °С	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль
1	амилбензол	$C_{11}H_{16}$	34,4	202,0
2	трет-амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	330,0	102,3
3	трет-бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	22,68	168,0
4	2,2-диметилбутан	C_6H_{14}	177,8	49,7
5	2,4-диметилгексан	C_8H_{18}	219,4	109,4
6	3,3-диметилгептан	C_9H_{20}	241,6	137,0
7	2,6-диметил-4-гептанол	$C_9H_{20}O$	412,1	176,5
8	4,5-диметиллоктан	$C_{10}H_{22}$	253,4	162,1
9	2,2-диметилпентан	C_7H_{16}	206,1	79,2
10	2,4-диметил-3-пентанол	$C_7H_{16}O$	370,5	138,7
11	2,4-диметил-3-этилпентан	C_9H_{20}	235,0	136,7
12	1,4-диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	22,2	183,8
13	3,5-диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	56,0	201,0
14	втор-изоамиловый спирт	$C_5H_{12}O$	314,2	112,0
15	изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	283,2	107,8
16	изогексиловый спирт	$C_6H_{14}O$	325,7	151,6
17	4-изопропилгептан	$C_{10}H_{22}$	251,1	158,0
18	п-ксилол	C_8H_{10}	24,4	138,3
19	2-метил-1-бутанол	$C_5H_{12}O$	305,8	128,0
20	3-метилгексан	C_7H_{16}	194,9	92,0
21	2-метилгептан	C_8H_{18}	215,5	117,6
22	4-метилоктан	C_9H_{20}	233,3	142,4
23	3-метилпентан	C_6H_{14}	171,6	63,3
24	4-метил-2-пентанол	$C_6H_{14}O$	344,2	133,0
25	3-метил-4-этилгексан	C_9H_{20}	229,9	140,6
26	2-метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	211,2	115,6
27	4-метил-2-этилпентанол	$C_8H_{18}O$	385,0	177,3
28	пентаметилбензол	$C_{11}H_{16}$	73,5	232,0
29	пропилбензол	C_9H_{12}	7,9	159,0
30	1,2,3,4-тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	41,9	204,5
31	2,2,3,3-тетраметилгептан	$C_{11}H_{24}$	276,2	184,0
32	2,3,3,4-тетраметилпентан	C_9H_{20}	236,2	141,5

№	Вещество	Химическая формула	Температура кипения, °С	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль
33	1,2,3-триметилбензол	C_9H_{12}	9,46	176,1
34	2,2,3-триметилбутан	C_7H_{16}	204,8	80,8
35	3,3,4-триметилгексан	C_9H_{20}	235,9	140,4
36	2,5,5-триметилгептан	$C_{10}H_{22}$	269,0	152,8
37	2,2,3-триметилпентан	C_8H_{18}	220,0	109,8
38	этилбензол	C_8H_{10}	29,9	136,2
39	3-этилоктан	$C_{10}H_{22}$	251,1	166,4
40	метаэтилтолуол	C_9H_{12}	1,8	161,3
41	3,3-диэтилпентан	C_9H_{20}	231,9	146,0
42	втор-октиловый спирт	$C_8H_{18}O$	380,5	178,5
43	изобутан	C_4H_{10}	134,5	11,7
44	изобугилбензол	$C_{10}H_{14}$	21,5	172,8
45	изогексан	C_6H_{14}	174,3	60,3
46	кумол (изопропилбензол)	C_9H_{12}	21,5	152,4
47	цимол (1-изопропил-4-метилбензол)	$C_{10}H_{14}$	-28,8	177,0
48	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	C_8H_{10}	28,4	139,0
49	2-метилнонан	$C_{10}H_{22}$	256,8	167,0
50	3-пентанол	$C_5H_{12}O$	316,0	116,0

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

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

Внутренняя энергия газов

Температура T , °C	U , кДж/моль						Температура T , °C
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	
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	1900
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	2600
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

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. Параметры взрыва газо- и паровоздушных смесей	25
2.5.1. Максимальное давление взрыва	25
2.5.2. Мощность взрыва и безопасное расстояние по действию воздушных ударных волн	26 31
3. Выбор варианта задания и общие методические рекомендации по выполнению курсовой работы	31
4. Задание по курсовой работе	
5. Методические указания по проведению расчетов в курсовой работе	32
6. Рекомендуемая литература	34
7. Приложение (справочные данные)	35

Учебное издание

Бегишев Ильдар Рафатович

Расчет и анализ параметров горения и взрыва паровоздушных
смесей горючего вещества

Методические рекомендации по выполнению
курсовой работы
по дисциплине «Теория горения и взрыва»

Для слушателей бакалавриата
Института заочного и дистанционного обучения

Издано в авторской редакции

Подписано в печать г. Формат 60×90 1/16.
Печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,0. Бумага офсетная.
Тираж 100 экз. Заказ

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

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название вещества	$T_{св}$, К	КПР, об. %	$U_{нз}$, м/с	МВСК при разбавлении CO_2	$E_{мин}$, мДж	Огнетушащая концентрация, об. %		$T_{г}$, К	Стехиометрическая концентрация горючего	$Q_{нз}$, 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 %.

Показатели пожарной опасности некоторых горючих жидкостей

Название вещества	$T_{всп}, K^*$	$T_{всп}, K^{**}$	ТПР, К	$T_{св}, K$	КПР, об. %	T_g, K	$Q_H,$ кДж/моль	$E_{min},$ 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	–	–	–
Толуол	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.