



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»
Политехнический институт

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практических работ

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

по дисциплине «Теория горения и взрыва»
для студентов направления 20.03.01
«Техносферная безопасность»
очной и заочной форм обучения

Севастополь
2016

УДК 536.46+614.841

Методические указания к выполнению практических работ **«Расчет параметров процессов горения»** для студентов направлений «Техносферная безопасность» по дисциплине «Теория горения и взрыва» / Сост. А.Ш. Абибулаева, А.П. Буденный - Севастополь: Изд-во СевГУ, 2016 г.- 24 с.

Настоящие методические указания предназначены для оказания помощи студентам при выполнении практических работ по дисциплине «Теория горения и взрыва». Рассматриваются процессы горения горючих веществ и методики расчета параметров этих процессов. Приводятся краткие справочные данные по параметрам горючих веществ. Для студентов приведен ряд поясняющих примеров и задания для самостоятельного выполнения.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Техносферная безопасность» (протокол № 11 от 6 мая 2016 г.)

Допущено учебно-методическим отделом Политехнического института СевГУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

Хромов В.Г., доктор техн. наук, профессор кафедры «Техническая механика и машиноведение».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Практическая работа № 1.....	4
Практическая работа № 2.....	16
Библиографический список.....	25

ВВЕДЕНИЕ

Явления горения и взрыва широко распространены в природе и активно используются людьми в различных аспектах жизнедеятельности. Благодаря явлениям горения и взрыва человечество получает большую часть тепловой, электрической и механической энергии, необходимой для работы промышленных предприятий, поддержания благоприятных условий в жилых и рабочих помещениях.

Однако, неуправляемые процессы горения и взрыва могут представлять серьезную угрозу здоровью и жизни людей. Так, окружающая человека природная, бытовая и производственная среда содержат большое количество горючих материалов, способных воспламениться от источников открытого огня, высокой температуры, а некоторые из них могут и самовозгораться в результате процессов низкотемпературного окисления кислородом воздуха. Причем воспламенение некоторых составов, например, смеси горючих газов с воздухом, могут закончиться взрывом с образованием ударной волны, обладающей огромной разрушительной силой.

Для успешного предотвращения и ликвидации последствий аварийных ситуаций, вызванных неуправляемыми процессами горения и взрыва, необходимо детальное изучение этих явлений. Поэтому в пособии рассмотрены основные реакции горения, позволяющие рассчитать необходимое количество исходных компонентов (горючего и окислителя), а также количество образующихся продуктов горения. Приведенные примеры дают возможность определить тепловой эффект реакций окисления и температуру, возникающую при горении различных веществ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ

Цель работы: научиться составлять уравнения реакций горения веществ в кислороде и в воздухе, определять коэффициент горючести веществ и характер свечения пламени.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. Основные термины процессов горения и взрыва

Горением называется сложный физико-химический процесс взаимодействия горючего вещества и окислителя, характеризующийся самоускоряющимися превращениями и сопровождающийся выделением большого количества тепла, света и дыма.

Для возникновения процесса горения необходимо наличие: горючего вещества, окислителя и достаточного по мощности источника зажигания.

Горючим называется вещество (газ, пар, материал, смесь, конструкция), способное самостоятельно гореть после удаления источника зажигания.

Источник зажигания – горячее или раскаленное тело, а также электрический разряд, обладающие запасом энергии и температурой, достаточной для возникновения горения других веществ (пламя, искры, раскаленные предметы, выделяемая при трении теплота и др.).

При горении часто можно наблюдать *пламя* – видимую зону горения, от которой идет свечение и излучение теплоты, и дым, который представляет собой аэрозоль, образуемую жидкими и твердыми продуктами неполного сгорания веществ.

Если горение происходит вне специального очага или наносится при этом материальный ущерб, т. е. идет неконтролируемое горение, то такое горение называют *пожаром*.

Самовозгорание – явление резкого увеличения скорости экзотермических реакций в системе от внесенного источника зажигания, приводящее к горению вещества, и продолжающееся в его отсутствии. Температура, при которой начался процесс увеличения скорости реакции, называется *температурой самовозгорания* t_{B3} .

Под *самовоспламенением* горючих смесей понимается такой процесс, когда при нагреве до некоторой температуры замкнутого объема горючей газозооушной смеси она самостоятельно спонтанно воспламеняется по всему объему.

Самовоспламенение сопровождается исключительно появлением пламени. Температуру реагирующей среды, выше которой в системе возможно самоускорение реакции, называют *температурой самовоспламенения* t_{CB} .

Температура самовоспламенения t_{CB} всегда выше температуры самовозгорания t_{B3} , а их разность представляет собой температурный интервал саморазогрева системы, предшествующий самовоспламенению.

Взрыв – быстрое неуправляемое физическое или химическое превращение вещества, сопровождающееся образованием большого

количества сжатых газов, под давлением которых могут происходить разрушения различных объектов.

Взрыв часто может сопровождаться воспламенением материалов, пожаром, разрушениями окружающих предметов и оборудования.

Химический взрыв характеризуется быстрым химическим взаимодействием горючего и окислителя.

Физический взрыв связан с неконтролируемым высвобождением потенциальной энергии сжатых газов, паров или жидкостей из замкнутых объемов сосудов, машин и аппаратов.

Взрывному горению газо- и пылевоздушных смесей всегда предшествует период *дефлаграционного горения*, т. е. горения со сравнительно невысокой (до нескольких метров в секунду) переменной (ускоряющейся) скоростью, которая существенно зависит от многих факторов (внешнего давления, температуры, концентраций и др.).

При химических взрывах, когда достигаются скорости распространения пламени до десятков и сотен метров в секунду, но не превышающих скорости звука в данной среде (для воздуха 300 – 320 м/сек), происходит *взрывное горение*, сопровождаемое ударными волнами.

Принципиально дефлаграционное и взрывное горение отличаются друг от друга только скоростями распространения пламени. При взрывном горении обычно образуется пламя шарообразной формы, которое называют «*огненным шаром*». Это пламя создают светящиеся раскаленные продукты взрыва.

Взрывное горение газопаровоздушной смеси при определенных условиях может перейти в детонационное горение.

Детонационное горение характеризуется высокой скоростью распространения пламени, превышающей скорость распространения звука в окружающей среде, которая является максимально возможной для данного вещества.

1.2. Расчет коэффициента горючести.

Производственные предприятия могут содержать различные вещества, материалы, представляющие потенциальную опасность. Так, многие химические соединения способны гореть, и их воспламенение может привести к пожару. Поэтому, необходимо уметь определять возможность горения определенного вещества. Так, все индивидуальные вещества могут быть охарактеризованы коэффициентом горючести.

Коэффициент горючести K является безразмерным коэффициентом и служит для определения горючести вещества. Рассчитанный коэффициент горючести может быть использован для приближенного

вычисления температуры вспышки вещества, а также величины нижнего концентрационного коэффициента распространения пламени.

Коэффициент горючести рассчитывается по следующей формуле:

$$K = 4 n(C) + 4 n(S) + n(H) + n(N) - 2 n(O) - 2 n(Cl) - 3 n(F) - 5 n(Br), \quad (1.1)$$

где $n(C)$, $n(S)$, $n(H)$, $n(N)$, $n(O)$, $2 n(Cl)$, $n(F)$, $n(Br)$ – число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле вещества.

Если коэффициент горючести K больше или равен единице ($K \geq 1$), то вещество является **горючим**.

При значении K меньше единицы ($K < 1$) – вещество **негорючее**.

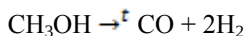
1.3. Характер свечения пламени

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

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

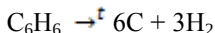
Если в горючем веществе при термическом разложении углерод не образуется, то вещество горит бесцветным пламенем как, например, в случае горения водорода H_2 .

При термическом разложении веществ с массовой долей углерода менее 50 % и содержащих в своем составе кислород (более 30 %) несгоревших частиц углерода образуется очень мало, и в момент образования они успевают окислиться до CO .



Такие вещества имеют голубоватые пламени (пламя угарного газа CO , метанола CH_3OH и этанола C_2H_5OH).

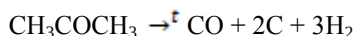
При горении веществ, содержащих более 75 % углерода (ацетилен C_2H_2 , бензол C_6H_6), в зоне горения образуется настолько много частиц C , что поступающего путем диффузии воздуха не хватает для полного окисления всего углерода.



Не окислившись в пламени углерод выделяется в виде копоти, и пламя при горении таких веществ будет ярким и коптящим.

Если кислород в веществе отсутствует или его содержание не превышает 30 %, но, в свою очередь, и массовая доля углерода не очень велика (менее 75 %), то при термическом разложении будет выделяться значительное количество частиц углерода, но при нормальном доступе

воздуха в зону горения они успевают окислиться до CO_2 . Возможная реакция при термическом разложении ацетона:



В подобных случаях пламя будет яркое, но не коптящее.

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

Таблица 1.1 - Характер свечения пламени

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

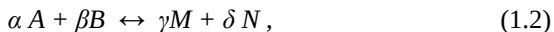
1.4. Составление уравнений реакций горения

Составляя уравнение реакции горения, следует помнить, что в пожарно-технических расчетах принято все величины относить к 1 молю горючего вещества. Это, в частности, означает, что в уравнении реакции горения перед горючим веществом коэффициент всегда равен 1. В таблице 1.2. приведены элементы, входящие в состав горючего вещества, и вещества, образующиеся в результате сгорания.

Таблица 1.2 - Состав продуктов горения

<i>Элементы, входящие в состав горючего вещества</i>	<i>Продукты горения</i>
Углерод C	Углекислый газ CO_2
Водород H	Вода H_2O
Сера S	Оксид серы (IV) SO_2
Азот N	Молекулярный азот N_2
Фосфор P	Оксид фосфора (V) P_2O_5
Галогены F, Cl, Br, I	Галогеноводороды HCl, HF, HBr, HI

Обычно процесс горения горючего вещества в воздухе представляет собой окислительную реакцию, которую можно всегда описать стехиометрическим уравнением в виде



где A, B, M, N – химические символы реагирующих веществ;
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – стехиометрические коэффициенты.

Под стехиометрическими понимают уравнения реакций, в которых отношение количеств исходных веществ строго соответствует условию получения конечных продуктов.

Протекание реакции (1.2) в двух противоположных направлениях называется химической обратимостью. Стрелка $\leftrightarrow$ указывает на образование из исходных веществ конечных продуктов M и N , и на протекание реакции в сторону образования исходных веществ A и B .

По мере протекания химического процесса при постоянной температуре, вследствие уменьшения количества исходных веществ A и B , прямая реакция идет все медленнее. Скорость же обратной реакции увеличивается, так как увеличивается количество продуктов прямой реакции – A и N . Наконец наступает такой момент, когда скорости прямой и обратной реакций уравниваются, количество веществ в системе с течением времени остается неизменным, и кажется, что реакция остановилась. При этом говорят о наступлении *химического равновесия*. В действительности реакция продолжается, при этом в одно и то же время образуется столько продуктов, сколько их распадается, т. е. реакции непрерывно идут в обе стороны с одинаковыми скоростями.

Чаще всего в условиях пожара горение протекает не в среде чистого кислорода, а в воздухе. Воздух состоит из азота (78 %), кислорода (21 %), окислов азота, углекислого газа, инертных и других газов (1 %). Для проведения расчетов принимают, что в воздухе содержится 79 % азота и 21 % кислорода. Таким образом, на один объем кислорода приходится 3,76 объемов азота ($79:21 = 3,76$).

В соответствии с законом Авогадро, соотношение молей этих газов будет 1:3,76. Таким образом, можно записать, что молекулярный состав воздуха ($O_2 + 3,76N_2$). Составление реакций горения веществ в воздухе аналогично составлению реакций горения в кислороде. Особенность состоит только в том, что азот воздуха при температуре горения ниже 2000°C в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

2.ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Рассчитать коэффициент горючести и определить характер свечения пламени приведенных веществ (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Задание к задаче 1

№ вар.	Вещества	
1	метионин $C_5H_{11}NO_2S$	азотная кислота HNO_3
2	глюкоза $C_6H_{12}O_6$	угольная кислота H_2CO_3
3	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	лимонная кислота $C_6H_8O_7$
4	дихлорметан CH_2Cl_2	уксусная кислота $C_2H_4O_2$
5	глутамин $C_5H_{10}N_2O_3$	хлорметан CH_3Cl
6	аспартам $C_{14}H_{18}N_2O_5$	фосген $COCl_2$
7	хинин $C_{20}H_{24}O_2N_2$	серная кислота H_2SO_4
8	аспарагин $C_4H_8N_2O_3$	хлорметан CH_3Cl
9	нитробензол $C_6H_5NO_2$	сероуглерод CS_2
10	анилин $C_6H_5NH_2$	метан CH_4
11	мочевина NH_2CONH_2	диоксид хлора ClO_2
12	винная кислота $H_2C_4H_4O_6$	сернистая кислота H_2SO_3
13	формамид $HCONH_2$	хлористая кислота $HClO_2$
14	глицин $C_2H_5NO_2$	циклогексан C_6H_{12}
15	бутиловый спирт C_4H_9OH	ацетилен C_2H_2
16	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	толуол C_7H_8
17	фенол C_6H_5OH	кетен CH_2CO
18	нитрат аммония NH_4NO_3	антрацен $C_{14}H_{10}$
19	стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$	этилен C_2H_4
20	диметилсульфид CH_3SCH_3	бензол C_6H_6

Задача 2. Составить уравнения реакции горения в кислороде и в воздухе данного вещества, и определить, сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании вещества. Исходные данные по вариантам приведены в таблице (2.2).

Таблица 2.2 – Задание к задаче 2

№ варианта	Вещество
1	ацетилен C_2H_2
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$

3	толуол C_7H_8
4	метан CH_4
5	этанол C_2H_5OH
6	бензол C_6H_6
7	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$
8	бутан C_4H_{10}
9	пентанол $C_5H_{11}OH$
10	фенол C_6H_5OH
11	ксилол C_8H_{10}
12	этилен C_2H_4
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$
14	бутилен C_4H_8
15	метанол CH_3OH
16	формальдегид CH_2O
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$
18	винилхлорид C_2H_3Cl
19	хлорид аммония NH_4Cl
20	бромэтан C_2H_5Br

Задача 3. Записать уравнение сгорания горючего вещества в кислороде воздуха. Определить молекулярную массу горючего вещества. Сколько потребуется кг и киломолей кислорода для сжигания m кг горючего вещества. Сколько будет образовано продуктов полного горения в кг и кмоль? Данные для решения задачи взять из таблицы (2.3) в соответствии со своим вариантом.

Таблица 2.3 – Задание к задаче 3

№ варианта	Название горючего вещества	Химическая формула	Масса горючего вещества m , кг
1	Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	1,5
2	Этан	C_2H_6	2
3	Пропан	C_3H_8	3
4	Бутан	C_4H_{10}	4
5	Пентан	C_5H_{12}	5
6	Ацетилен	C_2H_2	6
7	Оксид углерода	CO	7
8	Метилциклопентан	C_6H_{12}	8
9	2-Метилпентан	C_6H_{14}	9
10	Этилен	C_2H_4	10
11	н-Гептан	C_7H_{16}	11

12	Пропилен	C_3H_6	12
13	1-Бутен	C_4H_8	13
14	н-Октан	C_8H_{18}	14
15	Циклопентан	C_5H_{10}	15
16	н-Декан	$C_{10}H_{22}$	16
17	Изопентан	C_5H_{12}	17
18	Ацетон	C_3H_6O	18
19	Этилциклогексан	C_8H_{16}	19
20	Циклогексан	C_6H_{12}	20

3.ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Пример 1. Рассчитать коэффициент горючести глюкозы $C_6H_{12}O_6$ и угольной кислоты H_2CO_3 .

Решение:

1. В молекуле глюкозы содержится атомов: углерода $n(C) = 6$; водорода $n(H) = 12$; кислорода $n(O) = 6$. Подставляя количество атомов в формулу 1.1, имеем $K = 4 \cdot 6 + 12 - 2 \cdot 6 = 24$.

$K > 1$, следовательно, глюкоза – горючее вещество.

2. В молекуле угольной кислоты $n(H) = 2$; $n(Cl) = 1$; $n(O) = 3$;

$K = 2 + 4 - 2 \cdot 3 = 0$.

$K < 1$, следовательно, угольная кислота – негорючее вещество.

Пример 2. Определить характер свечения пламени метанала $НСОН$, фенола $C_6H_5ОН$ и пентанола $C_5H_{11}ОН$.

Решение:

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

$$M_r(НСОН) = 30$$

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

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

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

$$M_r(C_6H_5ОН) = 94$$

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

Массовая доля углерода $> 75\%$, а массовая доля кислорода $< 25\%$, следовательно, пламя при горении фенола яркое и коптящее.

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

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

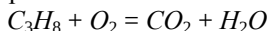
$$\omega(C) = \frac{5 \cdot 12 \cdot 100}{88} = 68\%; \quad \omega(O) = \frac{16 \cdot 100}{88} = 18\%$$

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

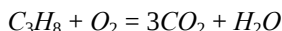
Пример 3. Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана C_3H_8 .

Решение:

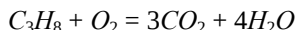
1. Записываем реакцию горения



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



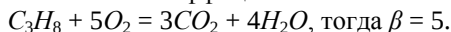
3. Атомов водорода в молекуле пропана 8, из них образуется 4 молекулы воды



4. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения

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

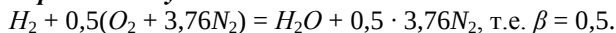
5. В левой части уравнения также должно быть 10 атомов кислорода. Молекула кислорода состоит из двух атомов, следовательно, перед кислородом нужно поставить коэффициент 5.



Пример 4. Составить уравнение реакции горения в воздухе водорода H_2 , анилина $C_6H_5NH_2$.

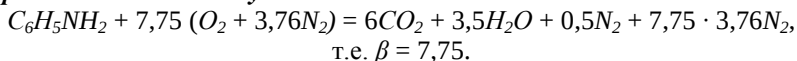
Решение:

Горение водорода в воздухе



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

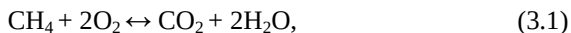
Горение анилина в воздухе



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

Пример 5. Записать уравнение сгорания метана в кислороде воздуха. Определить, сколько потребуется кг кислорода для сжигания 1 кмоль метана. Рассчитать, сколько потребуется киломолей кислорода для сжигания 1 кг метана.

Решение: Запишем реакцию горения метана при условии полного сгорания элементов в виде:



где стехиометрические коэффициенты в соответствии с уравнением (1.2) были определены и равны: $\alpha=1$; $\beta=2$; $\gamma=1$; $\delta=2$.

В уравнении (3.1) число атомов элементов веществ уравнены в правой и левой частях уравнения. При сгорании метана продуктами полного горения являются газы CO_2 и H_2O .

Согласно уравнению (3.1) для сгорания 1 кмоль газа CH_4 требуется 2 кмоль O_2 , при этом образуется 1 кмоль газа CO_2 и 2 кмоль газа H_2O . Так как молекулярная масса O_2 составляет 31,998 кг/кмоль, то масса 2 кмоль составит 63,996 кг. Следовательно, для сгорания 1 кмоль метана требуется 63,996 кг кислорода. Атомные массы элементов приведены в табл. 3.1.

Масса 1 кмоль CH_4 составляет 16,043 кг, на сжигание которого требуется 2 кмоль O_2 . Составим пропорцию в виде:
 для сжигания 16,043 кг $\text{CH}_4 \rightarrow$ требуется 2 кмоль O_2 ,
 для сжигания 1 кг $\text{CH}_4 \rightarrow$ требуется X кмоль O_2 .

Найдем, сколько требуется кислорода, кмоль, для сжигания 1 кг метана:

$$x = \frac{1 \cdot 2}{16} = 0,125$$

Следовательно, на сгорание 1 кг метана требуется 0,125 кмоль кислорода.

Таблица 3.1 - Атомные массы некоторых химических элементов

Химический элемент	Название	Атомная масса, кг/кмоль
O	Кислород	15,999
N	Азот	14,006
S	Сера	32,066
Cl	Хлор	35,452
C	Углерод	12,011
H	Водород	1,008

4.СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

- 4.1.Название и цель работы.
- 4.2.Краткие теоретические сведения.
- 4.3.Выполненные индивидуальные задания, согласно своему варианту.
- 4.4.Выводы.

5.КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Что такое горение? Что такое пожар?
- 5.2. Что необходимо для возникновения процессов горения?
- 5.3. Дайте определения понятиям «Самовозгорание» и «Самовоспламенение».
- 5.4. Как рассчитать коэффициент горючести вещества.
- 5.5. Что такое взрыв? Какие виды взрывов вы знаете?
- 5.6. Как определить характер свечения пламени? От чего оно зависит?
- 5.7. Что означает «стехиометрическое уравнение реакции»?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Цель работы: научиться составлять материальный баланс процессов горения и рассчитывать объем воздуха, необходимый для горения.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Баланс – (от фр. balance – буквально “весы”) – количественное выражение сторон какого-либо процесса, которые должны уравновешивать друг друга. Другими словами, баланс – это равновесие, уравновешивание. Процессы горения на пожаре подчиняются фундаментальным законам природы, в частности, законам сохранения массы и энергии.

Для решения многих практических задач, а также для выполнения пожарно-технических расчетов необходимо знать количество воздуха, необходимого для горения, а также объем и состав продуктов горения. Эти данные необходимы для расчета температуры горения веществ, давления при взрыве, избыточного давления взрыва, флегматизирующей концентрации флегматизатора, площади легкосбрасываемых конструкций.

Методика расчета материального баланса процессов горения определяется составом и агрегатным состоянием вещества. Свои особенности имеет расчет для индивидуальных химических соединений, для смеси газов и для веществ сложного элементного состава.

Индивидуальные химические соединения – это вещества, состав которых можно выразить химической формулой. Расчет процесса горения в этом случае производится по уравнению реакции горения.

Смеси сложных химических соединений или вещества сложного элементного состава нельзя выразить химической формулой, их состав выражается чаще всего в процентном содержании каждого элемента. К таким веществам можно отнести, например, нефть и нефтепродукты, древесину и многие другие органические вещества.

1.1. Расчет объема воздуха, необходимого для горения

Расчет объема воздуха, необходимого для горения, предполагает вычисление:

- а) теоретического объема воздуха $V_6^{теор}$;
- б) практического объема воздуха V_6^{np} , затраченного на горение (с учетом коэффициента избытка воздуха).

Стехиометрическое количество воздуха в уравнении реакции горения предполагает, что при данном соотношении компонентов, участвующих в реакции горения, воздух расходуется полностью. Объем воздуха в данном случае называется **теоретическим** ($V_6^{теор}$).

Горение может происходить не только при стехиометрическом соотношении компонентов, но и при значительном отклонении от него. Как правило, в условиях пожара на сгорание вещества воздуха затрачивается больше, чем определяется теоретическим расчетом. Избыточный воздух ΔV_6 в реакции горения не расходуется и удаляется из зоны реакции вместе с продуктами горения. Таким образом, практический объем воздуха равен

$$V_6^{np} = V_6^{теор} + \Delta V_6 \quad (1.1)$$

и, следовательно, **избыток воздуха** будет равен

$$\Delta V_6 = V_6^{np} - V_6^{теор} \quad (1.2)$$

Обычно в расчетах избыток воздуха при горении учитывается с помощью **коэффициента избытка воздуха (α)**. Коэффициент избытка воздуха показывает, во сколько раз в зону горения поступило воздуха больше, чем это теоретически необходимо для полного сгорания вещества:

$$\alpha = \frac{V_{\epsilon}^{np}}{V_{\epsilon}^{теор}} \quad (1.3)$$

Для горючих смесей стехиометрического состава (т.е. состава, соответствующего уравнению реакции горения) коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$, при этом реальный расход воздуха равен теоретическому. В этом случае обеспечивается оптимальный режим горения.

При $\alpha > 1$ горючую смесь называют *бедной по горючему компоненту*, а при $\alpha < 1$ – *богатой по горючему компоненту*.

Избыток воздуха имеется только в смеси, бедной по горючему компоненту.

$$\Delta V_{\epsilon} = V_{\epsilon}^{теор}(\alpha - 1) \quad (1.4)$$

Для неорганизованного горения характерен диффузионный режим горения, поэтому большинство горючих материалов на пожаре могут гореть только в этом режиме. Однородные смеси могут образовываться и при реальном пожаре, однако их образование, скорее, предшествует пожару или обеспечивает начальную стадию развития. Если происходит открытый пожар, то понятия «избыток» – «недостаток» воздуха приобретают абсурдный смысл.

В закрытом объеме диффузионное горение большинства горючих материалов возможно только до определенной пороговой концентрации кислорода, так называемой ***остаточной концентрации кислорода в продуктах горения (O_2)^{III}***. Для большинства органических веществ она составляет 12 – 16 % O_2 . Для некоторых веществ, например, ацетилена C_2H_2 , ряда металлов, горение возможно и при значительно меньшем содержании кислорода (до 5 % объемных O_2).

Коэффициент избытка воздуха для диффузионного горения правильнее назвать **коэффициент участия воздуха в горении**. Эта характеристика более полно отражает суть процесса горения на пожаре и не дает ошибочных представлений и понятий. Это важный параметр, определяющий динамику развития пожара и, как следствие, развитие его опасных факторов.

Зная содержание кислорода в продуктах горения, можно определить коэффициент избытка воздуха (коэффициент участия воздуха в горении) на реальном пожаре:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi(O_2)^{III}} \quad (1.5)$$

1.2. Расчет объема воздуха, необходимого для горения смеси газов и паров

Природный, попутный нефтяной газ, промышленные газы (доменный, коксовый, генераторный и т.п.) представляют собой смеси газов. Состав газов выражается обычно в объемных процентах (объемн, %).

Алгоритм расчета в данном случае следующий: для каждого горючего компонента вычисляется теоретическое количество воздуха с учетом его концентрации в смеси, и полученные концентрации суммируются. Формула для расчета теоретического объема воздуха для сгорания газовой смеси имеет следующий вид:

$$V_{\epsilon}^{теор} = \frac{\beta_1 \cdot \varphi_1 + \beta_2 \cdot \varphi_2 + \beta_3 \cdot \varphi_3 + \dots - \varphi(O_2)}{21} \cdot V_{ГС}, \text{ м}^3 \quad (1.6)$$

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

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

$\varphi(O_2)$ - процентное содержание кислорода в горючем газе (в объемных %);

$V_{ГС}$ - объем газовой смеси, м^3 .

Если горение протекает с избытком воздуха, то практический объем воздуха рассчитывают по уже известной формуле:

$$V_{\epsilon}^{np} = V_{\epsilon}^{теор} \cdot \alpha$$

2.ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания m кг вещества, при заданной температуре и давлении? Исходные данные по вариантам приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Задание к задаче 1

№ варианта	Вещество	Масса, кг	Температура, °C	Давление, атм
1	ацетилен C_2H_2	1	11	1,2
2	нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	2	12	1,2
3	толуол C_7H_8	3	13	1,2
4	метан CH_4	4	14	1,2
5	этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	5	15	1,2
6	бензол C_6H_6	6	16	1,3
7	диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	7	17	1,3
8	бутан C_4H_{10}	8	18	1,3

9	пентанол $C_5H_{11}OH$	9	19	1,3
10	фенол C_6H_5OH	10	20	1,3
11	ксилол C_8H_{10}	11	21	1,4
12	этилен C_2H_4	12	22	1,4
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$	13	23	1,4
14	бутилен C_4H_8	14	24	1,4
15	метанол CH_3OH	15	25	1,4
16	формальдегид CH_2O	16	8	1,1
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	17	9	1,1
18	винилхлорид C_2H_3Cl	18	10	1,1
19	хлорид аммония NH_4Cl	19	11	1,1
20	бромэтан C_2H_5Br	20	12	1,1

Задача 2. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания m кг вещества при заданной температуре и давлении кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Задание к задаче 2

№ вар.	Вещество	Масса, кг	Температура, °C	Давление, кПа	Коэфф. избытка воздуха, α
1	ацетилен C_2H_2	20	15	85	1,0
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$	22	16	87	1,0
3	толуол C_7H_8	24	17	89	1,1
4	метан CH_4	26	18	90	1,1
5	этанол C_2H_5OH	28	19	92	1,2
6	бензол C_6H_6	30	20	93	1,2
7	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	32	21	94	1,3
8	бутан C_4H_{10}	34	22	95	1,3
9	пентанол $C_5H_{11}OH$	36	23	96	1,4
10	фенол C_6H_5OH	38	24	97	1,4
11	ксилол C_8H_{10}	40	25	98	1,5
12	этилен C_2H_4	42	26	99	1,5
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$	44	15	85	1,4

14	бутилен C_4H_8	46	16	86	1,4
15	метанол CH_3OH	48	17	87	1,3
16	формальдегид CH_2O	50	18	88	1,3
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	52	19	89	1,2
18	винилхлорид C_2H_3Cl	54	20	90	1,2
19	хлорид аммония NH_4Cl	56	21	91	1,1
20	бромэтан C_2H_5Br	58	22	92	1,1

Задача 3. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания x м³ данной горючей газовой смеси имеющегося состава. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Задание к задаче 3

№ вар	Газовая смесь	Состав газовой смеси, %	Объем газовой смеси, м ³	Кoeff. избытка воздуха, α
1	Доменный газ	оксид углерода (II) CO – 27 %, водород H_2 – 3 %, углекислый газ CO_2 – 13 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 56 %	15	1,2
2	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 3 %, водород H_2 – 50 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, метан CH_4 – 5 %, азот N_2 – 6 %	20	1,1
3	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 35 %, водород H_2 – 40 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, метан CH_4 – 14 %, азот N_2 – 6 %	100	1,2
4	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 40 %, водород H_2 – 50 %, углекислый газ CO_2 – 4 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 5 %	60	1,3
5	Природный газ	водород H_2 – 4 %, метан CH_4 – 86 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 4 %, бутан C_4H_{10} – 4,90%	80	1,4
6	Природный газ	метан CH_4 – 90 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 5 %, пропан C_3H_8 – 4 %	90	1,4

7	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 10 %, водород H ₂ – 50 %, метан CH ₄ – 30 %, углекислый газ CO ₂ – 3 %, кислород O ₂ – 2 %, азот N ₂ – 5 %	85	1,5
8	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 20 %, водород H ₂ – 50 %, метан CH ₄ – 23 %, углекислый газ CO ₂ – 3 %, азот N ₂ – 2 %, этан C ₂ H ₆ – 2 %	35	1,0
9	Коксовый газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H ₂ – 57 %, метан CH ₄ – 22 %, углекислый газ CO ₂ – 2 %, азот N ₂ – 8 %, вода H ₂ O – 4 %	45	1,1
10	Саратовский природный газ	метан CH ₄ – 92 %, этан C ₂ H ₆ – 8 %	50	1,1
11	Ухтинский природный газ	метан CH ₄ – 88 %, углекислый газ CO ₂ – 4 %, азот N ₂ – 5 %, этан C ₂ H ₆ – 2 %, пропан C ₃ H ₈ – 1 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 1 %	65	1,2
12	Дашавский природный газ	метан CH ₄ – 98 %, азот N ₂ – 1 %, этан C ₂ H ₆ – 1 %, пропан C ₃ H ₈ – 1 %	85	1,2
13	Попутный нефтяной газ	метан CH ₄ – 42 %, азот N ₂ – 8 %, этан C ₂ H ₆ – 20 %, пропан C ₃ H ₈ – 20 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 10 %	70	1,4
14	Шебелинский природный газ	метан CH ₄ – 92 %, углекислый газ CO ₂ – 2 %, азот N ₂ – 2 %, этан C ₂ H ₆ – 3 %, пропан C ₃ H ₈ – 2 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 1 %	75	1,5
15	Генераторный газ	оксид углерода (II) CO – 30 %, водород H ₂ – 15 %, метан CH ₄ – 5 %, углекислый газ CO ₂ – 10 %, азот N ₂ – 40 %	55	1,3
16	Воздушный газ	оксид углерода (II) CO – 33 %, водород H ₂ – 10 %, метан CH ₄ – 1 %, углекислый газ CO ₂ – 1 %, азот N ₂ – 55 %	40	1,3
17	Бухарский газ	метан CH ₄ – 95 %, углекислый газ CO ₂ – 1 %, азот N ₂ – 1 %, этан C ₂ H ₆ – 4 %	30	1,0
18	Сжиженный газ	метан CH ₄ – 4 %, этан C ₂ H ₆ – 4 %, пропан C ₃ H ₈ – 79 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 11 %	25	1,1
19	Биогаз	водород H ₂ – 1 %, метан CH ₄ – 70 %, углек-й газ CO ₂ – 28 %, азот N ₂ – 1 %, сероводород H ₂ S – 1 %	95	1,6

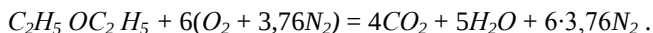
20	Коксовый очищенный газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H ₂ – 58 %, метан CH ₄ – 22 %, углекислый газ CO ₂ – 2 %, кислород O ₂ – 1 %, азот N ₂ – 8 %, этан C ₂ H ₆ – 2 %, сероводород H ₂ S – 1 %	110	1,3
----	------------------------	---	-----	-----

3.ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

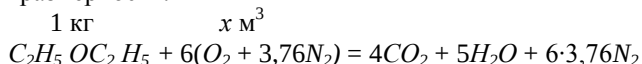
Пример 1. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира C₂H₅OC₂H₅? Температура 10°C, давление 1,2 атм.

Решение:

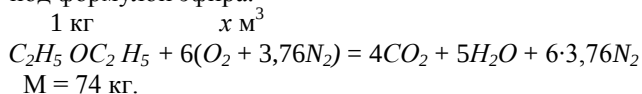
1.Записываем уравнение реакции горения



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



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



4. При нормальных условиях молярный объем (V_M) любого газообразного вещества составляет 22,4 л/моль или 22,4 м³/кмоль. Если условия отличаются от нормальных, то необходимо определить, какой объем будет занимать 1 кмоль любого газообразного вещества при данных условиях. Расчет V_M ведут по формуле объединенного газового закона:

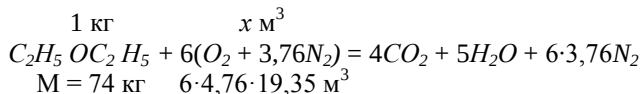
$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P}$$

где P и T – данные в задаче температура и давление.

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

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

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



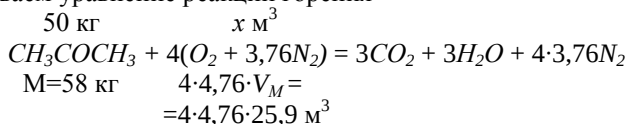
5. По уравнению реакции найдем пропорционально теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания эфира

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

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

Решение:

1. Записываем уравнение реакции горения



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

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

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

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

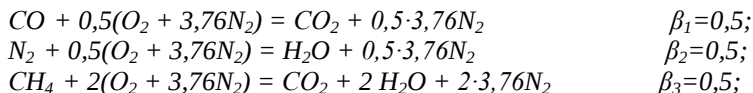
4. По условию задачи коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$. С учетом этого определим практический объем воздуха, необходимый для горения:

$$V_{\epsilon}^{np} = V_{\epsilon}^{теор} \cdot \alpha = 425,1 \cdot 1,2 = 510,1 \text{ м}^3$$

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

Решение:

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



2. По формуле (1.6) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

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

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

$$V_{\epsilon}^{np} = V_{\epsilon}^{теор} \cdot \alpha = 8,1 \cdot 1,3 = 10,5 \text{ м}^3$$

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Краткие теоретические сведения.
- 4.3. Выполненные индивидуальные задания, согласно своему варианту.
- 4.4. Выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Каким законам подчиняются процессы горения на пожаре?
- 5.2. Что такое индивидуальные химические соединения и смеси сложных химических соединений?
- 5.3. Что такое коэффициент избытка воздуха?
- 5.4. Какую смесь называют бедной и богатой по горючему компоненту?
- 5.5. Алгоритм расчета объема воздуха, необходимого для горения смеси газов и паров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.
2. Малинин В.Р. Теория горения и взрыва / Малинин В.Р., Климкин В.И., Анисеев С.В., Коробейников Е.Г. и др./ Учебник для вузов МЧС России по специальности 280104.65 – пожарная безопасность / Под. ред. проф. В.С. Артамонова/. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2007. – 293 с.
3. Терминологический словарь по пожарной безопасности / Сост. М.С.Васильев, Н.В.Бородина. – М.; ФГУ ВНИИПО, 2001.