Государственное автономное профессиональное образовательное учреждение

Чувашской Республики

«Чебоксарский экономико-технологический колледж»

Министерства образования и молодежной политики Чувашской Республики

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

**ОП. 06 ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА**

специальность

среднего профессионального образования

**20.02.04 Пожарная безопасность**

Разработчик:

Шишкина Г.Н., преподаватель

Чебоксары 2022

В работе представлены методические указания к выполнению практических работ по учебной дисциплине ОП.06 Теория горения и взрыва, дано краткое содержание теоретического материала, приведены примеры выполнения соответствующих задач, составлены задания для самостоятельной деятельности студентов.

Тематика практических занятий отражает требования к содержанию курса химии в соответствии с учебным планом.

Предназначено для студентов средних профессиональных учебных заведений.

СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка………………………………………………………………..4-5

Тематический план практических занятий…………………………………………….6

Практическое занятие № 1…………………………………………………………….6-7

Практическое занятие № 2……………………………………………………………7-10

Практическое занятие № 3…………………………………………………………..10-13

Практическое занятие № 4…………………………………………………………..13-15

Практическое занятие № 5…………………………………………………………..15-16

Практическое занятие № 6…………………………………………………………..16-19

Практическое занятие № 7…………………………………………………………..19-22

Практическое занятие № 8…………………………………………………………..22-25

Практическое занятие № 9…………………………………………………………. 25-26

Практическое занятие № 10…………………………………………………………26-27

Практическое занятие № 11…………………………………………………………27-30

Практическое занятие № 12…………………………………………………………30-32

Практическое занятие № 13…………………………………………………………32-33

Практическое занятие № 14…………………………………………………………33-36

Практическое занятие № 15…………………………………………………………36-38

Практическое занятие № 16…………………………………………………………38-39

Практическое занятие № 17…………………………………………………………39-46

Приложения 1-6………………………………………………………………………47-52

Информационное обеспечение………………………………………………………53

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

В соответствии с Федеральным Государственным Образовательным Стандартом среднего профессионального образования по специальности 20.02.04 Пожарная безопасность техник должен уметь проводить расчеты по формулам и уравнениям реакции. Реализация этого требования в полной мере обеспечивается при проведении практических занятий. Практическое занятие — это форма учебного занятия, где преподаватель организует детальное рассмотрение студентами отдельных теоретических положений учебной дисциплины и формирует умение и навыки их практического приложения путем индивидуального выполнения студентом в соответствии со сформулированными заданиями.

Расчеты, выполняемые в ходе практической работы, позволяют осмысленно подойти к пониманию важнейших законов, показывают важность их изучения при освоении специальности. Умение пользоваться справочной литературой – важнейшая составляющая работы высококвалифицированного специалиста. Развитие этих умений и навыков в полной мере реализуется также при выполнении практических работ.

В настоящем сборнике представлены практические работы согласно учебному плану. Каждая практическая работа содержит теоретическую часть, практическую часть, примеры решения задач, задачи для самоконтроля.

Теоретическая часть включает тот минимальный объем материала, который позволит студентам сознательно выполнять практическую работу. Примеры решения типовых задач по данной теме облегчат самостоятельную работу студентов при выполнении практической части и позволят правильно оформить расчетную часть. Практическая часть представляет собой перечень задач, которые используются преподавателем при составлении вариантов задания для каждого студента.

При выполнении практических работ студенты имеют право пользоваться справочной литературой и вычислительной техникой.

Практические занятия рассчитаны на 40 часов, описание которых изложено со следующей последовательностью:

• название практической работы;

• цель работы;

• теоретическая часть;

• задачи для самостоятельного решения.

Полученные знания и экспериментальные навыки помогут студенту при изучении других специальных дисциплин.

В конце рекомендаций указан список литературы, необходимый для выполнения практических занятий.

**Критерии оценки:**

Оценка знаний, обучающихся производится по пятибалльной системе.

Оценка «отлично» выставляется в случае полного выполнения всего объёма работы, отсутствия ошибок в расчётах при решении задач; грамотного и аккуратного оформления отчёта.

Оценка «хорошо» выставляется в случае полного выполнения всего объёма работы при наличии несущественных ошибок в вычислениях, не повлиявших на общий результат работы (ошибки при округлении чисел).

Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае в основном полного выполнения всех разделов работы при наличии ошибок, которые не оказали существенного влияния на окончательный результат, а также за работу, выполненную несвоевременно по неуважительной причине.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, когда допущены принципиальные ошибки в вычислениях: перепутаны формулы, нарушена последовательность выполнения вычислений, работа выполнена крайне небрежно и т.п.

**Правила выполнения и оформления практических работ**

1. Студент должен выполнить практическую работу в соответствии с полученным заданием.

2. Каждый студент после выполнения работы должен представить отчет о проделанной работе.

3. Отчет о проделанной работе следует выполнять в тетрадях для практических работ.

4. Отчет о проделанной работе должен быть оформлен в соответствии с требованиями к оформлению практических работ.

5. Если студент не выполнил практическую работу или часть работы, то он может выполнить работу во внеурочное время, согласовав с преподавателем.

6. Оценку по практической работе студент получает, с учетом срока выполнения работы, если:

- работа выполнена правильно и в полном объеме;

- студент может пояснить выполнение любого этапа работы;

- отчет выполнен в соответствии с требованиями к выполнению работы.

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № ПЗ | Содержание лабораторных занятий | Норма времени, час |
| 1 | Практическое занятие № 1. Расчет коэффициента горючести. | 2 |
| 2 | Практическое занятие № 2. Составление уравнений реакций горения в кислороде и в воздухе. Расчет молей (кмолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения. | 2 |
| 3 | Практическое занятие № 3. Расчет объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества. | 2 |
| 4 | Практическое занятие № 4. Расчет объема воздуха, необходимого для горения газовой смеси. | 2 |
| 5 | Практическое занятие № 5. Расчет объема воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава. | 2 |
| 6 | Практическое занятие № 6. Расчет объема и процентного состава продуктов горения индивидуального вещества. | 2 |
| 7 | Практическое занятие № 7. Расчет объема и процентного состава продуктов горения газовой смеси. | 2 |
| 8 | Практическое занятие № 8. Расчет объема и процентного состава продуктов горения вещества сложного элементного состава. | 2 |
| 9 | Практическое занятие № 9.Расчет теплового эффекта реакции горения индивидуального вещества. | 2 |
| 10 | Практическое занятие № 10. Расчет низшей теплоты сгорания *∆Н* по формуле Д.И. Менделеева. | 2 |
| 11 | Практическое занятие № 11. Расчет действительной температуры горения индивидуального вещества. | 2 |
| 12 | Практическое занятие № 12. Расчет действительной температуры горения сложного вещества с известным элементным составом. | 2 |
| 13 | Практическое занятие №13. Расчет максимального давления взрыва газов и паров. | 2 |
| 14 | Практическое занятие № 14. Расчет избыточного давления взрыва индивидуальных веществ. | 4 |
| 15 | Практическое занятие № 15. Расчет тротилового эквивалента взрыва. | 2 |
| 16 | Практическое занятие № 16. Расчет радиуса зон разрушения. | 2 |
| 17 | Практическое занятие № 17. Определение взрывоопасности смеси горючих газов. | 6 |
|  | **Всего** | **40** |

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ**

**Практическое занятие № 1.**

**Тема: «Расчет коэффициента горючести».**

**Цель:** научиться определять коэффициент горючести.

**Теоретическая часть:**

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 **К** 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.

Для расчета коэффициента горючести можно использовать следующую формулу:

К = 4 ·n (С)+ 4 · n(S) + n(H) + n(N) - 2· n(O) - 2· n(Cl) - 3 · n(F) - 5 ·n(Br) (1.1)

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

Если коэффициент горючести К больше или равен единице (К ≥ 1), то вещество является **горючим**.

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

**Пример.** Рассчитать коэффициент горючести глюкозы С6Н12О6 и угольной кислоты H2CO3.

Решение.

1. В молекуле глюкозы содержится атомов:

углерода *n(C)* = 6; водорода *n(Н)* = 12; кислорода *n(О)* = 6.

Подставляя количество атомов в формулу 1.1, имеем К = 4·6 + 12 – 2·6 = 24.

**К > 1**, следовательно, глюкоза – горючее вещество.

1. В молекуле угольной кислоты *n(Н)* = 2; *n(Cl)* = 1; *n(О)* = 3; К = 2 + 4 – 2·3 = 0.

**К < 1,** следовательно, угольная кислота – негорючее вещество.

**Задание для самостоятельной работы**

**Задача 1.** Рассчитать коэффициент горючести приведенных веществ (табл. 1).

Таблица 1

**Задание к задаче 1.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № вар | Вещества | |
| 1 | метионин С5Н11NO2S | азотная кислота HNO3 |
| 2 | сахароза С12Н22О11 | щавелевая кислота Н2С2О4 |
| 3 | дихлорэтилен С2Н4Cl2 | лимонная кислота С6H8O7 |
| 4 | дихлорметан СН2Cl2 | уксусная кислота С2H4O2 |
| 5 | глутамин С5Н10N2O3 | хлорметан СH3Cl |
| 6 | аспартам С14Н18N2O5 | фосген СОCl2 |
| 7 | хинин С20Н24O2N2 | серная кислота Н2SO4 |
| 8 | аспарагин С4Н8N2O3 | хлорметан СН3Cl |
| 9 | нитробензол С6Н5NO2 | сероуглерод СS2 |
| 10 | анилин С6Н5NН2 | метан СН4 |
| 11 | мочевина NН2СОNН2 | диоксид хлора СlO2 |
| 12 | винная кислота Н2С4Н4О6 | сернистая кислота H2SO3 |
| 13 | формамид НСОNН2 | хлористая кислота HClO2 |
| 14 | глицин С2Н5NО2 | циклогексан С6H12 |
| 15 | бутиловый спирт С4Н9ОН | ацетилен С2H2 |
| 16 | диэтиловый эфир С4Н10О | толуол С7H8 |
| 17 | фенол С6Н5ОН | кетен СH2СО |
| 18 | нитрат аммония NH4NO3 | антрацен С14H10 |
| 19 | стеариновая кислота С18Н36О2 | этилен С2H4 |
| 20 | диметилсульфид СН3SCH3 | бензол С6H6 |

**Практическое занятие № 2.**

**Тема: «Составление уравнений реакций горения в кислороде и в воздухе».**

**Расчет молей (кмолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения».**

**Цель:** научиться составлять уравнения реакций горения в кислороде и в воздухе, рассчитывать количество молей исходных веществ и продуктов реакции.

**Теоретическая часть:**

**1. Составление уравнений реакций горения в кислороде.**

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 2 приведены элементы, входящие в состав горючего вещества, и вещества, образующиеся в результате сгорания.

Таблица 2

Состав продуктов горения от состава исходного вещества

|  |  |
| --- | --- |
| Элементы, входящие в  состав горючего вещества | Продукты горения |
| Углерод С | Углекислый газ СО2 |
| Водород Н | Вода Н2О |
| Сера S | Оксид серы (IV) SO2 |
| Азот N | Молекулярный азот N2 |
| Фосфор Р | Оксид фосфора (V) Р2О5 |
| Галогены F, Cl, Br, I | Галогеноводороды HCl, HF, HBr, HI |

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

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

**Пример.** Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана С3Н8, глицерина С3Н8О3, аммиака NH3, сероуглерода CS2.

Решение.

### *Горение пропана в кислороде*

1. Записываем реакцию горения

С3Н 8 + О2 = СО2 + Н2О

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

С3Н 8 + О2 = 3СО2 + Н2О

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

С3Н8 + О2 = 3СО2 + 4Н2О

1. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения 2 ∙3 +4 =10
2. В левой части уравнения также должно быть 10 атомов кислорода. Молекула кислорода состоит из двух атомов, следовательно, перед кислородом нужно поставить коэффициент 5.

С3Н8 + 5О2 = 3СО2 + 4Н2О, тогда β=5

**2. Составление уравнений реакций горения в воздухе**

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 (О2 + 3,76N2).**

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 ºС в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

**Пример.** Составить уравнение реакции горения в воздухе водорода Н2, анилина С6Н5NH2, пропанола С3Н7ОН, угарного газа СО.

Решение.

Горение водорода в воздухе Н2 + 0,5∙(О2 + 3,76N2)=Н2О + 0,5∙3,76N2, т.е. β=0,5

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

**3. Расчет молей (киломолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения**

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

**Пример.** Сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании 1 моля бензойной кислоты С6Н5СООН?

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бензойной кислоты.

С6Н5СООН + 7,5∙ (О2 + 3,76N2) =7СО2 + 3Н2О + 7,5∙3,76N2

2. Исходные вещества:

1 моль бензойной кислоты;

7,5 молей кислорода;

7,5∙3,76 молей азота.

Газов воздуха всего 7,5∙4,76 молей.

Всего (1 + 7,5∙4,76) молей исходных веществ.

3. Продукты горения:

7 молей углекислого газа;

3 моля воды; 7,5∙3,76 моля азота.

Всего (7 + 3 + 7,5∙3,76) молей продуктов горения.

Аналогичные соотношения и в том случае, когда сгорает 1 кмоль бензойной кислоты.

*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.

**Задание для самостоятельной работы**

**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 табл. 3.

Таблица 3

**Задание к задаче 2**

|  |  |
| --- | --- |
| № вар. | Вещество |
| 1 | ацетилен С2Н2 |
| 2 | нитробензол С6Н5NO2 |
| 3 | толуол С7Н8 |
| 4 | метан СН4 |
| 5 | этанол С2Н5ОН |
| 6 | бензол С6Н6 |
| 7 | диэтиловый эфир С4Н10О |
| 8 | бутан С4Н10 |
| 9 | пентанол С5Н11ОН |
| 10 | фенол С6Н5ОН |
| 11 | ксилол С8Н10 |
| 12 | этилен С2Н4 |
| 13 | этиловый эфир уксусной кислоты С4Н8О2 |
| 14 | бутилен С4Н8 |
| 15 | метанол СН3ОН |
| 16 | формальдегид СН2О |
| 17 | дихлорэтилен С2Н4Cl2 |
| 18 | винилхлорид С2Н3Cl |
| 19 | хлорид аммония NН4Cl |
| 20 | бромэтан С2Н5Br |

**Практическое занятие № 3.**

**Тема: «Расчет объема воздуха, необходимого для горения**

**индивидуального вещества».**

**Цель:** научиться рассчитывать объем воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества.

**Теоретическая часть:**

*Расчет объема воздуха, необходимого для горения.*

Расчет объема воздуха, необходимого для горения, предполагает вычисление:

а) теоретического объема воздуха *Vв теор*;

б) практического объема воздуха *Vв пр*, 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 (*Vв 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 ∆*Vв* в реакции горения не расходуется, и удаляется из зоны реакции вместе с продуктами горения. Таким образом, практический объем воздуха равен

*Vв пр = Vв теор +* ∆*Vв* (1.2)

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

∆*Vв = Vв пр -  Vв теор* (1.3)

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.

∆*Vв = Vв теор(*α-1) (1.4)

Величина ***α является*** важной характеристикой машин и агрегатов, в которых осуществляется организованное горение.

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

Почти всегда ***α несколько*** больше единицы и находится в интервале значений 1,02–1,3 в зависимости от характера сжигаемого вещества. Именно этим обусловлено название коэффициента ***α* -** коэффициент *избытка* воздуха. В действительности для кинетического горения его значения могут быть как больше, так и меньше 1.

При ***α*** > 1 горючую смесь называют *бедной по горючему компоненту*, а при ***α***< 1 – *богатой по горючему компоненту*. В технике этипонятия имеют очень большое значение для правильного управленияорганизованным горением (двигатели внутреннего сгорания, теплогенерирующие агрегаты и т.д.).

Избыток воздуха имеется только в смеси, бедной по горючему компоненту. Из формул (1.3) и (1.4) следует

∆*Vв = Vв теор(*α-1) (1.5)

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 Νφ*(*О2*)*ПГ.*** Для большинства органических веществ она составляет 12–16% О2. Для некоторых веществ, например ацетилена С2Н2, ряда металлов, горение возможно и при значительно меньшем содержании кислорода (до 5 % объемных О2).

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:

α= 21/21φ(О2) ПГ (1.6)

Анализ уравнения (1.6) показывает, что αне может быть меньше 1, и, в среднем, для диффузионных режимов горения находится в интервале от 2 до 5.

**Пример.** Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира С2Н5ОС2Н5? Температура 10 ºС, давление 1,2 атм.

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения

С2Н5ОС2Н5 +6 ∙ (О2 + 3,76N2) =4СО2 + 5Н2О + 6∙3,76N2

Записываем в уравнении известные и неизвестные величины с указанием размерности.

1 кг *х* м3

С2Н5ОС2Н5 +6 ∙ (О2 + 3,76N2) =4СО2 + 5Н2О + 6∙3,76N2

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

1 кг *х* м3

С2Н5ОС2Н5 +6 ∙ (О2 + 3,76N2) =4СО2 + 5Н2О + 6∙3,76N2

М=74 кг.

1. При нормальных условиях молярный объем (*VМ*) 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 *VМ* ведут по формуле объединенного газового закона:

*VМ* =

где *Р* и *Т* – данные в задаче температура и давление.

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

1. *VМ* = = = 19,35 м3/кмоль.

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

1 кг *х* м3

С2Н5ОС2Н5 +6 ∙ (О2 + 3,76N2) =4СО2 + 5Н2О + 6∙3,76N2

М=74 кг (6∙4,76)∙ 19,35 м3

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

*Vвпр* =7,5 м3

**Пример.** Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 50 кг ацетона СН3СОСН3 при температуре 23 ºС и давлении 95 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,2?

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения

50 кг *х* м3

СН3СОСН3 +4∙ (О2 + 3,76N2) =3СО2 + 3Н2О + 4∙3,76N2

М = 58 кг 4 ∙4 ,76∙*VМ* =4 ∙4 ,76∙25,9

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

*VМ* = = = 25,9 м3/кмоль.

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

*Vвтеор* =425,1 м3

4.По условию задачи коэффициент избытка воздуха α=1,2

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

*Vвпр* =*Vвтеор* ∙α = 425,1 ∙1 ,2 = 510,1 м3.

**Задание для самостоятельной работы**

**Задача 3**. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания *m* кг вещества, при заданной температуре и давлении? Исходные данные по вариантам приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Задание к задаче 3**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар. | Вещество | Масса,  кг | Температура, ºС | Давление,  атм |
| 1 | ацетилен С2Н2 | 1 | 11 | 1,2 |
| 2 | нитробензол С6Н5NO2 | 2 | 12 | 1,2 |
| 3 | толуол С7Н8 | 3 | 13 | 1,2 |
| 4 | метан СН4 | 4 | 14 | 1,2 |
| 5 | этанол С2Н5ОН | 5 | 15 | 1,2 |
| 6 | бензол С6Н6 | 6 | 16 | 1,3 |
| 7 | диэтиловый эфир С4Н10О | 7 | 17 | 1,3 |
| 8 | бутан С4Н10 | 8 | 18 | 1,3 |
| 9 | пентанол С5Н11ОН | 9 | 19 | 1,3 |
| 10 | фенол С6Н5ОН | 10 | 20 | 1,3 |
| 11 | ксилол С8Н10 | 11 | 21 | 1,4 |
| 12 | этилен С2Н4 | 12 | 22 | 1,4 |
| 13 | этиловый эфир уксусной кислоты С4Н8О2 | 13 | 23 | 1,4 |
| 14 | бутилен С4Н8 | 14 | 24 | 1,4 |
| 15 | метанол СН3ОН | 15 | 25 | 1,4 |
| 16 | формальдегид СН2О | 16 | 8 | 1,1 |
| 17 | дихлорэтилен С2Н4Cl2 | 17 | 9 | 1,1 |
| 18 | винилхлорид С2Н3Cl | 18 | 10 | 1,1 |
| 19 | хлорид аммония NН4Cl | 19 | 11 | 1,1 |
| 20 | бромэтан С2Н5Br | 20 | 12 | 1,1 |

**Практическое занятия № 4.**

**Тема: «Расчет объема воздуха, необходимого для горения газовой смеси».**

**Цель:** научиться рассчитывать объем воздуха, необходимого для горения газовой смеси.

**Теоретическая часть:**

Природный, попутный нефтяной газ, промышленные газы (доменный, коксовый, генераторный и т.п.) представляют собой смеси газов. Состав газов выражается обычно в объемных процентах (φ 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 в теор.= ∙ V гс (2.1)

где β1, β2, β3 – стехиометрические коэффициенты при воздухе в уравнении реакции горения для каждого горючего компонента газовой смеси;

– концентрации каждого горючего компонента смеси (в объемных %);

φ (О2) – процентное содержание кислорода в горючем газе (в объемных %);

Vгс – объем газовой смеси, м3.

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

Vвпр = Vвтеор ∙α

**Пример.** Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 10 м3 доменного газа следующего состава (в % объемных): оксид углерода (II) СО – 27 %; водород Н2 – 3 %; углекислый газ СО2 – 13 %; метан СН4 – 1 %; азот N2 – 56 %. Горение протекает при α = 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 СО, водород Н2 и метан СН4.

СО + 0,5(О2 +3,76N2 ) = СО2 + 0,5 ∙3,76N2 β1 = 0,5;

Н2 +0,5(О2 +3,76N2 ) = H2O+0,5∙ 3,76N2 β2 = 0,5;

CH4 + 2(O2 +3,76N2 ) = CO2 + 2H O2 + 2 ∙3 ,76N2 β3 = 2.

2.По формуле (2.1) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

*Vтеор* = =8,1 м3

3.С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной газовой смеси будет затрачено воздуха *Vвпр* =*Vвтеор* ∙α= 8,1∙ 1,3 =10,5 м3.

**Задание для самостоятельной работы**

**Задача 4.** Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания х м3 данной горючей газовой смеси имеющегося состава. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха α. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.

Таблица 5

**Задание к задаче 4**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар. | Газовая смесь | Состав газовой смеси, % | Объем газовой смеси, м3 | Коэффициент избытка воздуха,  α |
| 1 | Доменный газ | оксид углерода (II) СО – 27 %, водород Н2 – 3 %, углекислый газ СО2 – 13 %, метан СН4 – 1 %, азот N2 – 56 % | 15 | 1,2 |
| 2 | Водяной газ | оксид углерода (II) СО – 3 %, водород Н2 – 50 %, углекислый газ СО2 – 10 %, метан СН4 – 5 %, азот N2 – 6 % | 20 | 1,1 |
| 3 | Водяной газ | оксид углерода (II) СО – 35 %, водород Н2 – 40 %, углекислый газ СО2 – 5 %, метан СН4 – 14 %, азот N2 – 6 % | 100 | 1,2 |
| 4 | Водяной газ | оксид углерода (II) СО – 40 %, водород Н2 – 50 %, углекислый газ СО2 – 4 %, метан СН4 – 1 %, азот N2 – 5 % | 60 | 1,3 |
| 5 | Природный газ | водород Н2 – 4 %, метан СН4 – 86 %, этан С2Н6 – 2 %, пропан С3Н8 – 4 %, бутан С4Н10 – 4 % | 80 | 1,4 |
| 6 | Природный газ | метан СН4 – 90 %, углекислый газ СО2 – 1 %, азот N2 – 1 %, этан С2Н6 – 5 %, пропан С3Н8 – 4 % | 90 | 1,4 |
| 7 | Светильный газ | оксид углерода (II) СО – 10 %, водород Н2 – 50 %, метан СН4 – 30 %, углекислый газ СО2 – 3 %, кислород О2 – 2 %, азот N2 – 5 % | 85 | 1,5 |
| 8 | Светильный газ | оксид углерода (II) СО – 20 %, водород Н2 – 50 %, метан СН4 – 23 %, углекислый газ СО2 – 3 %, азот N2 – 2 %, этан С2Н6 – 2 % | 35 | 1,0 |
| 9 | Коксовый газ | оксид углерода (II) СО – 7 %, водород Н2 – 57 %, метан СН4 – 22 %, углекислый газ СО2 – 2 %, азот N2 – 8 %, вода Н2О – 4 % | 45 | 1,1 |
| 10 | Саратовский природный газ | метан СН4 – 92 %, этан С2Н6 – 8 % | 50 | 1,1 |
| 11 | Ухтинский природный газ | метан СН4 – 88 %, углекислый газ СО2 – 4 %, азот N2 – 5 %, этан С2Н6 – 2 %, пропан С3Н8 – 1 %, бутан С4Н10 – 1 % | 65 | 1,1 |
| 12 | Дашавский природный газ | метан СН4 – 98 %, азот N2 – 1 %, этан С2Н6 – 1 %, пропан С3Н8 – 1 % | 85 | 1,2 |
| 13 | Попутный нефтяной газ | метан СН4 – 42 %, азот N2 – 8 %, этан С2Н6 – 20 %, пропан С3Н8 – 20 %, бутан С4Н10 – 10 % | 70 | 1,4 |
| 14 | Шебелинский природный газ | метан СН4 – 92 %, углекислый газ СО2 – 2 %, азот N2 – 2 %, этан С2Н6 – 3 %, пропан С3Н8 – 2 %, бутан С4Н10 – 1 % | 75 | 1,5 |
| 15 | Генераторный газ | оксид углерода (II) CО – 30 %, водород Н2 – 15 %, метан СН4 – 5 %, углекислый газ СО2 – 10 %, азот N2 – 40 % | 55 | 1,3 |
| 16 | Воздушный газ | оксид углерода (II) СО – 33 %, водород Н2 – 10 %, метан СН4 – 1 %, углекислый газ СО2 – 1 %, азот N2 – 55 % | 40 | 1,3 |
| 17 | Бухарский газ | метан СН4 – 95 %, углекислый газ СО2 – 1 %, азот N2 – 1 %, этан С2Н6 – 4 % | 30 | 1,0 |
| 18 | Сжиженный газ | метан СН4 – 4 %, этан С2Н6 – 4 %, пропан С3Н8 – 79 %, бутан С4Н10 – 11 % | 25 | 1,1 |
| 19 | Биогаз | водород Н2 – 1 %, метан СН4 – 70 %, углекислый газ СО2 – 28 %, азот N2 – 1 %, сероводород Н2S – 1 % | 95 | 1,6 |
| 20 | Коксовый очищенный газ | оксид углерода (II) СО – 7 %, водород Н2 – 58 %, метан СН4 – 22 %, углекислый газ СО2 – 2 %, кислород О2 – 1 %, азот N2 – 8 %, этан С2Н6 – 2 %, сероводород Н2S – 1 % | 110 | 1,3 |

**Практическое занятия № 5.**

**Тема: «Расчет объема воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава».**

**Цель:** научиться рассчитывать объем воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава.

**Теоретическая часть:**

Состав веществ сложного элементного состава выражается в массовых долях (ω, %) каждого элемента. При горении кислород воздуха расходуется на окисление углерода С, водорода Н, серы S и других горючих составляющих.

Рассчитаем, какой теоретический объем воздуха необходим для сгорания 1 кг каждого элемента при нормальных условиях.

Углерод, водород и сера являются основными составляющими большинства органических соединений. Значительное число органических веществ имеют в своем составе кислород, и, следовательно, воздуха на горение будет затрачено меньше.

Теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг вещества сложного элементного состава в общем виде можно записать следующим образом:

Vвтеор = Vв (С) теор ∙+ Vв (Н) теор ∙ + Vв (S) теор ∙ - Vв (О) теор ∙ м3 (2.2)

где ω(С), ω(Н), ω(S), ω(О) – массовые доли элементов в веществе, %.

После подстановки в формулу (2.2) полученных выше расчетных значений теоретический объем воздуха для сгорания заданной массы (m) вещества сложного элементного состава при нормальных условиях определяется по формуле

Vвтеор = m∙0,267∙( - ) м3/кг (2.3)

**Пример.** Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 5 кг торфа следующего состава (в %): С – 56,4 %; Н – 5,04 %; О – 24,0 %; S – 0,06 %; N – 3,6 %; зола – 10,9 %. Горение протекает при α=1,5, условия нормальные.

Решение.

1. По формуле (2.3) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца торфа:

Vвтеор = m∙0,267∙( - ) = 27,7 м3

С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной массы образца торфа будет затрачено воздуха *Vвпр* =*Vвтеор* ∙*α* =27,7 ∙1,5 = 41,6 м3.

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 5.** Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания заданной массы вещества сложного элементного состава при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха α. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 6.

Таблица 6

**Задание к задаче 5.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар | Название вещества | Масса,  кг | Коэффициент избытка воздуха α | Состав вещества, % | | | | | | |
| С | Н | О | N | S | Влага | Зола |
| 1 | Каменный уголь | 6 | 1,4 | 76,0 | 4,8 | 3,6 | 2,8 | 1,8 | 2,8 | 8,2 |
| 2 | Мазут | 8 | 1,3 | 85,0 | 14,0 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | - |  |
| 3 | Древесина | 7 | 1,2 | 46,0 | 6,0 | 42,0 | - | - | 6,0 | - |
| 4 | Торф | 9 | 1,5 | 36,0 | 4,0 | 12,0 | 8,0 | - | 35,0 | -5,0 |
| 5 | Нефть | 10 | 1,4 | 84,0 | 14,0 | - | 1,0 | 1,0 | - | - |
| 6 | Каменный уголь | 5 | 1,3 | 79,4 | 5,3 | 10,3 | - | 2,82 | - | 2,18 |
| 7 | Керосин | 6 | 1,2 | 85,28 | 14,12 | 0,6 | - | - | - | - |
| 8 | Древесина | 7 | 1,4 | 41,5 | 6,0 | 43,0 | 2,0 | - | 7,5 | - |
| 9 | Полуантрацит | 8 | 1,2 | 90,4 | 4,3 | 4,3 | - | 1,0 | - | - |
| 10 | Торф | 9 | 1,0 | 43,0 | 7,0 | 41,0 | 2,0 | - | 7,0 | - |
| 11 | Каменный уголь | 10 | 1,2 | 83,4 | 10,0 | 0,1 | 0,3 | 2,9 | 3,0 | 0,3 |
| 12 | Мазут | 11 | 1,2 | 83,4 | 10,0 | 0,1 | 0,3 | 2,9 | 3,0 | 0,3 |
| 13 | Уголь | 12 | 1,3 | 75,0 | 4,0 | 6,0 | 3,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 |
| 14 | Сланец | 4 | 1,4 | 38,8 | 3,2 | 4,0 | 0,1 | 1,5 | 15,0 | 37,4 |
| 15 | Уголь | 3 | 1,5 | 37,2 | 2,6 | 12,0 | 0,4 | 0,6 | 40,0 | 7,2 |
| 16 | Бензин | 2 | 1,6 | 85,0 | 14,9 | 0,02 | 0,03 | 0,15 | - | - |
| 17 | Уголь | 1 | 1,7 | 29,1 | 2,2 | 8,7 | 0,6 | 2,9 | 33,0 | 23,5 |
| 18 | Березовский уголь | 5 | 1,2 | 44,3 | 3,0 | 14,4 | 0,4 | 0,2 | 33,0 | 4,7 |
| 19 | Мазут малосернистый | 6 | 1,3 | 85,8 | 8,7 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 3,8 | 0,2 |
| 20 | Мазут высокосернистый | 7 | 1,4 | 83,7 | 11,5 | 0,5 | - | 0,4 | - | 0,3 |

**Практическое занятие № 6.**

**Тема: «Расчет объема и процентного состава продуктов горения**

**индивидуального вещества».**

**Цель:** научиться рассчитывать объем и процентный состав продуктов горения индивидуальных веществ.

**Теоретическая часть:**

Практически всегда органические вещества горят с образованием продуктов полного и неполного горения.

К **продуктам полного сгорания** относятся: углекислый газ, образующийся при горении углерода, разложении карбонатов; водяной пар, образующийся при горении водорода и испарении влаги в исходном веществе; оксид серы (IV) SO2 и азот – продукты горения соединений, содержащих серу и азот.

**Продукты неполного сгорания** – угарный газ СО (оксид углерода (II)), сажа, С, продукты термоокислительного разложения – смолы.

Неорганические вещества сгорают, как правило, до соответствующих оксидов.

Выход продуктов горения количественно установить невозможно из-за чрезвычайной сложности их состава, поэтому материальный баланс процесса горения рассчитывается из предположения, что вещество сгорает полностью до конечных продуктов. При этом в состав продуктов горения включают также азот воздуха, израсходованного на горение, и избыток воздуха при α > 1.

Как и в случае расчета объема воздуха, необходимого для горения, свои особенности имеет расчет продуктов горения для индивидуальных веществ, смеси газов и веществ с известным элементным составом.

В случае индивидуального химического соединения объем и состав продуктов горения рассчитывается по уравнению реакции горения.

Следует обратить внимание, что более половины объема всех продуктов горения – это азот воздуха, израсходованного на горение. Если же горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α> 1, то избыточный воздух также составляет значительную часть продуктов горения.

**Пример.** Определить объем и состав в объемных % продуктов горения, образовавшихся при сгорании 3 кг бензола С6Н6. Температура 20 ºС, давление 770 мм рт ст., коэффициент избытка воздуха α=1,4.

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения и вписываем все известные и неизвестные величины:

3 кг *х*1 м3 *х*2 м3  *х*3 м3  *х*4 м3

С6Н6 +7,5(О2 +3,76N2) = 6СО2 +3Н О2 +7,5∙ 3,76N2

М = 78 кг 7,5∙ 4,76∙*VМ*  6∙*VМ*  3∙*VМ*  7,5∙ 3,76∙*VМ* .

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

*VМ* = = = 23,7 м3/кмоль.

3.Теоретический объем продуктов горения (*VПГ*) определяем по уравнению реакции

*VПГ* = = 33,9 м3

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

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

Vтеор = х1= = 32,5 м3

Избыток воздуха определим по формуле

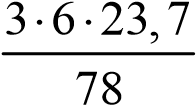
∆Vв = Vвтеор∙(α-1)=32,5∙(1,4-1)= 13м3

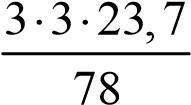
С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

*VПГ*\* =*VПГ* + ∆*Vв* = 33,9+13 = 46,9 м3

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

В этом случае по уравнению реакции определяем объем СО2, Н2О и N2.

*V*(*СО*2 ) = *х*2 =  =5,47 м3

*V*(*Н О*2 ) = *х*3 =  = 2,73 м3

*V N*( 2 ) = *х*4 == 25,71 м3

∆*Vв* = 13 м3.

Объемная концентрация каждого компонента смеси рассчитывается следующим образом:

*об V*(*СО*2) ∙100 5,47∙ 100

ϕ(*СО*2 ) = *VПГ*\*= 46,9 =11,7 %;

*об V*(*Н О*2)∙ 100 2,73 100

*φ* (*Н О*2 ) = *VПГ*\*= 46,9 = 5,8 %;

46,9

*об V (N* 2)∙ 100 = 25,71 100

*φ* (*N*2 ) = *VПГ*\*46,9= 54,8 %;

*об V (∆V* *в* )∙ 100 = 13 ∙100 = 27,7 %.

*φ* (∆*Vв* ) = *VПГ*\*46,9

Следует обратить внимание, что более половины объема всех продуктов горения – это азот воздуха, израсходованного на горение. Если же горение протекает с коэффициентом избытка воздуха *α* > 1, то избыточный воздух также составляет значительную часть продуктов горения.

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 6.** Определить объем и состав в объемных процентах продуктов горения, образовавшихся при сгорании заданной массы вещества при данных температуре и давлении. Горение протекает с избытком воздуха α. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 7.

Таблица 7

**Задание к задаче 6.**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар | Вещество | Масса,  кг | Температура, ºС | Давление, мм рт ст | Коэффициент избытка воздуха, α |
| 1 | Ацетилен С2Н6 | 1 | 10 | 750 | 1,0 |
| 2 | Нитробензол С6Н5NO2 | 2 | 11 | 760 | 1,1 |
| 3 | Толуол С7Н8 | 3 | 12 | 755 | 1,2 |
| 4 | Метан СН4 | 4 | 13 | 765 | 1,3 |
| 5 | Этанол С2Н5ОН | 5 | 14 | 740 | 1,4 |
| 6 | Бензол С6Н6 | 6 | 15 | 745 | 1,5 |
| 7 | Диэтиловый эфир С4Н10О | 7 | 16 | 770 | 1,0 |
| 8 | Бутан С4Н10 | 8 | 17 | 775 | 1,1 |
| 9 | Пентанол С5Н11ОН | 9 | 18 | 780 | 1,2 |
| 10 | Фенол С6Н5ОН | 10 | 19 | 785 | 1,3 |
| 11 | Ксилол С8Н10 | 11 | 20 | 790 | 1,4 |
| 12 | Этилен С2Н4 | 12 | 21 | 760 | 1,5 |
| 13 | Этиловый эфир уксусной кислоты С4Н8О2 | 13 | 22 | 765 | 1,0 |
| 14 | Бутилен С4Н8 | 14 | 23 | 770 | 1,1 |
| 15 | Метанол С4Н8ОН | 15 | 24 | 745 | 1,2 |
| 16 | Формальдегид СН2О | 16 | 25 | 750 | 1,3 |
| 17 | Дихлорэтилен С2Н4Cl2 | 17 | 26 | 755 | 1,4 |
| 18 | Винилхлорид С2Н3Cl | 18 | 15 | 775 | 1,5 |
| 19 | Хлорид аммония NН4Cl | 19 | 16 | 780 | 1,6 |
| 20 | Бромэтан С2Н5Br | 20 | 17 | 785 | 1,0 |

**Практическое занятие № 7.**

**Тема: «Расчет объема и процентного состава продуктов**

**горения газовой смеси».**

**Цель:** научиться рассчитывать объем и процентный состав продуктов горения газовой смеси.

**Теоретическая часть:**

При расчете продуктов горения газовой смеси необходимо знать, какой объем продуктов горения выделяется при сгорании 1 м3 каждого горючего газа смеси. Далее, зная процентное содержание (в объемных процентах) каждого горючего газа, вычислить суммарный объем образовавшихся продуктов горения. Если горение протекает с избытком воздуха, то в состав продуктов горения необходимо включить и избыточный воздух.

**Пример.** Определить объем и состав продуктов горения 10 м3 природного газа следующего состава (в % объемных): метан СН4 – 75 %; этан С2Н6 – 4 %; пропан С3Н8 – 2 %; углекислый газ СО2 – 19 %. Горение протекает при α=1,2.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения для всех горючих газов смеси

СН4 + 2(О2 +3,76N2 ) = СО2 + 2Н2О+ 2∙ 3,76N2 , т.е. β(СН4) = 2.

Для газообразных веществ отношение числа моль равно отношению объемов, следовательно, стехиометрические коэффициенты для каждого вещества в реакции горения – это и есть объем в м3 каждого компонента продуктов горения, выделившийся при сгорании 1 м3 горючего газа.

По уравнению реакции можно определить, что при сгорании 1 м3 метана СН4 образуется 1 м3 СО2, 2 м3 Н2О и 2∙3,76 м3 N2.

С2Н6 +3,5(О2 +3,76N2) = 2СО2 + 3Н2О+ 3,5∙ 3,76N2 , т.е. β(С2Н6) = 3,5

При сгорании 1 м3 этана С2Н6 образуется 2 м3 СО2, 3 м3 Н2О и 3,5∙3,76 м3 N2.

С3Н8 +5(О2 +3,76N2) = 3СО2 + 4Н2О+5∙3,76N2 , т.е. β(С3Н8) = 5

При сгорании 1 м3 этана С3Н8 образуется 3 м3 СО2, 4 м3 Н2О и 5∙3,76 м3 N2.

2. Определим теоретический объем продуктов горения.

Суммарный объем углекислого газа, образовавшегося при сгорании 1 м3 газовой смеси, определяется с учетом процентного состава каждого горючего компонента газовой смеси, и также включается объем углекислого газа, входящий в состав исходной газовой смеси:

V(СО2) = 1∙+2∙ + 3∙ + = 1∙+2∙ + 3∙ + = 1,08 м3

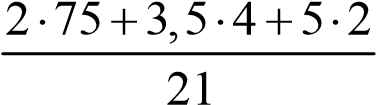
При сгорании 10 м3 газовой смеси объем образовавшегося углекислого газа составит

*V*(*СО*2 ) = 1,08 ∙10=10,8 м3

Аналогично рассчитываем объем паров воды, азота, образовавшийся в результате сгорания 1 м3 смеси газов.

Теоретический объем продуктов горения 10 м3 газовой смеси составит Vпг = (сложить все объемы).

3. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α = 1,2, следовательно, в состав продуктов горения войдет и избыток воздуха. Для его расчета по формуле (2.1) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

*Vв теор* =  ∙10 = 82,9 м3

Избыток воздуха определим по формуле (1.5)

∆*Vв* =*Vвтеор* ∙(α-1)=82,9 ∙(1, 2-1) = 16,6 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

*VПГ*\* =*VПГ* + ∆*Vв* = 93,3+16,6 =109,9 м3

1. Определим процентный состав продуктов горения:

φ об (СО2 ) = = = 9,8%

φ об (Н2О) = = = 15,5%

φ об (N2 ) = = = 59,6%

φ об (∆*Vв*) = = = 15,1%

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 7.** Определить объем и состав продуктов горения **х** м3 газовой смеси известного состава. Горение протекает с избытком воздуха. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 7.

Таблица 8

**Задание к задаче 7.**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар | Газовая смесь | Состав газовой смеси, % | Объем газовой смеси,  м3 | Коэффициент избытка воздуха, α |
| 1 | Коксовый очищенный газ | оксид углерода (II) СО – 7 %, водород Н2 – 58 %, метан СН4 – 23 %, углекислый газ СО2 – 3 %, кислород О2 – 1 %, азот N2 – 8 %, этан С2Н6 – 2 %, сероуглерод Н2S – 1 % | 11 | 1,1 |
| 2 | Биогаз | водород Н2 – 1 %, метан СН4 – 70 %, углекислый газ СО2 – 28 %, азот N2 – 1 %, сероуглерод Н2S – 1 % | 12 | 1,2 |
| 3 | Сжиженный газ | метан СН4 – 4 %, этан С2Н6 – 6 %, пропан С3Н8 – 79 %, бутан С4Н10 – 11 % | 13 | 1,3 |
| 4 | Бухарский газ | СО2 – 1 %, азот N2 – 1 %, этан С2Н6 – 4% | 14 | 1,4 |
| 5 | Воздушный газ | оксид углерода (II) СО – 34 %, водород Н2 – 10 %, метан СН4 – 1 %, углекислый газ СО2 – 1 %, азот N2 – 56 % | 15 | 1,5 |
| 6 | Генераторный газ | оксид углерода (II) СО – 30 %, водород Н2 – 15 %, метан СН4 – 5 %, углекислый газ СО2 – 10 %, азот N2 – 40 % | 16 | 1,4 |
| 7 | Шебелинский природный газ | метан СН4 – 92 %, углекислый газ СО2 – 2 %, азот N2 – 3 %, этан С2Н6 – 3 %, пропан С3Н8 – 2 %, бутан С4Н10 – 1 % | 17 | 1,3 |
| 8 | Попутный нефтяной газ | метан СН4 – 42 %, азот N2 – 8 %, этан С2Н6 – 20 %, пропан С3Н8 – 20 %, бутан С4Н10 – 10 % | 18 | 1,2 |
| 9 | Дашавский природный газ | метан СН4 – 98 %, азот N2 – 2 %, этан С2Н6 – 1 %, пропан С3Н8 – 1 % | 19 | 1,1 |
| 10 | Ухтинский природный газ | метан СН4 – 89 %, углекислый газ СО2 – 5 %, азот N2 – 5 %, этан С2Н6 – 2 %, пропан С3Н8 – 1 %, бутан С4Н10 – 1 % | 20 | 1,2 |
| 11 | Саратовский природный газ | метан СН4 – 93 %, этан С2Н6 – 8 % | 21 | 1,3 |
| 12 | Коксовый газ | оксид углерода (II) СО – 7 %, водород Н2 – 57 %, метан СН4 – 23 %, углекислый газ СО2 – 3 %, азот N2 – 8 %, вода Н2О – 4 % | 22 | 1,4 |
| 13 | Светильный газ | оксид углерода (II) СО – 20 %, водород Н2 – 50 %, метан СН4 – 23 %, углекислый газ СО2 – 3 %, азот N2 – 2 %, этан С2Н6 – 2 % | 23 | 1,5 |
| 14 | Светильный газ | оксид углерода (II) СО – 10 %, водород Н2 – 50 %, метан СН4 – 30 %, углекислый газ СО2 – 3 %, кислород О2 – 2 %, азот N2 – 5 % | 24 | 1,4 |
| 15 | Природный газ | метан СН4 – 90 %, углекислый газ СО2 – 0,5 %, азот N2 – 1 %, этан С2Н6 – 6 %, пропан С3Н8 – 4 % | 25 | 1,3 |
| 16 | Природный газ | водород Н2 – 4 %, метан СН4 – 86 %, этан С2Н6 – 2 %, пропан С3Н8 – 4 %, бутан С4Н10 – 4 % | 26 | 1,2 |
| 17 | Водяной газ | оксид углерода (II) СО – 40 %, водород Н2 – 50 %, метан СН4 – 1 %, углекислый газ СО2 – 5 %, азот N2 – 5 % | 27 | 1,1 |
| 18 | Водяной газ | оксид углерода (II) СО – 35 %, водород Н2 – 40 %, метан СН4 – 14 %, углекислый газ СО2 – 5 %, азот N2 – 6 % | 28 | 1,2 |
| 19 | Водяной газ | оксид углерода (II) СО – 4 %, водород Н2 – 49 %, метан СН4 – 5 %, углекислый газ СО2 – 10 %, азот N2 – 5,5 % | 29 | 1,3 |
| 20 | Доменный газ | оксид углерода (II) СО – 28 %, водород Н2 – 3 %, метан СН4 – 1 %, углекислый газ СО2 – 13 %, азот N2 – 57 % | 30 | 1,4 |

**Практическое занятие № 8.**

**Тема: «Расчет объема и процентного состава продуктов горения вещества**

**сложного элементного состава».**

**Цель:** научиться рассчитывать объем и процентный состав продуктов горения вещества сложного элементного состава.

**Теоретическая часть:**

В том случае, когда горючее – сложное вещество с известным элементным составом, теоретический выход продуктов горения определяется как сумма продуктов горения каждого элемента, входящего в состав вещества.

Рассчитаем, какой теоретический объем продуктов горения образуется при сгорании 1 кг каждого элемента при нормальных условиях.

Для этого составим пропорции:

для углерода

1 кг *х*1 м3  *х*2 м3

*С* +(*О*2 +3,76*N*2 ) = *СО*2 +3,76*N*2

12 кг 22,4м3  3,76∙22,4 м3

V(CO2)= х1= = 1,87 м3

V(*N* 2)= х2= = 7 м3

для водорода

для серы

для фосфора

В состав горючего вещества может входить азот, влага, которые удаляются вместе с продуктами горения.

Объем 1 кг азота при нормальных условиях составит

V(*N* 2)= = = 0,8 м3

При нормальных условиях 1 кг паров воды займет объем

V(*Н*2О)= = = 1,24 м3

Если в состав горючего вещества входит кислород, то при горении он будет расходоваться на окисление горючих компонентов (углерода, водорода, серы, фосфора), и поэтому из воздуха на горение будет израсходовано кислорода меньше на количество, которое содержалось в горючем веществе. Следовательно, в продуктах горения и азота будет меньше на количество, которое приходилось бы на кислород, если бы он находился не в горючем веществе, а в воздухе.

На 1 кг кислорода в воздухе будет приходиться объем азота, равный

V(*N* 2)= = = 2,63 м3

Полученные значения выходов продуктов горения элементов внесите в таблицу.

*Теоретический объем продуктов горения элементов сложных веществ при нормальных условиях.*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Элемент | Объем продуктов горения (м3) на 1 кг вещества | | | | |
| СО2 | Н2О | SO2 | Р2О5 | N2 |
| Углерод |  |  |  |  |  |
| Водород |  |  |  |  |  |
| Сера |  |  |  |  |  |
| Фосфор |  |  |  |  |  |
| Азот в горючем |  |  |  |  |  |
| Азот за счет кислорода в горючем |  |  |  |  |  |
| Влага в горючем |  |  |  |  |  |

Используя данные таблицы, можно вычислить объем продуктов горения любого вещества с известным элементным составом.

Пусть ω (С), ω (Н), ω (S), ω (О), ω (N) – массовые доли элементов в веществе, %;

ω (W) – содержание влаги в веществе, %.

Тогда общие формулы для расчета каждого компонента продуктов горения при сгорании заданной массы (m) вещества будут иметь следующий вид:

V(CO2)= m∙ ; м3 (2.4)

V(Н2О)= m∙( + ); м3 (2.5)

V(SO2)= m∙ ; м3 (2.6)

V(N2)= m∙( + м3 (2.7)

**Пример.** Определить объем и процентный состав продуктов горения 5 кг каменного угля следующего состава (в %): С – 75,8 %; Н – 3,8 %; О – 2,8 %; S – 2,5 %; N – 1,1 %; W – 3,0 %; зола – 11,0 %. Горение протекает при α=1,3, условия нормальные.

Решение.

1. По формулам (2.4) – (2.7) определяем объем каждого компонента продуктов горения 5 кг каменного угля.

V(CO2)= 5∙ = 7 м3

V(Н2О)= 5∙( + ) = 2,31 м3

V(SO2)= 5∙ = 0,085 м3

V(N2)= 5∙( + м3

2. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,3, следовательно, в состав продуктов горения будет входить избыточный воздух.

По формуле (2.3) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

Vвтеор = 5∙0,267∙( - ) = 38,6 м3

Избыток воздуха определим по формуле

∆*Vв* =*Vвтеор* ∙(α-1)= 38,6∙(1,3-1)=11,6 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

*VПГ*\* =*VПГ* + ∆*Vв* = 42,5+11,6 =54,1 м3

3. Определим процентный состав продуктов горения:

φ об (СО2 ) =

φ об (Н2О) =

φ об (SО2 ) =

φ об (N2 ) =

φ об (∆*Vв*) =

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 8.** Определить объем и процентный состав продуктов горения заданной массы вещества известного состава, при избытке воздуха и нормальных условиях. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 9.

Таблица 9

**Задание к задаче 8.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар | Название вещества | Масса  кг | Коэффициент избытка воздуха α | Состав вещества, % | | | | | | |
| С | Н | О | N | S | Влага | Зола |
| 1 | Мазут высокосернистый | 2 | 1,1 | 83,7 | 11,5 | 0,5 | 3,0 | 4,0 | 23,0 | 0,3 |
| 2 | Мазут высокосернистый | 3 | 1,2 | 85,8 | 8,7 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 3,8 | 0,2 |
| 3 | Березовский уголь | 4 | 1,3 | 44,3 | 3,0 | 14,4 | 0,4 | 0,2 | 33,0 | 4,7 |
| 4 | Уголь | 5 | 1,4 | 29,1 | 2,2 | 8,7 | 0,6 | 2,9 | 33,0 | 23,5 |
| 5 | Бензин | 6 | 1,5 | 85,0 | 14,9 | 0,02 | 0,03 | 0,15 | 1,2 | 0,3 |
| 6 | Уголь | 7 | 1,1 | 37,2 | 2,6 | 12,0 | 0,4 | 0,6 | 40,0 | 7,2 |
| 7 | Сланец | 8 | 1,2 | 38,8 | 3,2 | 4,0 | 0,1 | 1,5 | 15,0 | 37,4 |
| 8 | Уголь | 9 | 1,3 | 75,0 | 4,0 | 6,0 | 3,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 |
| 9 | Мазут | 10 | 1,4 | 83,4 | 10,0 | 0,1 | 0,3 | 2,9 | 3,0 | 0,3 |
| 10 | Каменный уголь | 11 | 1,5 | 76,0 | 4,5 | 3,5 | 1,8 | 4,7 | 3,0 | 6,5 |
| 11 | Торф | 2 | 1,1 | 43,0 | 7,0 | 41,0 | 2,0 | 3,3 | 7,0 | 11,5 |
| 12 | Полуантрацит | 3 | 1,2 | 90,4 | 4,3 | 4,3 | 0,2 | 1,0 | 0,5 | 1,0 |
| 13 | Древесина | 4 | 1,3 | 41,5 | 6,0 | 43,0 | 2,0 | 1,5 | 7,5 | 8,3 |
| 14 | Керосин | 5 | 1,4 | 85,28 | 14,12 | 0,6 | 3,0 | 2,0 | 11,3 | 4,0 |
| 15 | Каменный уголь | 6 | 1,5 | 79,4 | 5,3 | 10,3 | 0,7 | 2,82 | 21,3 | 2,18 |
| 16 | Нефть | 7 | 1,1 | 84,0 | 14,0 | 13,0 | 1,0 | 1,0 | 18,3 | 4,5 |
| 17 | Торф | 8 | 1,2 | 36,0 | 4,0 | 12,0 | 8,0 | 0,7 | 35,0 | 5,0 |
| 18 | Древесина | 9 | 1,3 | 46,0 | 6,0 | 42,0 | 3,7 | 1,6 | 6,0 | 3,8 |
| 19 | Мазут | 10 | 1,4 | 85,0 | 14,0 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 20 | Каменный уголь | 11 | 1,5 | 76,0 | 4,8 | 3,6 | 2,8 | 1,8 | 2,8 | 8,2 |

**Практическое занятие № 9.**

**Тема: «Расчет теплового эффекта реакции горения**

**индивидуального вещества».**

**Цель:** научиться рассчитывать тепловой эффект реакции горения индивидуального вещества.

**Теоретическая часть:**

Для расчетов параметров процессов горения и взрыва используется низшая теплота сгорания **Qн**, поскольку температура горения значительно выше 373К (100оС) и выделяющаяся при горении вода и влага вещества будут испаряться.

Низшую теплоту сгорания можно определить, если воспользоваться **следствием из закона Гесса:** теплота сгорания (тепловой эффект химической реакции горения) равна разности между суммой теплот образования продуктов горения и суммой теплот образования исходных веществ.

**Qн = n∑∆Нобр.продуктов горения - n∑∆Нобр.горючего вещества.**

**Пример.** Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль бутана С4Н10. (Использовать приложение 1).

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бутана.

С4Н10 + 6,5(*О*2 +3,76*N*2 ) = 4*CO*2 + 5*Н О*2 + 6,5 ∙ 3, 76*N*2

1. Выражение для теплового эффекта этой реакции по I следствию закона Гесса

Qн = ∑∆Нобр.продуктов горения - n∑∆Нобр.горючего вещества.

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

2. Подставляем эти значения в выражение для теплового эффекта реакции

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 9.** Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль заданного вещества и выразить полученную величину в кДж/кг. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 10.

Таблица 10

**Задание к задаче 9.**

|  |  |
| --- | --- |
| № вар. | Вещество |
| 1 | Нитробензол – C6H5NO2 |
| 2 | Анилин – C6H5NН2 |
| 3 | Пентан – C5H12 |
| 4 | Глицерин – C3H8О3 |
| 5 | Ацетон – СН3СОСН3 |
| 6 | Этаналь – СН3СОН |
| 7 | Метаналь – НСОН |
| 8 | Изопропиловый спирт – С3Н8О |
| 9 | Пропиловый спирт – С3Н7ОН |
| 10 | Этиловый спирт – С2Н5ОН |
| 11 | Метиловый спирт – СН3ОН |
| 12 | Толуол – С7Н8 |
| 13 | Бензол – С6Н6 |
| 14 | Пропен – С3Н6 |
| 15 | Этилен – С2Н4 |
| 16 | Ацетилен – С2Н2 |
| 17 | Циклогексан – С6Н12 |
| 18 | Октан – С8Н18 |
| 19 | Гептан – С7Н16 |
| 20 | Гексан – С6Н14 |

**Практическое занятие № 10.**

**Тема: «Расчет низшей теплоты сгорания *∆Н* по формуле Д.И. Менделеева».**

**Цель:** научиться рассчитывать низшую теплоту сгорания по формуле Д.И. Менделеева.

**Теоретическая часть:**

При расчете теплоты сгорания веществ сложного состава (древесина, нефть, торф) теплота сгорания определяется для каждого химического элемента, входящего в вещество с учетом их процентного содержания. На основе этого принципа Д.И.Менделеев получил формулу для расчета теплоты сгорания веществ сложного состава:

**Qн = 339.4 ∙ω(С) + 1257∙ω(Н)-108,9[(ω(О)+ ω(N)- ω(S)]-25,1∙[9∙ ω(Н)+ ω(W)],** кДж/кг

где - ω(С), ω(Н), ω(О), ω(N), ω(S)- массовые доли элементов в веществе, %;

ω(W)-содержание влаги в веществе.

Теплота горения смеси газов и паров определяется как сумма произведений теплоты горения каждого горючего компонента (QН) на его объемную долю в смеси (φоб)

Qн = Qн(1) ∙ + Qн(2) ∙ + Qн(3) ∙ … кДж/м3

**Пример.** Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина С12Н14О2N4S по формуле Д.И. Менделеева.

Решение.

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

Молярная масса сульфадимезина С12Н14О2N4Sсоставляет 278 г/моль. Тогда

*ω*( *С*) = =51,8 %,

аналогично рассчитываем ω(N), ω(О), ω(Н),ω(S)

Подставляем найденные значения в формулу Д.И. Менделеева

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 10.** Вычислить низшую теплоту сгорания заданного вещества по формуле Д.И. Менделеева. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 11.

Таблица 11

**Задание к задаче 10.**

|  |  |
| --- | --- |
| № вар. | Вещество |
| 1 | Ацетат аммония – NН4С2Н3О2 |
| 2 | Метионин – С5Н11NО2S |
| 3 | Анилин – С6Н5NН2 |
| 4 | Диметилфосфат – (СН3)2НРО4 |
| 5 | Пентанол – С5Н11ОН |
| 6 | Глицин – Н2NСН2СООН |
| 7 | Хинин – С20Н24О2N2 |
| 8 | Этиленгликоль – СН2ОНСН2ОН |
| 9 | Хлоруксусная кислота – СН2СlСООН |
| 10 | Сульфаниловая кислота – NН2С6Н4SО3Н |
| 11 | Мочевина – NН2СОNН2 |
| 12 | Аспартам – С14Н18N2О5 |
| 13 | Глутамин – С5Н10N2О3 |
| 14 | Бензойная кислота – С6Н5СООН |
| 15 | Пропен – СН3СНСН2 |
| 16 | Винная кислота – Н2С4Н4О6 |
| 17 | Никотиновая кислота – С5Н4NСООН |
| 18 | Пропанол-1 – СН3СН2СН2ОН |
| 19 | Нитробензол – С6Н5NО2 |
| 20 | Бромэтан – СН3СН2Br |

**Практическое занятие № 11.**

**Тема: «Расчет действительной температуры горения**

**индивидуального вещества».**

**Цель:** научиться рассчитывать действительную температуру горения индивидуального вещества.

**Теоретическая часть:**

Выделяющееся в зоне горения тепло расходуется на нагревание продуктов горения, на нагрев горючего вещества и окружающей среды. Та температура, до которой в процессе горения нагреваются продукты горения, называется температурой горения. В технике и пожарном деле различают теоретическую, калориметрическую, адиабатическую и действительную температуру горения.

**Теоретическая температура горения** – это температура, при которой выделившаяся теплота горения смеси стехиометрического состава расходуется на нагрев и диссоциацию продуктов горения. Практически диссоциация продуктов горения начинается при температурах выше 2000 К.

**Калориметрическая температура горения** – это температура, которая достигается при горении стехиометрической горючей смеси с начальной температурой 273 К и при отсутствии потерь в окружающую среду. Теоретическая и калориметрическая температура горения парогазовых смесей широко используется при оценке пожарной опасности веществ. Кроме того, ее можно применять для расчета максимального давления взрыва при горении парогазовой смеси в замкнутом объеме.

**Адиабатическая температура горения** – это температура полного сгорания смесей любого состава (коэффициент избытка воздуха α > 1) при отсутствии потерь в окружающую среду.

**Действительная температура горения** – это температура горения, достигаемая в условиях реального пожара. Она намного ниже теоретической, калориметрической и адиабатической, т.к. в реальных условиях до 40 % теплоты горения обычно теряется на излучение, недожог и т.п.

Экспериментальное определение температуры горения для большинства горючих веществ представляет значительные трудности, особенно для жидкостей и твердых материалов. Однако в ряде случаев теория позволяет с достаточной для практики точностью вычислить температуру горения веществ, основываясь на знании их химической формулы, состава исходной смеси и продуктов горения. При расчетах исходят из того, что при быстром сгорании газо- и паровоздушных смесей развивается высокая температура. В этих условиях из-за большой скорости химических реакций к моменту окончания горения система приходит в состояние химического равновесия, и по этой причине при расчете можно применить законы термодинамики.

В общем случае для вычислений используется следующая зависимость

\_

Qпг = Vпг ∙Ср∙Тг

где Qпг – теплота (теплосодержание) продуктов горения, кДж/кг;

Vпг – объем продуктов горения, м3/кг;

\_\_

Ср - средняя объемная теплоемкость смеси продуктов горения в интервале температур от Т0 до ТГ, кДж/м3∙К;

ТГ – температура горения, К.

В реальных условиях температура горения зависит не только от состава горючего материала, но и от условий горения: разбавления продуктов горения избыточным воздухом (что учитывается коэффициентом избытка воздуха α), начальной температуры воздуха, полноты сгорания исходного горючего материала и наличия теплопотерь (коэффициент теплопотерь η).

В зависимости от рода учитываемых потерь теплоты из зоны горения вычисляется та или иная температура горения.

Расчет температуры горения проводят по уравнению энергетического баланса

Qпг = Qн∙(1- η)

**Алгоритм расчета температуры горения.**

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

Vпр пг = V(СО2) + V(Н2О) + V(N2) + V(SO2) + ∆Vвозд

Расчет объема продуктов горения выполняется в зависимости от характера горючего вещества (индивидуальное вещество, смесь газов или вещество сложного элементного состава).

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

1. Рассчитать низшую теплоту сгорания вещества. Для индивидуальных веществ расчет выполняется по I следствию закона Гесса (при наличии табличных значений энтальпий образования).

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

1. Если по условию задачи есть теплопотери, то рассчитывается количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения Qпг
2. Находим среднее теплосодержание продуктов горения Qср:

при отсутствии теплопотерь кДж/м3;

Qср =

при наличии теплопотерь

Qср = кДж/м3;

1. По значению Qср с помощью таблиц приложений 3 и 4 («Теплосодержание газов при постоянном давлении»), ориентируясь на азот, приближенно определяем температуру горения Т1.

При подборе температуры горения ориентируются на азот, т.к. в большей степени продукты горения состоят именно из азота. Однако, поскольку теплосодержание углекислого газа и паров воды выше, чем у азота, то их присутствие в продуктах горения несколько понижает температуру горения, поэтому ее нужно принимать несколько ниже (на 100-200 ºС), чем по азоту.

1. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при выбранной температуре Т1.

Q1пг = Q1(СО2)∙ V(СО2) + Q1 (Н2О)∙V(Н2О)+ Q1 (N2)∙V(N2) + Q1 (SO2)∙V(SO2)+ Q1(возд)∙∆V(в)

где - Q1(СО2), Q1 (Н2О), Q1 (N2), Q1 (SO2), Q1(возд) - табличные значения теплосодержания газов при выбранной температуре Т1.

1. Сравниваем Q1пг с QН или Qпг , рассчитанных по п.2 или п.3.

Если Q1пг< QН (Qпг), то выбираем температуру Т2 > Т1 на 100 ºС;

Если Q1пг> QН (Qпг), то выбираем температуру Т2 < Т1 на 100 ºС;

8. Повторяем расчет теплосодержания продуктов горения при новой температуре Т2

Q2пг = Q2(СО2)∙ V(СО2) + Q2 (Н2О)∙V(Н2О)+ Q2 (N2)∙V(N2) + Q2 (SO2)∙V(SO2)+ Q2(возд)∙∆V(в)

9. Расчет проводим до получения неравенства

Q1пг< QН(Qпг) < Q2пг

где Q1пг, Q2пг – теплосодержание продуктов горения при температурах Т1 и Т2, отличающихся на 100 ºС.

10. Интерполяцией определяем температуру горения ТГ:

ТГ = Т1 + ∙( Т2 - Т1), если Т1<Т2;

ТГ = Т2 + ∙( Т2 - Т1), если Т1>Т2

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

**Пример.** Вычислить действительную температуру горения анилина С6Н5NH2, если потери тепла излучением составляют 20 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,1.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения анилина

С6Н5NH2+7,75(О2 +3,76N2 ) = 6СО2 +3,5Н2О + 7,75 ∙3, 76N2 + 0,5N2

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

*nвтеор* = 7,75 ∙4,76 = 36,89 моль,

∆*nв* = *nвтеор* ∙(α-1)= 36,89∙(1,1 -1)= 3,689 моль,

nПГпр = n(СО2)+ n (Н2О) + n (N2 ) + n (∆Vв) = 6+3,5+ 7,75 ∙3, 76+ 0,5+ 3,689= 42,829 моль.

1. Теплота горения анилина по справочным данным [Баратов] составляет

*Qгор* = 3484,0 кДж/моль = 3484000 Дж/моль.

1. По условию задачи теплопотери составляют 20 %, следовательно, η= 0,2.

*QПГ* = 3484000∙ (1-0,2) = 2787200 Дж/моль (кДж/кмоль).

1. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения

*Qср* === 65077,4 кДж

По таблице приложения 3, ориентируясь на азот, определяем Т1=1800 ºС.

1. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1800 ºС.

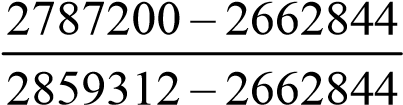
*Q*1800*ПГ* = 96579,5∙ 6+ 77598,8∙ 3,5+59539,9 ∙7,75∙ 3,76+66000∙ 3 ,689 = 2859312,7 кДж.

1. *Q*1800*ПГ* = 2859312,7 > *QПГ* = 2787200 , следовательно, выбираем Т2=1700 ºС.
2. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 1700 ºС.

*Q*1700*ПГ* = 90545,9∙ 6+72445,1 ∙3,5+55936,5 ∙7,75 ∙3,76+56397,4∙3,689 = 2662844,5 кДж.

*Q*1700*ПГ* = 2662844,5 < *QПГ* = 2787200, следовательно температура горения находится в интервале от 1700 до 1800 ºС.

1. Рассчитываем температуру горения по формуле (3.14)

*ТГ* =1700+  ∙(1800-1700) =17630*С* =2036 К.

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 11.** Вычислить действительную температуру горения индивидуального вещества, если есть потери тепла излучением η, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α. Теплота горения вещества по справочным данным составляет Qгор, кДж/моль.

Таблица 12

**Задание к задаче 11.**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар. | Вещество | Потери тепла изучением, η | Коэффициент избытка воздуха, α | Теплота горения Qгор, кДж/моль |
| 1 | Бутан – С4Н10 | 30 | 1,2 | 2657 |
| 2 | Гептан – С7Н16 | 40 | 1,3 | 4501 |
| 3 | Глицерин – C3H8О3 | 20 | 1,4 | 1483 |
| 4 | Изобутиловый спирт – С4Н10О | 10 | 1,5 | 2723,4 |
| 5 | Изопропиловый спирт – С3Н8О | 30 | 1,1 | 2051,4 |
| 6 | Метилацетат – С3Н6О2 | 40 | 1,2 | 1472,2 |
| 7 | Метилциклогексан – С7Н14 | 50 | 1,3 | 4293 |
| 8 | Октан – С8Н18 | 60 | 1,4 | 5116 |
| 9 | Антрацен – С14Н10 | 10 | 1,1 | 7059 |
| 10 | Пентен – С5Н10 | 20 | 1,2 | 3154 |
| 11 | Циклогексен – С6Н10 | 30 | 1,3 | 3565 |
| 12 | Циклокептан – С7Н14 | 40 | 1,4 | 4328 |
| 13 | Этиламин – С2Н7N | 50 | 1,5 | 1421,6 |
| 14 | Этилацетат – С4Н8О2 | 10 | 1,4 | 2078 |
| 15 | Этан – С2Н6 | 20 | 1,3 | 1576 |
| 16 | Фенол – С6Н6О | 30 | 1,2 | 2992,3 |
| 17 | Пропанол – С3Н8О | 40 | 1,1 | 2067,4 |
| 18 | Гексадекан – С16Н34 | 50 | 1,2 | 10034 |
| 19 | Гептадекан – С17Н36 | 10 | 1,3 | 10649 |
| 20 | Диэтиламин – С4Н11N | 20 | 1,4 | 2550,8 |

**Практическое занятие № 12.**

**Тема: «Расчет действительной температуры горения сложного**

**вещества с известным элементным составом».**

**Цель:** научиться рассчитывать действительную температуру горения сложного вещества с известным элементным составом.

Алгоритм расчетасмотреть в практическом занятии № 11.

**Пример.** Вычислить действительную температуру горения горючего сланца следующего состава: С – 35 %; Н – 5 %; О – 10 %; S – 4 %; N – 1 %; W – 15 %; зола – 30 %. Потери тепла излучением составляют 10 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2. Условия нормальные.

Решение.

1. По формулам (2.4) – (2.7) определяем объем каждого компонента продуктов горения 1 кг горючего сланца.

V (CO 2 ) = м3

V(Н2О)= =0,746 м3

V (SО2 )= = 0,028 м3

V(N2 )= м3

VПГ = 0,651+0,746+0,028+3,455 = 4,88 м3.

2. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,2, следовательно, в состав продуктов горения будет входить избыточный воздух.

По формуле (2.3) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

Vв теор = 0,267∙(+ 5+)=4,28 м3

Избыток воздуха определим по формуле

∆*Vв* =*Vв* теор ∙(α-1)=4,28∙(1,2-1)=0,856 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

*VПГ*\* =*VПГ* +∆*Vв* = 4,88+0,856 = 5,736 м3.

1. Рассчитываем *QН* по формуле (3.4) Д.И. Менделеева

*Qн* = 339,4∙ 35+1257 ∙5 - 108,9∙ (10+1 -4)-25,1∙(9 ∙5 +15)=15881,7 кДж/кг.

1. С учетом теплопотерь определяем теплосодержание продуктов горения

*QПГ* =15881,7∙(1-0,1) =14293,53 кДж/кг.

1. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения

*Qср* = = 2480,22 кДж/м3

По таблице приложения 4, ориентируясь на азот, определяем Т1=1500 ºС.

1. Определяем теплосодержание продуктов горения при 1500 ºС

*Q*1500*ПГ* = 3505,7 ∙0,651+ 2781,3∙ 0,746 + 2176,7 ∙3,455 + 3488,2∙ 0,028+2194,7∙ 0,856 =13853,889 кДж.

1. *Q*1500*ПГ* =13853,889 < *QПГ* =14293,53, следовательно, выбираем Т2 = 1600 ºС.
2. Определяем теплосодержание продуктов горения при 1600 ºС

*Q*1600*ПГ=*3771,4∙0,651+3004,2∙0,746+2335,5∙3,455+3747,5∙0,028+2355,2∙0,856=

14886,4 кДж.

1. *Q*1600*ПГ* =14886,44 > *QПГ* =14293,53, следовательно, температура горения вещества находится в интервале от 1500 до 1600 ºС.
2. Определяем температуру горения по формуле (3.13)

*ТГ* =1500+ 1600-1500)=15560С

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 12.** Вычислить действительную температуру горения сложного вещества с известным элементным составом, при потерях тепла излучением η и коэффициенте избытка воздуха α. Условия нормальные.

Таблица 13

**Задание к задаче 12.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар | Название вещества | Потери тепла излучением,η | Коэффициент избытка воздуха α | Состав вещества, % | | | | | | |
| С | Н | О | N | S | Влага | Зола |
| 1 | Уголь | 20 | 1,1 | 75,0 | 4,0 | 6,0 | 3,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 |
| 2 | Бензин | 30 | 1,2 | 85,0 | 14,9 | 0,02 | 0,03 | 0,15 | 0,5 | 0,01 |
| 3 | Нефть | 40 | 1,3 | 84,0 | 14,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,7 |
| 4 | Древесина | 50 | 1,4 | 41,5 | 6,0 | 43,0 | 2,0 | 1,0 | 7,5 | 11,3 |
| 5 | Каменный уголь | 10 | 1,5 | 76,0 | 4,8 | 3,6 | 2,8 | 1,8 | 2,8 | 8,2 |
| 6 | Мазут высокосернистый | 20 | 1,1 | 83,7 | 11,5 | 0,5 | 0,8 | 4,0 | 1,0 | 0,3 |
| 7 | Полуантрацит | 30 | 1,2 | 90,4 | 4,3 | 4,3 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,2 |
| 8 | Березовский уголь | 40 | 1,3 | 44,3 | 3,0 | 14,4 | 0,4 | 0,4 | 33,0 | 4,7 |
| 9 | Мазут | 50 | 1,4 | 85,0 | 14,0 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 1,0 |
| 10 | Сланец | 10 | 1,5 | 38,8 | 3,2 | 4,0 | 0,1 | 1,5 | 15,0 | 37,4 |
| 11 | Уголь | 20 | 1,1 | 29,1 | 2,2 | 8,7 | 0,6 | 2,9 | 33,0 | 23,5 |
| 12 | Древесина | 30 | 1,2 | 46,0 | 6,0 | 42,0 | 10,0 | 1,0 | 6,0 | 12,0 |
| 13 | Керосин | 40 | 1,3 | 85,3 | 14,1 | 0,6 | 0,3 | 0,8 | 1,0 | 1,0 |
| 14 | Каменный уголь | 50 | 1,4 | 79,4 | 5,3 | 10,3 | 1,0 | 2,8 | 1,0 | 2,2 |
| 15 | Торф | 10 | 1,5 | 43,0 | 7,0 | 41,0 | 2,0 | 1,0 | 7,0 | 7,0 |
| 16 | Мазут малосернистый | 20 | 1,1 | 85,8 | 8,7 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 3,8 | 0,2 |
| 17 | Уголь | 30 | 1,2 | 37,2 | 2,6 | 12,0 | 0,4 | 0,6 | 40,0 | 7,2 |
| 18 | Торф | 40 | 1,3 | 36,0 | 4,0 | 12,0 | 8,0 | 1,0 | 35,0 | 5,0 |
| 19 | Каменный уголь | 50 | 1,4 | 76,0 | 4,5 | 3,5 | 1,8 | 4,7 | 3,0 | 6,5 |
| 20 | Мазут | 10 | 1,5 | 83,4 | 10,0 | 0,1 | 0,3 | 2,9 | 3,0 | 0,3 |

**Практическое занятие №13.**

**Тема: «Расчет максимального давления взрыва газов и паров».**

**Цель:** научиться рассчитывать максимальное давление взрыва газов и паров.

**Теоретическая часть:**

**Взрыв (взрывное превращение**) – это процесс быстрого физического или химического превращения вещества, сопровождающийся превращением потенциальной энергии в механическую энергию, движение или разрушение.

При сгорании паровоздушной смеси стехиометрического состава в замкнутом объеме создается максимальное давление взрыва. Величина такого давления в основном определяется степенью температурного расширения продуктов горения и является функцией отношения температуры взрыва к начальной температуре горючей смеси. Температура взрыва определяется энергетическими свойствами горючего материала. Чем выше теплота сгорания горючего материала, тем выше температура взрыва и, соответственно, больше давление взрыва.

Расчет максимального давления взрыва производится по следующей формуле:

Р*взр*.=

где Р0 - начальное давление, кПа (Мпа)

Т0 – начальная температура, К

Т*взр* – температура взрыва, К

m – число молей (киломолей) газообразных продуктов горения

n - число молей (киломолей) исходных газообразных веществ.

**Пример.** Вычислить максимальное давление взрыва смеси гексана С6Н14 с воздухом, если начальное давление 101,3 кПа, начальная температура 273 К, температура взрыва 2355 К.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения гексана в воздухе

*C*6*Н*14 +9,5(*О*2 +3,76*N*2 ) = 6*СО*2 +7*Н О*2 +9,5 ∙3,76*N*2 .

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

*m* = 6 +7 +9,5 ∙3,76 = 48,72 моль;

*n* =1+9,5∙ 4,76 = 46,22 моль.

3. Максимальное давление взрыва составит

*Рвзр* = =921,1 кПа.

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 13.** Вычислить максимальное давление взрыва смеси вещества с воздухом, если начальное давление Р = 101,3 кПа, начальная температура 273 К, температура взрыва Т, К.

**Задание к задаче 13.**

Таблица 14

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № вар | Вещество | Температура взрыва, К |
| 1 | Циклопентан С5Н10 | 1950 |
| 2 | Этилацетат С4Н8О2 | 2230 |
| 3 | Ацетон С3Н6О | 1835 |
| 4 | Этиленгликоль С2Н4О2 | 2384 |
| 5 | Пентан С5Н12 | 1988 |
| 6 | Бутанол С4Н9ОН | 2036 |
| 7 | Метанол СН3ОН | 1739 |
| 8 | Пропилбензол С9Н12 | 2433 |
| 9 | Гептан С7Н16 | 1845 |
| 10 | Бензол С6Н6 | 1932 |
| 11 | Ацетальдегид С2Н4О | 2084 |
| 12 | Этилбензол С8Н10 | 2112 |
| 13 | Октан С8Н20 | 2303 |
| 14 | Пропанол С3Н7ОН | 2353 |
| 15 | Толуол С7Н8 | 1831 |
| 16 | Этанол С2Н5ОН | 1989 |
| 17 | Циклогексан С6Н12 | 2103 |
| 18 | Циклогексен С6Н10 | 2209 |
| 19 | Циклопентан С5Н10 | 1798 |
| 20 | Ксилол С8Н10 | 2202 |

**Практическое занятие № 14.**

**Тема: «Расчет избыточного давления взрыва индивидуальных веществ».**

**Цель:** научиться рассчитывать избыточное давление взрыва индивидуальных веществ.

**Теоретическая часть:**

В практике при оценке устойчивости от взрыва используется величина **избыточного давления взрыва.**

Избыточное давление взрыва является основным критерием, разделяющим взрывоопасные категории помещений от пожароопасных. Этот показатель, главным образом, зависит от массы вещества, которое поступает в аварийное помещение, и доли ее, принимающей участие во взрыве.

Избыточное давление взрыва в замкнутом помещении – это разность между максимально возможным и начальным давлением, при котором он происходит

∆P = Pмак – P0

Максимальное давление достигается:

- если вся масса горючего, поступившего в помещение, примет участие в образовании горючей среды и полностью взорвется;

- если помещение полностью герметично и в нем отсутствует теплоотвод через ограничивающие поверхности (неадиабатический процесс);

- если горючее и окислитель в горючей среде находятся в стехиометрическом соотношении.

В реальных условиях максимальное давление взрыва не достигается, так как имеются существенные отклонения. При расчете это необходимо учитывать, поэтому формулы для расчета ∆P индивидуальных веществ и смесей имеют более сложный вид.

Расчет избыточного давление взрыва для индивидуальных веществ производится согласно **ГОСТ Р 12.3.047 – 98 и НПБ 105-03.**

Избыточное давление взрыва ∆Р для индивидуальных горючих веществ (газов и паров ЛВЖ и ГЖ), состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, определяется по формуле

∆Р = (Pмак – P0)∙ ∙∙кПа

где Pмак - максимальное давление взрыва стехиометрической газовоздушной и паровоздушной смеси в замкнутом объеме. Определяется экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных допускается принимать Рмак= 900 кПа;

Р0 – начальное давление, кПа. Допускается принимать равным 101 кПа;

m – масса горючего газа или паров ЛВЖ и ГЖ, вышедших в результате аварии в помещение;

Z – коэффициент участия горючего во взрыве. Допускается принимать значение Z по таблице

Таблица 15

Значение коэффициента Z для различных видов горючего

|  |  |
| --- | --- |
| Вид горючего | Значение |
| Водород | 1,0 |
| Горючие газы (кроме водорода), пыли | 0,5 |
| Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше | 0,3 |
| Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля | 0,3 |
| Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоля | 0 |

Если принять, что давление в помещении равно нормальному атмосферному давлению (101,3 кПа), то плотность газа или пара можно рассчитать по следующей формуле:

ρг(п) = кг/м3

где М – молярная масса газа или пара, кг/кмоль;

V0 – молярный объем при нормальных условиях, равный 22,4 м3/кмоль;

tрасч – расчетная температура, ºС.

Сстех – стехиометрическая концентрация горючих газов или паров ЛВЖ и ГЖ, % (объемных). Стехиометрическая концентрация вычисляется по формуле

Сстех = %

где β - стехиометрический коэффициент кислорода в уравнении реакции горения. Коэффициент также может быть рассчитан по следующей формуле:

β = nс +

где nC, nH, nX,, nO – число атомов С, Н, О, галогенов в молекуле горючего вещества.

КН – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать КН = 3.

**Пример.** Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, где обращается толуол.

Данные для расчета.

1. Характеристика горючего вещества:

толуол С6Н5СН3 – метилбензол; температура вспышки tвсп = -5 ºС; нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР = 1,21 %; константы уравнения Антуана: А = 6,0507; В = 1328,17; С = 217,713; плотность жидкости ρж = 867 кг/м3; максимальное давление взрыва паров толуола Рмак = 634 кПа.

1. Характеристика помещения:

длина l = 18 м;

ширина b = 12 м;

высота h = 6 м;

температура воздуха в помещении 25 ºС;

скорость воздушного потока в помещении 0,1 м/с.

1. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса:

объем аппарата Vап = 0,05 м3;

степень заполнения аппарата жидкостью ɛ = 0,85;

температура жидкости в аппарате 40 ºС.

В результате аварийной ситуации аппарат полностью разрушен, вся жидкость поступила в помещение. Испарение жидкости проходило в течение 1 часа.

Решение.

1. Определяем массу жидкости, которая поступит в помещение *mАП.*

*mАП =*867 ∙0,05∙ 0,85= 37 кг.

1. Определяем площадь испарения жидкости

*SИСПАР =* 37 м2.

1. Определяем интенсивность испарения *WИСП*. Для этого находим неизвестные величины.

При 25 ºС и *ωВОЗД* = 0,1 м/с коэффициент *η =* 2,1, молярная масса толуола(С6Н5СН3) М = 92 кг/кмоль.

Давление насыщенного пара толуола определяем по уравнению Антуана. В качестве температуры жидкости *tЖ* принимаем среднюю температуру между температурой воздуха в помещении и температурой жидкости в аппарате

*tж* =(25+ 40)/ 2 = 32,5 ºС.

Рs = = 5,53кПа.

Тогда интенсивность испарения будет равна

*WИСП* = 10-6 ∙2,1∙√92∙5,53=111,4∙10-6 кг/м2∙с

1. Определяем массу жидкости, испарившейся с поверхности разлива *mИСП ЖИДК*.

Расчетное время испарения принимаем

РАСЧ = 3600 с.

Тогда mИСП ЖИДК. =111,4 ∙10-6 ∙3600 ∙37= 14, кг.

5.Определяем избыточное давление при взрыве паров толуола

Для расчета нам известны следующие величины:

*РMAX* = 634 кПа;

*Р*0 = 101 кПа;

*m* = 14,8 кг;

*Z* = 0,3 (по таблице 2 приложения; по условию нашей задачи толуол – ЛВЖ, нагретая выше температуры вспышки); *КН* = 3.

Остальные величины *VСВ, ρГ, ССТЕХ* необходимо рассчитать.

1. Определим свободный объем помещения *VСВ* =18∙ 12 ∙6 ∙0,8=1036,8 м3
2. Определим плотность паров толуола в помещении *ρГ*.

Температура воздуха в помещении *tРАСЧ* = 25 ºС.

Поскольку атмосферное давление в помещении принимаем равным нормальному атмосферному давлению *Р*0, плотность паров можно рассчитать по формуле

*ρГ* = =3,76 кг/м3

1. Определим стехиометрическую концентрацию паров толуола ССТЕХ

*ССТЕХ* = %

Уравнение реакции горения толуола

С6Н5СН3 +9∙ (О2 +3,76N2) = 7СО2 + 4Н О2 + 9 ∙3,76N2, т.е. β = 9

Коэффициент *β* можно рассчитать и по формуле

*β* = 7 + 8 / 4 = 9.

Тогда *ССТЕХ* =100/(1+ 4,76 9)=1,86 %.

1. Определяем избыточное давление взрыва паров толуола, используя величины, полученные в п.п. 6 – 8:

∆*Р* =(634-101)∙∙=10,9 кПа

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 14.** Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, где обращается заданное вещество.

Данные для расчета

1. Характеристика горючего вещества: температура вспышки tвсп, ºС; нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР; константы уравнения Антуана; плотность жидкости ρж; максимальное давление взрыва паров вещества Рмах.

2. Характеристика помещения: длина l, ширина b, высота h; температура воздуха в помещении Тв, ºС, скорость воздушного потока в помещении U, м/с.

3. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса: объем аппарата Vап, м3; степень заполнения аппарата жидкостью ε, температура жидкости в аппарате Тж, ºС.

В результате аварийной ситуации аппарат полностью разрушен, вся жидкость поступила в помещение. Испарение жидкости проходило в течение τ, ч.

**Задание к задаче № 14.**

Таблица 16 (Приложение № 5).

**Практическое занятие № 15.**

**Тема: «Расчет тротилового эквивалента взрыва».**

**Цель:** научиться рассчитывать тротиловый эквивалент взрыва.

**Теоретическая часть:**

Для сравнительной оценки уровня воздействия взрыва газо- паровоздушной смеси используется тротиловый эквивалент взрыва.

**Тротиловым эквивалентом взрыва** называется условная масса тринитротолуола (тротила), взрыв которой адекватен по степени разрушения взрыву парогазовой среды с учетом реальной доли участия во взрыве горючего вещества.

Тротиловый эквивалент взрыва определяется по формуле

Wт = кг,

где 0,4 - доля энергии взрыва парогазовой смеси, затрачиваемой непосредственно на формирование ударной волны;

0,9 – доля энергии взрыва тринитротолуола, затрачиваемой непосредственно на формирование ударной волны;

QH – удельная (низшая) теплота сгорания парогазовой среды, кДж/кг;

QТ – удельная теплота взрыва ТНТ (qТ = 4240 кДж/кг);

z – доля приведенной массы паров, участвующей во взрыве.

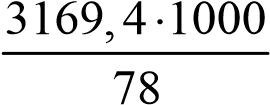
В общем случае для неорганизованных парогазовых облаков в незамкнутом пространстве с большой массой горючих веществ доля участия во взрыве может приниматься 0,1. В отдельных обоснованных случаях доля участия веществ во взрыве может быть снижена, но не менее чем до 0,02.

Для производственных помещений (зданий) и других замкнутых объемов значения z могут приниматься в соответствии с табл. 15.

**Пример.** В производственном помещении находится аппарат с бензолом С6Н6. Масса жидкости в аппарате 20 кг. В результате аварии аппарат разрушен, жидкость поступила в помещение и полностью испарилась. Вычислить тротиловый эквивалент взрыва паровоздушной смеси. Теплота сгорания бензола составляет 3169,4 кДж/моль.

Решение.

1. Определим низшую теплоту сгорания бензола М(С6Н6) = 78 кг/кмоль.

*QН* =  = 40633 кДж/кг.

1. Для легковоспламеняющейся жидкости бензола в замкнутом помещении

*z* = 0,3.

1. Рассчитаем тротиловый эквивалент взрыва

0,4 40633

*WТ* = ∙ ∙0,3∙ 20 = 25,6 кг.

0,9 4240

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 15.** В производственном помещении находится аппарат с горючей жидкостью. Масса жидкости в аппарате m, кг. В результате аварии аппарат разрушен, жидкость поступила в помещение и полностью испарилась. Вычислить тротиловый эквивалент взрыва паровоздушной смеси. Теплота сгорания вещества составляет Qн, кДж/моль. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 17.

**Задание к задаче № 15.**

Таблица 17.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № вар. | Вещество | Масса, кг | Теплота сгорания, кДж/моль |
| 1 | Амилацетат С7Н14О2 | 10 | 3889,9 |
| 2 | Амиловый спирт С5Н12О | 11 | 3383,6 |
| 3 | Ацетальдегид С2Н4О | 12 | 1192,48 |
| 4 | Ацетон С3Н6О | 13 | 1821,38 |
| 5 | Бутилацетат С6Н12О2 | 14 | 3285 |
| 6 | Бутиловый спирт С4Н10О | 15 | 2728 |
| 7 | Гексан С4Н14 | 16 | 3887 |
| 8 | Гексиловый спирт С6Н14О | 17 | 4044,6 |
| 9 | Гептан С7Н16 | 18 | 4501 |
| 10 | Декан С10Н22 | 19 | 6346 |
| 11 | Диэтиламин С4Н11N | 20 | 2550,8 |
| 12 | Изопентан С5Н12 | 21 | 3264 |
| 13 | Метилпропилкетон С4Н8О | 22 | 2918 |
| 14 | Нонан С9Н20 | 23 | 5731 |
| 15 | Октан С8Н18 | 24 | 5116 |
| 16 | Пентан С5Н12 | 25 | 3272 |
| 17 | Пиридин С5Н5N | 26 | 2822 |
| 18 | Стирол С8Н8 | 27 | 4438,8 |
| 19 | Толуол С7Н8 | 28 | 3771,88 |
| 20 | Этилацетат С4Н8О2 | 29 | 2078 |

**Практическое занятие № 16.**

**Тема: «Расчет радиуса зон разрушения».**

**Цель:** научиться рассчитывать радиус зон разрушения.

**Теоретическая часть:**

Значения избыточного давления взрыва и тротилового эквивалента взрыва используются для расчета радиуса зон разрушений.

**Зоной разрушения** считается площадь с границами, определяемыми радиусами R, центром которой является рассматриваемый технологический блок или наиболее вероятное место разгерметизации технологической системы. Границы каждой зоны характеризуются значениями избыточных давлений по фронту ударной волны ∆Р и соответственно безразмерным коэффициентом К. Классификация зон разрушения приводится в табл. 18.

Таблица 18.

*Классификация зон разрушения.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Класс зоны разрушения | К | ∆Р, кПа |
| 1 | 3,8 | ≥100 |
| 2 | 5,6 | 70 |
| 3 | 9,6 | 28 |
| 4 | 28,0 | 14 |
| 5 | 56,0 | ≤2,0 |

Радиус зоны разрушения (м) в общем виде определяется выражением

R= K∙

где К - безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект.

При массе паров т более 5000 кг радиус зоны разрушения может определяться выражением

R= K∙

**Пример.** Определить радиус зон разрушений в помещении, где произошло разрушение аппарата с толуолом. Условие из практического занятия № 14.

Решение.

1. Определим низшую теплоту сгорания толуола М(С6Н5СН3) = 92 кг/кмоль,

∆Нсгор = - 3771,9 кДж/моль,

Qн = = 40999 кДж/кг.

2. Для легковоспламеняющейся жидкости бензола в замкнутом помещении z = 0,3.

3. Рассчитаем тротиловый эквивалент взрыва

Wт = кг.

4. В соответствии с расчетом в примере ∆Р = 10,9 кПа.

Тогда по таблице 6.2 класс зоны разрушений 4 и коэффициент К = 28.

5. Радиус зоны разрушений составит

R= 28∙=24,9м

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 16.** Определить радиус зон разрушений в помещении, где произошло разрушение аппарата с заданным веществом (см. условие из задачи практического занятия № 14. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 19.

**Задание к задаче № 16.**

Таблице 19

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| ∆Нсгор,  кДж/моль | **-**3889,9 | -3823 | -3383,6 | -1192,48 | -1821,38 | -3169,4 | -3285 | -2728 | -3887 | -4501 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| ∆Нсгор,  кДж/моль | 1284 | 2323 | 1076 | 2531 | 2723,4 | 2051,4 | 736,8 | 3272 | 2822 | 4438,8 |

**Практическое занятие № 17.**

**Тема: «Определение взрывоопасности смеси горючих газов».**

**Цель:** научиться определять взрывоопасность смеси газов.

**Теоретическая часть:**

Взрывы горючих газов на предприятиях относятся к наиболее опасным авариям и приводят, как правило, к групповому травматизму с тяжелыми последствиями. Наиболее распространенными горючими газами, которые могут выделяться на предприятиях в аварийных ситуациях и образовывать с воздухом взрывоопасные смеси, являются метан, оксид углерода, водород, этан, ацетилен. Пределы взрываемости в воздухе находятся: оксида углерода от 12,5 % до 75 %; водорода от 4,1 % до 74 %; этана от 3,2% до 12,5 %; ацетилена от 3,0 % до 65 %. По мере снижения концентрации кислорода в газовой смеси (например, за счет добавки инертных газов) пределы взрываемости этих горючих газов уменьшаются.

Наиболее часто встречающаяся в шахтах метано-воздушная смесь взрывается при концентрации метана от 5 до 15 %. Смесь, содержащая до 5 % метана, не взрывчата, но может гореть при наличии источника высокой температуры. При концентрации метана более 15 % смесь не взрывчата и не поддерживает горения, а с притоком кислорода извне горит спокойным пламенем в зоне перемешивания этих газов. Наибольшей силы взрыв достигает при концентрации метана 9,5 %, так как в этом случае на его сжигание используется весь кислород воздуха. Температура взрыва метано-воздушной смеси может достигать 2650оС, если взрыв произошел в замкнутом пространстве, и 1850оС, если продукты взрыва могут свободно распространяться.

При перемешивании метана с воздухом концентрация кислорода в смеси снижается по линейной зависимости от 21 % (содержание кислорода в атмосферном воздухе) до 0 при 100 % содержании метана (рис. 7.1).

0

4

8

12

16

С

м,

%

%

С

к,

4

8

12

16

1

2

3

4

При концентрации метана от 5 % до 15 %, что соответствует содержанию кислорода в смеси от 18 % до 20 %, смесь горит и взрывается. Однако в реальных условиях шахты концентрация кислорода может быть существенно меньше обозначенных пределов из-за сорбции кислорода углем, поглощения при горении, а также образования и выделения инертных газов. Поэтому пределы взрываемости смесей метана с воздухом при различных концентрациях кислорода (СК) можно определить по треугольнику взрываемости (рис. 7.1).

Треугольники взрываемости горючих газов строят по экспериментальным данным, полученным на лабораторной установке. Эксперименты, проведенные со смесями газов, показали, что взрывоопасные концентрации расположены в области, имеющей форму треугольника (область 2).

Из рис. 7.1 видно, что наблюдается постепенное сужение нижнего и верхнего концентрационного предела взрываемости смеси метана с воздухом вплоть до выхода в точку при объемной доле кислорода, равной 12,2 %. Это связано в цепным механизмом передачи теплового импульса зажигания. В области 3 для осуществления цепной реакции окисления недостаточно молекул метана, в области 4 – молекул кислорода.

«Треугольник взрываемости» для других горючих газов имеет тот же вид, что и для метана, но различные размеры. Взрываемость смеси горючих газов при подземных пожарах также определяется с помощью «треугольника взрываемости». Нижний концентрационный предел взрываемости смеси горючих газов (в об. %) определяется по формуле, предложенной Ле Шателье:

Õ=100/ ( 7.1)

где n1, n2, …ni – объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов, %;

N1, N2, … Ni – нижние концентрационные пределы взрываемости каждого из этих компонентов, %.

Объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов определяют по формуле

ni = (7.2)

где Ci – концентрация соответствующего горючего газа в смеси с воздухом, %.

Формула Ле - Шателье верна для большинства углеводородов. Однако для смесей, состоящих из сильно различающихся по структуре органических компонентов, применяемость этой формулы ухудшается.

Для оценки взрываемости смеси горючих газов вначале определяется общее суммарное содержание горючих газов (%). Для наиболее распространенных в угольных шахтах горючих газов используется формула

Сг = См + Со + Св, (7.3.)

где См, Со, Св – концентрация соответственно метана, оксида углерода и водорода, %.

Затем рассчитывают долю каждого горючего газа в смеси по выражениям:

Рм = См/Сг; Ро = Со/Сг; Рв = Св/Сг. (7.4)

Правильность расчета проверяется по соотношению Рм + Ро + Рв = 1. (7.5)

По полученным данным выбирают соответствующий треугольник взрываемости. Затем концентрацию кислорода в смеси наносят на ось ординат, а сумму концентраций горючих газов на ось абсцисс на соответствующем графике (рис. 7.2.–7.7.) и в точке их пересечения определяют местонахождение данной смеси. В случае, если найденная точка находится внутри «треугольника взрываемости», то газовая смесь может взорваться при появлении источника огня или повышении температуры газа.

Так, произведенный отбор проб газа из атмосферы пожарного участка показал, что газовая смесь содержит кислорода (Ск) 15 %, оксида углерода (Со) 0 %, метана (См) 2,1 % и водорода (Св) 1,4 %.

Затем по формуле (7.3) подсчитываем, что концентрация суммы горючих газов (Сг) равна 3,5 %. Доля оксида углерода в смеси горючих газов (Ро) равна 0, а доля метана (Рм) составляет 0,6.

Исходя из расчетных данных, выбираем соответствующий треугольник взрываемости (рис. 7.2.). Затем на оси графика рис. 7.2 наносим значения концентраций кислорода и суммы горючих газов и находим точку **Х**, соответствующую состоянию атмосферы пожарного участка.

Из графика видно, что точка **Х** расположена вне «треугольника взрываемости», поэтому на данный момент смесь горючих газов не может взорваться. Однако найденная точка находится вблизи нижнего концентрационного предела взрываемости смеси и незначительное изменение, способствующее увеличению концентрации горючих компонентов в рудничной атмосфере, может переместить точку **Х** в зону взрываемости.

По графику расположения зоны взрываемости горючих газов можно определить, куда будет смещаться точка, отображающая соответствующую газовую смесь, в случае изменения концентрации составляющих ее компонентов (кислорода, горючих газов и инертных газов). Так, линия, соединяющая полученную точку **Х** с точкой **А**, покажет, куда будет смещаться смесь в случае увеличения подачи свежего воздуха и, соответственно, роста в ней концентрации кислорода. Из рис. 7.2 видно, что добавление свежего воздуха приведет к снижению концентрации горючих газов и удалению смеси от треугольника взрываемости.

Перемещение точки **Х** по линии, соединяющей ее с точкой **В**, происходит в случае, если в смесь газов будут добавляться инертные газы. С этой целью в опасную зону могут нагнетать азот, углекислый газ, аргон и другие газы, не поддерживающие горения и снижающие концентрации в смеси кислорода и горючих газов. Согласно рис. 7.2 такое воздействие также удаляет смесь от треугольника взрываемости, что уменьшает опасность взрыва смеси.

С

%

г,

%

С

к,

0

8

16

24

8

16

А

В

С

Р = 0

о

Р =

м

,0 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,

3

1

Х

*Рис. 7.2. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при отсутствии оксида углерода (Ро = 0)*

С

%

г,

%

С

к,

0

8

16

24

8

16

А

В

С

Р = 0,1

о

Р =

м

0

3

,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,

*Рис. 7.3. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,1*

С

%

г,

%

С

к,

0

8

16

24

8

16

А

В

С

Р = 0,2

о

Р =

м

0

,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,

3

*Рис. 7.4. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,2*

С

%

г,

%

С

к,

0

8

16

24

8

16

А

В

С

Р = 0,3

о

Р =

м

3

,7 0,6 0,5 0,4 0,

0

*Рис. 7.5. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,3*

С

%

г,

%

С

к,

0

8

16

24

8

16

А

В

С

Р = 0,4

о

Р =

м

,5 0,4 0,

0

3

,

6

0

*Рис. 7.6. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4*

С

%

г,

%

С

к,

0

8

16

24

8

16

А

В

С

Р = 0,5

о

Р =

м

0

,5 0,4 0,

3

*Рис. 7.7. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,5*

В случае дополнительного выделения горючих газов, приводящего к увеличению их концентрации в смеси, точка **Х**, отображающая состояние смеси газов, начнет перемещаться к точке С. Для приведенного на рис. 4.2 примера это означает вхождение в треугольник взрываемости и образование взрывчатой смеси. Увеличение концентрации горючих газов в рудничной атмосфере может происходить при изоляционных работах, снижении притока свежего воздуха при сохраняющейся интенсивности выделения горючих газов. Таким образом, использование «треугольников взрываемости» в шахтах при тушении пожаров позволяет не только оценить возможность взрыва образующейся смеси газов, но и проанализировать, как будет изменяться ситуация в пожарном участке в случае увеличения выделения горючих газов, повышения или снижения количества подаваемого свежего воздуха или при подаче инертных газов. Соответственно появляется возможность выбора наиболее эффективного способа предотвращения взрыва горючих газов.

**Задание для самостоятельной работы.**

**Задача 17.**

1. Из предложенных в таблице 20 вариантов выбирают заданный состав смеси газов, возникший в атмосфере пожарного участка.

По формулам (7.1) и (7.2) определяют нижний концентрационный предел взрываемости смеси этих горючих газов.

Затем по формуле (7.3) рассчитывают общее содержание горючих газов, а по формуле (7.4) долю каждого горючего газа в смеси. По формуле (7.5) проверяют правильность расчета.

2. По рассчитанным данным на рисунках 7.2–7.7 выбирают соответствующий доли оксида углерода треугольник взрываемости горючих газов и перечерчивают его в тетрадь.

3. Наносят на выбранный график заданную точку и определяют возможность взрыва смеси горючих газов.

4. Анализируют опасность взрыва в случае увеличения интенсивности выделения горючих газов, усиления проветривания свежим воздухом и при подаче инертных газов.

5. Выбирают оптимальный путь предотвращения взрыва смеси горючих газов.

**Задание к задаче № 17.**

Таблице 20

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | Состав атмосферы пожарного участка, % | | | |
| Кислород | Метан | Оксид углерода | Водород |
| 1 | 17 | 4 | 0 | 0 |
| 2 | 8 | 6 | 2 | 12 |
| 3 | 10 | 7,2 | 1,8 | 9 |
| 4 | 16 | 1,9 | 0 | 1,9 |
| 5 | 12 | 8 | 1,6 | 6,4 |
| 6 | 14 | 7 | 1 | 2 |
| 7 | 18 | 3,2 | 0 | 4,8 |
| 8 | 16 | 6,4 | 0,8 | 0,8 |
| 9 | 15 | 3 | 2 | 5 |
| 10 | 16 | 12 | 0 | 0 |
| 11 | 13 | 3,6 | 1,8 | 4,6 |
| 12 | 12 | 4 | 1,6 | 2,4 |
| 13 | 14 | 8 | 0 | 2 |
| 14 | 11 | 4,2 | 1,4 | 1,4 |
| 15 | 16 | 4,8 | 1,2 | 0 |
| 16 | 17 | 1,5 | 1,5 | 2 |
| 17 | 18 | 1,6 | 1,2 | 1,2 |
| 18 | 16 | 4 | 2,4 | 1,6 |
| 19 | 15 | 7,2 | 3,6 | 1,2 |
| 20 | 14 | 10,5 | 4,5 | 0 |
| 21 | 14 | 4,8 | 6,4 | 4,8 |
| 22 | 13 | 7,2 | 7,2 | 3,6 |
| 23 | 12 | 10 | 8 | 2 |
| 24 | 10 | 14,4 | 9,6 | 0 |
| 25 | 13 | 7,2 | 12 | 4,8 |

Приложение 1

*Стандартные энтальпии образования и энтропии некоторых веществ при 298 К*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  п/п | Вещество | *∆Н0 обр*., кДж/моль | *S0*, Дж/моль∙К |
| 1 | Углекислый газ СО2 (г) | - 393,5 | 213,7 |
| 2 | Вода Н2О (г) | - 241,8 | 188,7 |
| 3 | Азот N2 (г) | 0 | 191,5 |
| 4 | О2 (г) | 0 | 205,0 |
| 5 | Бутан С4Н10 (г) | - 126,2 | 310,1 |
| 6 | Пентан С5Н12 (г) | - 146,4 | 348,9 |
| 7 | Гексан С6Н14 (ж) | - 198,8 | 295,9 |
| 8 | Гептан С7Н16 (ж) | - 224,4 | 328,5 |
| 9 | Октан С8Н18 (ж) | - 208,5 | 466,7 |
| 10 | Циклопентан С5Н10 (г) | - 77,2 | 292,9 |
| 11 | Циклогексан С6Н12 (г) | - 123,1 | 298,2 |
| 12 | Ацетилен С2Н2(г) | 226,8 | 200,8 |
| 13 | Этилен С2Н4 (г) | 52,3 | 219,4 |
| 14 | Пропен С3Н6 (г) | 20,4 | 266,9 |
| 15 | Бутен-1 С4Н8 (г) | - 0,13 | 305,6 |
| 16 | Бутадиен-1,3 С4Н6 (г) | 110,2 | 278,7 |
| 17 | Бензол С6Н6 (ж) | 49,1 | 173,2 |
| 18 | Толуол С7Н8 (ж) | 12,0 | 219,6 |
| 19 | о- Ксилол С8Н10 (ж) | 19,0 | 352,8 |
| 20 | м-Ксилол С8Н10 (ж) | 17,2 | 357,7 |
| 21 | Метиловый спирт СН3ОН (ж) | - 238,7 | 126,7 |
| 22 | Этиловый спирт С2Н5ОН (ж) | - 277,6 | 160,7 |
| 23 | Пропиловый спирт С3Н7ОН (ж) | - 306,9 | 192,9 |
| 24 | Изопропиловый спирт С3Н8О(ж) | - 320,3 | 179,9 |
| 25 | Метаналь НСОН (г) | - 115,9 | 220,1 |
| 26 | Этаналь СН3СОН (г) | - 166,4 | 265,7 |
| 27 | Муравьиная кислота НСООН (ж) | - 409,2 | 128,9 |
| 28 | Уксусная кислота СН3СООН (ж) | - 487,0 | 159,8 |
| 29 | Ацетон СН3СОСН3 (ж) | - 248,3 | 155,4 |
| 30 | Этилацетат СН3СООС2Н5 (ж) | - 463,2 | 259,0 |
| 31 | Глицерин С3Н8О3 (ж) | - 659,4 | 207,9 |
| 32 | Диметиламин (СН3)2NH | - 27,6 | 273,2 |
| 33 | Анилин С6Н5NH2 | 35,3 | 191,6 |
| 34 | Нитробензол С6Н5NО2 | 15,9 | 244,3 |

Приложение 2

*Низшая теплота сгорания некоторых сложных веществ*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | QН, кДж/кг | Вещество | QН, кДж/кг |
| Антрацит | 31425 | Кинопленка |  |
| Бензин | 46928 | триацетатная | 18779 |
| Бумага | 13408 | целлулоидная | 16760 |
| Бурый уголь | 8380 – 25140 | Кокс | 29330 – 33520 |
| Винипласт | 18105 | Крахмал | 17510 |
| Волокно |  | Мазут | 38129 – 41900 |
| вискозное | 15512 | Масло |  |
| капроновое | 31132 | соляровое | 43069 |
| лавсан | 22584 | Нефть сырая | 43576 – 46090 |
| нитрон | 30755 | Пенополиуретан | 24320 |
| Древесина |  | Полипропилен | 45671 |
| свежая W= 50 % | 7150 | Полистирол | 38967 |
| воздушносухая | 14665 | Полиэтилен | 47138 |
| Ископаемый |  | Резина | 33520 |
| Уголь | 25140 – 35615 | Сланцы | 5782 – 11564 |
| Карболит | 25978 | Оргстекло | 27737 |
| Каучук |  | Топливо Т-1 | 42948 |
| натуральный | 42319 | Топливо Т-2 | 43157 |
| синтетический | 37710 | Торф сухой | 27654 |
| Капролактам | 29749 | Торф W = 10 % | 16613 |
| Керосин | 41481 – 46090 | Целлюлоза | 17300 |

Приложение 3

*Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, t0С |  | Теплосодержание, кДж/кмоль | | | |  |
| О2 | N2 | Воздух | СО2 | Н2О | SO2 |
| 100 | 2956,0 | 2917,0 | 2917,5 | 3814,1 | 1281,7 | 4081,1 |
| 200 | 5991,7 | 5849,3 | 5866,0 | 8019,6 | 6829,7 | 8505,7 |
| 300 | 9125,8 | 8819,9 | 8861,8 | 12536,5 | 10378,6 | 13223,6 |
| 400 | 12360,5 | 11849,3 | 11924,7 | 17313,1 | 14044,9 | 18167,8 |
| 500 | 15678,9 | 14945,7 | 15058,8 | 22303,4 | 17828,4 | 23275,4 |
| 600 | 19072,9 | 18104,9 | 18255,8 | 27473,8 | 21733,5 | 28533,9 |
| 700 | 22521,2 | 21331,3 | 21524,0 | 32795,1 | 25772,7 | 33876,1 |
| 800 | 26019,9 | 24616,2 | 24842,5 | 38237,9 | 29937,5 | 39285,5 |
| 900 | 29564,6 | 27955,7 | 28211,3 | 43785,5 | 34232,3 | 44799,5 |
| 1000 | 33142,9 | 31337,0 | 31621,9 | 49442,0 | 38648,5 | 50321,9 |
| 1100 | 36750,5 | 34760,2 | 35074,5 | 55140,4 | 43198,9 | 55907,2 |
| 1200 | 40391,6 | 38221,2 | 38560,6 | 60922,6 | 47807,9 | 61492,4 |
| 1300 | 44036,9 | 41719,8 | 42067,6 | 66788,6 | 52584,5 | 67161,5 |
| 1400 | 47724,1 | 45252,0 | 45629,1 | 72654,6 | 57403,0 | 72797,1 |
| 1500 | 51453,2 | 48771,6 | 49190,6 | 78562,5 | 62347,2 | 78436,8 |
| 1600 | 55182,3 | 52375,0 | 52794,0 | 84554,2 | 67333,3 | 84135,2 |
| 1700 | 58953,3 | 55936,5 | 56397,4 | 90545,9 | 72445,1 | 89821,0 |
| 1800 | 62766,2 | 59539,9 | 60000,8 | 96579,5 | 77598,8 | 95557,1 |
| 1900 | 66579,1 | 63143,3 | 63646,1 | 102613,1 | 82794,4 | 101184,3 |
| 2000 | 70392,0 | 66788,6 | 67333,3 | 108646,7 | 88073,8 | 107012,6 |
| 2100 | 74246,8 | 70433,9 | 71020,5 | 114722,2 | 93395,1 | 112715,2 |
| 2200 | 78101,6 | 74121,1 | 74707,7 | 120839,6 | 98758,3 | 118451,3 |
| 2300 | 81998,3 | 77766,4 | 78394,9 | 126915,1 | 104163,4 | 124220,9 |
| 2400 | 85936,9 | 81453,6 | 82124,0 | 133032,5 | 109631,3 | 130024,1 |
| 2500 | 89875,5 | 85140,8 | 85853,1 | 139149,9 | 115141,1 | 135756,0 |
| 2600 | 94015,2 | 89003,9 | 89330,8 | 145325,9 | 119398,2 | 141513,0 |
| 2700 | 97857,4 | 92653,5 | 93105,9 | 151481,1 | 124782,4 | 147295,2 |
| 2800 | 101833,7 | 96437,0 | 96789,0 | 157560,7 | 130342,5 | 152985,3 |
| 2900 | 106124,2 | 100488,7 | 100488,7 | 163795,5 | 135848,2 | 158813,6 |
| 3000 | 110113,2 | 103828,2 | 104205,3 | 169946,4 | 141161,1 | 164667,0 |

Приложение 4

*Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, t0С | Теплосодержание, кДж/м3 | | | | | |
| О2 | N2 | воздух | СО2 | Н2О | SO2 |
| 100 | 131,8 | 130,1 | 130,1 | 170,1 | 150,6 | 181,4 |
| 200 | 267,2 | 260,9 | 261,6 | 357,7 | 304,7 | 377,9 |
| 300 | 407,1 | 393,6 | 395,4 | 559,7 | 463,0 | 587,0 |
| 400 | 551,4 | 528,7 | 532,1 | 772,6 | 626,8 | 824,6 |
| 500 | 669,3 | 666,6 | 672,0 | 925,1 | 786,2 | 1034,9 |
| 600 | 850,6 | 807,8 | 814,5 | 1225,6 | 969,5 | 1269,6 |
| 700 | 1004,7 | 951,9 | 960,3 | 1463,1 | 1149,7 | 1507,5 |
| 800 | 1160,6 | 1098,2 | 1108,2 | 1706,2 | 1335,3 | 1746,4 |
| 900 | 1319,0 | 1246,9 | 1258,7 | 1953,8 | 1527,2 | 1994,8 |
| 1000 | 1478,6 | 1398,2 | 1410,7 | 2205,2 | 1724,2 | 2237,4 |
| 1100 | 1639,5 | 1551,1 | 1564,9 | 2460,4 | 1926,5 | 2488.8 |
| 1200 | 1802,1 | 1705,3 | 1720,4 | 2718,5 | 2133,9 | 2735,2 |
| 1300 | 1965,1 | 1861,2 | 1877,5 | 2979,1 | 2345.5 | 2979,5 |
| 1400 | 2129,8 | 2010,0 | 2035,5 | 3241,4 | 2560,9 | 3238,0 |
| 1500 | 2295,7 | 2176,7 | 2194,7 | 3505,7 | 2781,3 | 3488,2 |
| 1600 | 2462,4 | 2335,5 | 2355,2 | 3771,4 | 3004,2 | 3747,5 |
| 1700 | 2630,5 | 2495,9 | 2515,7 | 4039,6 | 3231,7 | 4003,1 |
| 1800 | 2799,7 | 2656,4 | 2678,2 | 4307,3 | 3461,3 | 4261,2 |
| 1900 | 2969,4 | 2818,2 | 2840,4 | 4579,7 | 3693,5 | 4529,8 |
| 2000 | 3140,8 | 2979,9 | 3004,2 | 4847,8 | 3928,5 | 4667,6 |
| 2100 | 3311,7 | 3142,9 | 3167,6 | 5118,2 | 4166,1 | 5059,4 |
| 2200 | 3497,8 | 3306,3 | 3332,3 | 5392,5 | 4405,8 | 5337,2 |
| 2300 | 3659,1 | 3469,3 | 3497,4 | 5660,7 | 4667,1 | 5608,7 |
| 2400 | 3834,3 | 3633,1 | 3663,3 | 5933,0 | 4890,9 | 5892,8 |
| 2500 | 4009,8 | 3797,4 | 3828,8 | 6209,6 | 5136,5 | 6169,8 |
| 2600 | 4184,9 | 3953,9 | 3988,4 | 6487,4 | 5387,1 | 6460,1 |
| 2700 | 4368,9 | 4135,9 | 4156,5 | 6761,8 | 5639,3 | 6753,8 |
| 2800 | 4546,1 | 4304,4 | 4320,7 | 7033,3 | 5897,8 | 7050,9 |
| 2900 | 4729,2 | 4469,0 | 4484,9 | 7311,1 | 6159,3 | 7351,3 |
| 3000 | 4914,9 | 4634,5 | 4652,1 | 7589,7 | 6425,8 | 7655,1 |

Приложение 5 (таблица № 16).



****

**Информационное обеспечение**

Основные источники

1.Тотай А.В. Теория горения и взрыва. 2-е изд., пер. и доп. Учебник и практикум для СПО-  [М.:Издательство Юрайт. –](http://www.biblio-online.ru/thematic/?5&id=urait.content.49BC510B-3D99-4CAE-BF59-B1D5CD6E5D93&type=c_pub) 2017. -295 с.

Интернет-ресурсы

1.Министерство образования и науки РФ [www.mon](http://www.mon). gov.ru

2.Российский образовательный портал www.edu.ru