**Утверждаю**

Начальник кафедры ФХОПГиТ

подполковник вн. службы

Шкитронов М.Е.

«\_\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_ г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

**ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»**

**Специальность (направление подготовки)**

«ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

**Форма обучения «**ЗАОЧНАЯ»

Обсуждены на заседании ПМК (секции)

протокол №\_\_\_\_\_от « » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_ г.

Санкт-Петербург

2015

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Приступая к изучению курса "Теория горения и взрыва", необходимо ознакомиться с программой, настоящими методическими указаниями и списком рекомендуемой литературы.

Усвоив основные теоретические положения отдельных тем курса, обучающийся может переходить к решению задач по этой дисциплине.

Обучающийся должен выполнить одну контрольную работу, включающую теоретическую часть (два вопроса) и расчетную часть.

Задание на контрольную работу состоит из 100 вариантов. Вариант контрольной работы определяется по таблице 1 по двум последним цифрам номера зачетной книжки. Например, номер зачетной книжки 761**48**. Следовательно, вариант контрольной работы 48. По таблице 1 определяем номера теоретических вопросов и расчетного задания: **2, 15, 14.** Вещество для расчетного задания выбирается по таблице 2. В данном случае это будет бутанол.

Работа должна быть выполнена разборчивым почерком, грамотно и аккуратно оформлена.

При затруднении в самостоятельном решении какого-либо вопроса или задачи можно обратиться за консультацией к практическим работникам или преподавателям университета.

Оценивается работа с учетом глубины изложения материала, пра­вильности решения задач, самостоятельности выполнения, умения увязывать теоретические вопросы с практикой.

Таблица 1. Задания для выполнения контрольной работы

| ***Последние цифры № зачетной книжки*** | ***Номера вопросов и заданий*** | | |
| --- | --- | --- | --- |
| ***Теоретические вопросы*** | | ***Расчетное задание*** |
| ***1*** | ***2*** | ***3*** |
| 00 | 1 | 12 | 1 |
| 01 | 2 | 13 | 2 |
| 03 | 3 | 14 | 3 |
| 04 | 4 | 15 | 4 |
| 05 | 5 | 16 | 5 |
| 06 | 6 | 17 | 6 |
| 07 | 7 | 18 | 7 |
| 08 | 8 | 19 | 8 |
| 09 | 9 | 20 | 9 |
| 10 | 10 | 21 | 10 |
| 11 | 11 | 22 | 11 |
| 12 | 12 | 23 | 12 |
| 13 | 13 | 1 | 13 |
| 14 | 14 | 2 | 14 |
| 15 | 15 | 3 | 15 |
| 16 | 16 | 4 | 16 |
| 17 | 17 | 5 | 17 |
| 18 | 18 | 6 | 18 |
| 19 | 19 | 7 | 19 |
| 20 | 20 | 8 | 20 |
| 21 | 21 | 9 | 21 |
| 22 | 22 | 10 | 22 |
| 23 | 23 | 11 | 23 |
| 24 | 1 | 12 | 24 |
| 25 | 2 | 13 | 25 |
| 26 | 3 | 14 | 26 |
| 27 | 4 | 15 | 27 |
| 28 | 5 | 16 | 28 |
| 29 | 6 | 17 | 29 |
| 30 | 7 | 18 | 30 |
| 31 | 8 | 19 | 31 |
| 32 | 9 | 20 | 32 |
| 33 | 10 | 21 | 33 |
| 34 | 11 | 22 | 34 |
| 35 | 12 | 23 | 1 |
| 36 | 13 | 2 | 2 |
| 37 | 14 | 3 | 3 |
| 38 | 15 | 4 | 4 |
| 39 | 16 | 5 | 5 |
| 40 | 17 | 6 | 6 |
| 41 | 18 | 7 | 7 |
| 42 | 19 | 8 | 8 |
| 43 | 20 | 9 | 9 |
| 44 | 21 | 10 | 10 |
| 45 | 22 | 11 | 11 |
| 46 | 23 | 12 | 12 |
| 47 | 1 | 14 | 13 |
| 48 | 2 | 15 | 14 |
| 49 | 3 | 16 | 15 |
| 50 | 4 | 17 | 16 |
| 51 | 1 | 12 | 17 |
| 52 | 2 | 13 | 18 |
| 53 | 3 | 14 | 19 |
| 54 | 4 | 15 | 20 |
| 55 | 5 | 16 | 21 |
| 56 | 6 | 17 | 22 |
| 57 | 7 | 18 | 23 |
| 58 | 8 | 19 | 24 |
| 59 | 9 | 20 | 25 |
| 60 | 10 | 21 | 26 |
| 61 | 11 | 22 | 27 |
| 62 | 12 | 23 | 28 |
| 63 | 13 | 1 | 29 |
| 64 | 14 | 2 | 30 |
| 65 | 15 | 3 | 31 |
| 66 | 16 | 4 | 32 |
| 67 | 17 | 5 | 33 |
| 68 | 18 | 6 | 34 |
| 69 | 19 | 7 | 1 |
| 70 | 20 | 8 | 2 |
| 71 | 21 | 9 | 3 |
| 72 | 22 | 10 | 4 |
| 73 | 23 | 11 | 5 |
| 74 | 1 | 12 | 6 |
| 75 | 2 | 13 | 7 |
| 76 | 3 | 14 | 8 |
| 77 | 4 | 15 | 9 |
| 78 | 5 | 16 | 10 |
| 79 | 6 | 17 | 11 |
| 80 | 7 | 18 | 12 |
| 81 | 8 | 19 | 13 |
| 82 | 9 | 20 | 14 |
| 83 | 10 | 21 | 15 |
| 84 | 11 | 22 | 16 |
| 85 | 12 | 23 | 17 |
| 86 | 13 | 2 | 18 |
| 87 | 14 | 3 | 19 |
| 88 | 15 | 4 | 20 |
| 89 | 16 | 5 | 21 |
| 90 | 17 | 6 | 22 |
| 91 | 18 | 7 | 23 |
| 92 | 19 | 8 | 24 |
| 93 | 20 | 9 | 25 |
| 94 | 21 | 10 | 26 |
| 95 | 22 | 11 | 27 |
| 96 | 23 | 12 | 28 |
| 97 | 1 | 14 | 29 |
| 98 | 2 | 15 | 30 |
| 99 | 3 | 16 | 31 |

**I.** **Теоретические вопросы**

1. Сущность процесса горения. Условия, необходимые для горения. Полное и неполное горение. Продукты горения, дым.

2. Виды горения (пламен): гомогенное и гетерогенное, кинетическое и диффузионное, ламинарное и турбулентное.

3. Классификация пожаров по пожарной нагрузке, виды пожарной наг­рузки, ее размерность.

4. Массовая скорость выгорания, ее размерность; линейная скорость выгорания, ее размерность. Зависимость скорости выгорания от различных факторов.

5. Чем отличается низшая теплота горения от высшей? Какой закон используют для определения теплоты горения индивидуальных ве­ществ? Как называется формула для расчета низшей теплоты горе­ния конденсированных систем (смесей известного элементного сос­тава)?

6. Температура горения веществ и материалов. Чём отличается теоре­тическая температура от действительной, от адиабатической? Ка­кие факторы влияют на температуру горения?

7. Самовоспламенение, сущность процесса. Температура самовоспламенения, ее практическое значение, как показателя пожарной опасности веществ и материалов.

8. В чем суть радикально-цепного процесса самовоспламенения? Назовите причины обрыва цепи. Как влияют температура и давление на развитие цепного процесса самовоспламенения?

9. Тепловая теория самовоспламенения академика Н. Н. Семенова. Изобразить графически и объяснить изменение тепловыделения и теплоотвода от температуры.

10. Практическое значение температуры самовоспламенения как пока­зателя пожарной опасности. От каких факторов зависит темпера­тура самовоспламенения?

11. Как можно увеличить теплоотвод при самовоспламенении? Как из­менится при этом температура самовоспламенения? Принцип работы гравийных, сетчатых и др. огнепреградителей, щелевой защиты.

12. Сущность процесса самовозгорания. В чем отличие самовозгорания от самовоспламенения? Причины и условия самовозгорания.

13. Причины и условия самовозгорания жиров и масел. Какие масла наиболее склонны к самовозгоранию? Что называется йодным чис­лом? Меры профилактики, исключающие самовозгорание жиров и ма­сел.

14. Причины и условия самовозгорания веществ на воздухе (сульфиды железа, белый фосфор, порошки металлов). Меры профилактики.

15. Причины и условия самовозгорания веществ в контакте с водой (щелочные металлы, карбиды, гидриды я т.д.). Меры профилакти­ки.

16. Причины и условия самовозгорания каменного угля. Меры профи­лактики.

17. Самовозгорание веществ при контакте друг с другом (смеси горю­чего с окислителем). Меры профилактики, исключающие самовозго­рание веществ при контакте друг с другом.

18. В чем отличие самовоспламенения от зажигания? Какой процесс называется зажиганием? Виды источников зажигания. Минимальная энергия зажигания, ее практическое значение, как показателя пожарной опасности веществ и материалов.

19. Дефлаграционное горение газо-паровоздушных смесей. Нормальная скорость распространения пламени, ее практическое значение, как показателя пожарной опасности веществ.

20. Практическое значение, нормальной скорости горения. Зависимость ее от концентрации горючего в смеси, от начальной температуры и от концентрации флегматизаторов.

21. Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) их практическое значение, как показателя пожарной опасности веществ.

22. Изменение КПР в гомологическом ряду (на примере ряда метана). Влияние на КПР функциональных групп и ненасыщенных связей, температуры, давления, флегматизаторов и ингибиторов.

23. Чем отличается детонационное горение от дефлаграционного горения? Условия возникновения детонационного горения?

**II. Расчетная часть задания**

**1. Общие сведения**

Название вещества.

**2. Физико-химические свойства**

Агрегатное состояние; внешний вид, цвет, запах; плотность;. температура плавления; температура кипения; растворимость в воде; коэффициент молекулярной диффузии пара; удельное электрическое сопротивление; диэлектрическая проницаемость; предельно допустимая концентрация ПДК (справочные данные).

**2.1**. **Расчет** относительной плотности паров по воздуху (Dвозд);

**2.2. Расчет** плотности паров при нормальных условиях

(ρпар = М/Vм, кг/м3);

**2.3. Расчет** процентного элементного состава вещества.

**2.4. Расчет** коэффициента горючести.

**3. Расчет характеристик горения**

**3.1. Определение характера свечения пламени.**

**3.2. Низшая теплота сгорания**

По формуле Д.И. Менделеева в кДж/кг.

**3.3. Уравнение реакции горения.**

**3.4. Объем воздуха на горение (теоретический и практический)**

По уравнению реакции горения (для 1 кг горючего вещества при нормальных условиях).

**3.5. Объем и состав продуктов горения (теоретический)**

По уравнению реакции горения (для 1 кг горючего вещества при нормальных условиях).

**3.6. Стехиометрическая концентрация в паровоздушной смеси**

3.6.1. Объемная концентрация (%).

3.6.2. Массовая концентрация (кг/м3, г/м3).

**3.7. Концентрационные пределы распространения пламени**

**3.8. Расчет давления насыщенного пара по уравнению Антуана** (для температуры 250С).

Таблица 2. Физико-химические константы некоторых веществ

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар | Вещество | Константы уравнения Антуана | tКИПЕНИЯ, 0С | ΔН образ.кДж/моль |
| 1. | Амиловый спирт С5Н11 ОН | lgр = 6,3073 - 1287,625/(161,330 + t) | 138 | - 36,39 |
| 2. | Ацетон С3Н6О | lgр = 6,37551 – 1281,721/(237,088 + t) | 56,5 | - 248,28 |
| 3. | Ацетальдегид С2Н4О | lgр = 6,31653 – 1093,537/(233,413 + t) | 20,2 | - 166,36 |
| 4. | Бензол С6Н6 | lgр = 5,61391 - 902,275/(178,099 + t) | 80,1 | + 82,9 |
| 5. | Гексан С6Н14 | lgр = 5,99517 – 1166,274/(223,661 + t) | 68,74 | - 167,2 |
| 6. | Гептан С7Н16 | lgр = 6,07647 – 1295,405/(219,819 + t) | 98.43 | - 187,7 |
| 7. | Диэтиловый эфир С4Н10О | lgр = 6,9979 - 1098,945/(232,372 + t) | 34,5 | - 252,2 |
| 8. | м-Ксилол С8Н10 | lgр = 6,58807 -1906,796/(234,917 + t) | 139 | - 28,4 |
| 9. | п-Ксилол С8Н10 | lgр = 6,25485 – 1537,082/(223,608 + t) | 138,3 | - 24,4 |
| 10. | о-Ксилол С8Н10 | lgр = 6,28893 – 1575,114/(223,579 + t) | 144,4 | - 24,4 |
| 11. | Метанол СН3ОН | lgр = 7,3527 - 1660,454/(245,818 + t) | 64,9 | - 203,1 |
| 12. | Этилбензол С8Н10 | lgр = 6,35879 – 1590,660/(229,581 + t) | 136,2 | + 29,9 |
| 13. | Этиленгликоль С2Н4О2 | lgр = 8,13754 – 2753,183/(252,099 + t) | 197 | - 453,8 |
| 14. | Бутанол С4Н9ОН | lgр = 8,72232 – 2664,684/(279,638 + t) | 117 | - 274,6 |
| 15. | Октан С8Н20 | lgр = 6,09396 – 1379,556/(211,896 + t) | 125,7 | - 208 |
| 16. | Пентан С5Н12 | lgр = 5,97208 – 1062,555/(231,805 + t) | 36 | - 146,4 |
| 17. | Пропанол С3Н7ОН | lgр = 7,44201 – 1751,981/(225,125 + t) | 97,8 | - 257,7 |
| 18. | Пропанол-2 С3Н7ОН | lgр = 7,51055 – 1733,00/(232,380 + t) | 83,2 | - 272,4 |
| 19. | Пропилбензол С9Н12 | lgр = 6,29713 – 1627,827/(220,499 + t) | 159 | + 7,9 |
| 20. | Толуол С7Н8 | lgр = 6,0507 - 1328,171/(217,713 + t) | 110,6 | + 50,17 |
| 21. | Уксусная кислота С2Н4О2 | lgр = 7,10337 – 1906,53/(255,973 + t) | 118,1 | - 437,3 |
| 22. | Этанол С2Н5ОН | lgр = 7,81158 – 1918,508/(252,125 + t) | 78,5 | - 234,9 |
| 23. | Этилацетат С4Н8О2 | lgр = 6,22672 – 1244,951/(217,881 + t) | 77 | - 442,9 |
| 24. | 2,2-Диметилбутан С6Н14 | lgр = 5,87976 – 1081,176/(229,343 + t) | 49,7 | - 185,6 |
| 25. | Диметиловый эфир С2Н6О | lgр = 6,34963 – 1004,099/(254,831 + t) | - 24,8 | - 184 |
| 26. | Дипропиловый эфирС6Н14О | lgр = 6,2408 - 1397,34/(240,177 + t) | 89,5 | - 293,4 |
| 27. | 2-Метилбутан С5Н12 | lgр = 5,91799 – 1022,511/(233,493 + t) | 27,9 | - 154,5 |
| 28. | Муравьиная кислота СН2О2 | lgр = 4,99272 - 765,889/(154,546 + t) | 100,8 | - 378,6 |
| 29. | Циклогексан С6Н12 | lgр = 5,96991 – 1203,526/(222,863 + t) | 80,7 | - 123,13 |
| 30. | Циклогексанон С6Н10О | lgр = 6,33089 – 1670,009/(230,312 + t) | 155,6 | - 226 |
| 31. | Циклогексен С6Н10 | lgр = 6,0111 - 1229,973/(224,104 + t) | 82,9 | - 5,36 |
| 32. | Циклопентан С5Н10 | lgр = 6,00291 – 1119,208/(230,738 + t) | 49,3 | -77,2 |
| 33. | 2-Метилгексан С7Н16 | lgр = 5,99812 – 1236,026/(219,545 + t) | 90 | - 194,9 |
| 34. | Пентанон-2 С5Н10О | lgр = 6,98913 – 1870,4/(273,2 + t) | 103,3 | - 258,6 |
|  |  |  |  |  |

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

**Расчетная часть (примеры решения задач).**

Все расчеты выполняются для вещества, указанного в Вашем задании.

***1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ***

*Коэффициент 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.

Коэффициент горючести рассчитывается по следующей формуле:

*К = 4 n(C) + 4 n(S) + n(H) + n(N) – 2 n(O) – 2 n(Cl) – 3 n(F) – 5 n(Br)*, где (1.1)

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

Если коэффициент горючести *К* больше единицы *(К ≥ 1)*, то вещество является горючим; при значении *К* меньше единицы *(К < 1)* – вещество негорючее.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет коэффициента горючести веществ*** | ***Пример 1.1.*** Рассчитать коэффициент горючести анилина *С6Н5NH2* и хлорной кислоты HClO4. |

1. В молекуле анилина *n(C)* = 6; *n(Н)* = 7; *n(N)* = 1;

К = 4 ⋅ 6 + 7 + 1 = 32 К > 1, следовательно, анилин – горючее вещество.

2. В молекуле хлорной кислоты *n(Н)* = 1; *n(Cl)* = 1; *n(О)* = 4;

К = 1 *–* 2 ⋅ 4 *–* 2 ⋅ 1 = − 9 К < 1, хлорная кислота – негорючее вещество.

*Характер свечения пламени*

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

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

Если в горючем веществе при термическом разложении углерод не образуется, то вещество горит бесцветным пламенем как, например, в случае горения водорода Н2.

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

СН3ОН  СО + 2Н2

Такие вещества имеют голубоватые пламена (пламя угарного газа СО, метанола СН3ОН и этанола С2Н5ОН).

При горении веществ, содержащих более 75 % углерода (ацетилен С2Н2, бензол С6Н6), в зоне горения образуется настолько много частиц С, что поступающего путем диффузии воздуха не хватает для полного окисления всего углерода.

С6Н6  6С + 3Н2

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

Если кислород в веществе отсутствует или его содержание не превышает 30 %, но, в свою очередь, и массовая доля углерода не очень велика (менее 75 %), то при термическом разложении будет выделяться значительное количество частиц углерода, но при нормальном доступе воздуха в зону горения они успевают окислиться до СО2.

Возможная реакция при термическом разложении ацетона :

СН3СОСН3  СО + 2С + 3Н2.

В подобных случаях пламя будет яркое, но не коптящее.

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

Таблица 1.1. Характер свечения пламени в зависимости от ω (С) и ω (Н)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***Содержание углерода в***  ***горючем, ω (С) %*** | ***Содержание кислорода в горючем, ω (О) %*** | ***Характер свечения пламени*** |
| < 50 | > 30 | пламя бесцветное или голубоватое |
| < 75 | отсутствует или < 30 | пламя яркое, не коптящее |
| > 75 | отсутствует или < 25 | пламя яркое, коптящее |

|  |  |
| --- | --- |
| ***Определение характера свечения пламени*** | ***Пример 1.2.*** Определить характер свечения пламени метаналя НСОН, фенола С6Н5ОН и пентанола С5Н11ОН. |

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

Мr (НСОН) = 30

ω (С) = = 40 %; ω (О) =  = 53 %

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

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

Мr (С6Н5ОН) = 94

ω (С) = = 77 %; ω (О) =  = 17 %

Массовая доля углерода > 50 %, а массовая доля кислорода < 25 %, следовательно, пламя при горении фенола яркое и коптящее.

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

Мr (С5Н11ОН) = 88

ω (С) = = 68 %; ω (О) =  = 18 %

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

***2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ***

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

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

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

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

|  |  |
| --- | --- |
| ***Составление уравнений реакций горения***  ***в кислороде*** | ***Пример 2.1.*** Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана *С3Н8* и глицерина *С3Н8О3* , аммиака *NH3*, сероуглерода *CS2*. |

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.

Состав продуктов горения зависит от состава исходного вещества.

|  |  |
| --- | --- |
| Элементы, входящие в состав горючего | 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* |

### *Горение пропана в кислороде*

1. Записываем реакцию горения:

*С3Н8 + О2 = СО2 + Н2О*

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

*С3Н8 + О2 = 3СО2 + Н2О*

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

*С3Н8 + О2 = 3СО2 + 4Н2О*

4. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения

2⋅3 + 4 = 10

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

*С3Н8 + 5О2 = 3СО2 + 4Н2О*

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 ***β*.**

В первой реакции *β* = 5.

*Горение глицерина в кислороде*

1. Записываем уравнение реакции горения.

*С3Н8О3 + О2 = СО2 + Н2О*

2. Уравниваем углерод и водород:

*С3Н8О3 + О2 = 3СО2 + 4Н2О.*

3. В правой части уравнения 10 атомов кислорода.

В составе горючего вещества есть 3 атома кислорода, следовательно, из кислорода в продукты горения перешли 10 – 3 = 7 атомов кислорода.

Таким образом, перед кислородом необходимо поставить коэффициент 7 : 2 = 3,5

*С3Н8О3 +3,5О2 = 3СО2 + 4Н2О.*

В этой реакции *β* = 3,5.

*Горение аммиака в кислороде*

Аммиак состоит из водорода и азота, следовательно, в продуктах горения будут вода и молекулярный азот.

*NH3 + 0,75O2 = 1,5H2O + 0,5N2 β* = 0,75.

Обратите внимание, что перед горючим веществом коэффициент 1, а все остальные коэффициенты в уравнении могут быть дробными числами.

*Горение сероуглерода в кислороде*

Продуктами горения сероуглерода *CS2* будут углекислый газ и оксид серы (IV).

*CS2 + 3O2 = CO2 + 2SO2* *β* = 3.

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 и соотношение молей этих газов будет 1 : 3,76. Таким образом, можно записать, что **молекулярный состав воздуха (*О2 + 3,76N2*).**

|  |  |
| --- | --- |
| ***Составление уравнений реакций горения в воздухе*** | ***Пример 2.2.*** Составить уравнение реакции горения водорода, анилина, пропанола, угарного газа, хлорметана*,* диэтилтиоэфира*,* диметилфосфата. |

Составление реакций горения веществ в воздухе аналогично составлению реакций горения в кислороде. Особенность состоит только в том, что азот воздуха при температуре горения ниже 20000С в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

*Горение водорода в воздухе*

*Н2 + 0,5(О2 + 3,76N2) = Н2О + 0,5⋅3,76N2 β* = 0,5.

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

*Горение пропанола в воздухе*

*С3Н7ОН + 4,5(О2 + 3,76N2) =3СО2 + 4Н2О +4,5⋅3,76N2 β* = 4,5.

В составе горючего есть кислород, поэтому расчет коэффициента *β* проводят следующим образом: 10 – 1 = 9; 9 : 2 = 4,5.

*Горение анилина в воздухе*

*С6Н5NН2 + 7,75(О2 + 3,76N2) =6СО2 + 3,5Н2О + 0,5N2 +7,75⋅3,76N2 β* = 7,75.

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

*Горение угарного газа в воздухе*

*СО + 0,5(О2 + 3,76N2) =СО2 + 0,5⋅3,76N2 β* = 0,5.

*Горение хлорметана в воздухе*

*СН3Сl + 1,5(О2 + 3,76N2) =СО2 + НСl + Н2О +1,5⋅3,76N2 β* = 1,5.

*Горение диэтилтиоэфира в воздухе*

*(С2Н5)2 S + 7,5(О2 + 3,76N2) =4СО2 + 5Н2О + SO2 + 7,5⋅3,76N2 β* = 7,5.

*Горение диметилфосфата в воздухе*

*(СН3)2НРО4 + 3(О2 + 3,76N2) =2СО2 + 3,5Н2О + 0,5Р2О5 + 3⋅3,76N2 β* = 3.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет молей (киломолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения*** | ***Пример 2.3.*** Сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании 1 моля бензойной кислоты *С6Н5СООН?* |

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 киломоль 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.

**2.1. Расчет объема воздуха, необходимого для горения**

Расчет объема воздуха, необходимого для горения, предполагает вычисление

а) теоретического объема воздуха Vвтеор и б) практического объема воздуха Vвпр, 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 (Vвтеор*)*.**

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 ΔVв в реакции горения не расходуется и удаляется из зоны реакции вместе с продуктами горения. Таким образом, практический объем равен

*Vвпр = Vвтеор + ΔVв* (2.1)

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

*ΔVв= Vвпр - Vвтеор* (2.2)

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

 (2.3)

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.

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

Избыток воздуха имеется только в смеси, бедной по горючему компоненту. Из формул (3.2) и (3.3) следует

*ΔVв= Vвтеор(α −1)*  (2.4)

В закрытом объеме диффузионное горение большинства горючих материалов возможно только до определенной пороговой концентрации кислорода, так называемой ***остаточной концентрации кислорода в продуктах горения ϕ (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).

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

 (2.5)

2**.1.1. Горючее – индивидуальное химическое соединение**

Теоретический объем воздуха, необходимый для горения рассчитывается по уравнению реакции горения.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет теоретического объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества*** | ***Пример 2.4.*** Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира *С2Н5ОС2Н5?* Температура 100С, давление 1,2 ат |

1. Записываем уравнение реакции горения

1 кг *х* м3

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

М = 74 кг 6⋅4,76 ⋅ Vм = 6⋅4,76⋅19,35 м3

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

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

4. При нормальных условиях молярный объем (*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:

, 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.

**** м3/кмоль

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

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

Vвтеор =  7,5 м3

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества*** | ***Пример 2.5.*** Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 50 кг ацетона СН3СОСН3 при температуре 230С и давлении 95 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,2? |

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 м3

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

**** м3/кмоль

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

Vвтеор =  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.

**2.1.2. Горючее – смесь газов и паров**

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

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:

Vвтеор = , м3, (2.6)

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

*ϕ1, ϕ2, ϕ3*  – концентрации каждого горючего компонента смеси (в объемных %);

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

*VГГ* – объем газовой смеси, м3.

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

*Vвпр = Vвтеор ⋅ α.*

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет объема воздуха, необходимого для горения газовой смеси*** | ***Пример 2.6.*** 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. |

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) = Н2О +0,5⋅3,76N2 β2 = 0,5*

*СН4 + 2(О2 + 3,76N2) = СО2 + 2Н2О +2⋅3,76N2 β3 = 2*

2. По формуле (3.6) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

Vвтеор = = 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.

**2.1.3. Горючее – сложное вещество с известным элементным составом**

Состав таких веществ 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.

1 кг *х* м3

*С + (О2 + 3,76N2) = СО2 + 3,76N2*

12 кг 4,76⋅22,4 м3

Vв(С)теор = *х =* = 8,885 м3 – объем воздуха для сгорания 1 кг углерода.

1 кг *х* м3

*Н + 0,25(О2 + 3,76N2) = 0,5Н2О + 0,25⋅3,76N2*

1 кг 0,25⋅4,76⋅22,4 м3

Vв(Н)теор = *х =* = 26,656 м3 – объем воздуха для сгорания 1 кг водорода.

1 кг *х* м3

*S + (О2 + 3,76N2) = SО2 + 3,76N2*

32 кг 4,76⋅22,4 м3

Vв(S)теор = *х =* = 3,332 м3 – объем воздуха для сгорания 1 кг серы.

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.

Рассчитаем объем воздуха, в котором содержится 1 кг кислорода.

32 кг О2 − 4,76⋅22,4 м3 воздуха

1 кг − *х* м3

Vв(О)теор *= х =* = 3,332 м3 – объем воздуха, содержащий 1 кг кислорода.

Сопоставим полученные значения.

Vв(Н)теор : Vв(С)теор : Vв(S)теор :Vв(О)теор =

= 26,665 : 8,885 : 3,332 : 3,332 = 1 : 1/3 : 1/8 : 1/8

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 (2.7)

где

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

После подстановки в формулу (2.7) 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. (2.8)

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет объема воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава*** | ***Пример 2.7.*** 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. |

1. По формуле (3.8) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца торфа:

Vвтеор = 5 ⋅= 27,7 м3

2. 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.

**2.2. Расчет объема и процентного состава продуктов горения**

Состав продуктов горения зависит от химической природы горючего материала и условий его горения. 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*** – это оксид углерода (II) – угарный газ СО, 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.

**2.2.1. Горючее – индивидуальное химическое соединение**

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

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет объема и процентного состава продуктов горения индивидуального вещества*** | ***Пример 2.8.*** Определить объем и состав в объемных % продуктов горения, образовавшихся при сгорании 3 кг бензола С6Н6. Температура 200С, давление 770 мм рт.ст., коэффициент избытка воздуха α = 1,4. |

1. Записываем уравнение реакции горения

3 кг *х1* м3 *х2* м3 *х3* м3 *х4* м3

*С6Н6 + 7,5(О2 + 3,76N2) = 6СО2 + 3Н2О + 7,5⋅3,76N2*

М = 78 кг 7,5⋅4,76 ⋅ Vм = 6⋅Vм = 3⋅Vм = 7,5⋅3,76⋅Vм =

=7,5⋅4,76⋅23,7 м3 =6⋅23,7 м3 =3⋅23,7 м3 =7,5⋅3,76⋅23,7 м3

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

**** м3/кмоль

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

*VПГ*=  33,9 м3

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

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

Vвтеор = *х1 =*  = 32,5 м3

Избыток воздуха определим по формуле (3.4):

ΔVв= Vвтеор(α −1) = 32,5(1,4 – 1) = 13 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит:

VПГ\* = VПГ + ΔVв = 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(СО2) = *х2* =  = 5,47 м3

V(Н2О) = *х3* =  = 2,73 м3

V(N2) = *х4* =  = 25,71 м3

ΔVв= 13 м3 (рассчитано в п.4)

Объемная концентрация каждого компонента смеси рассчитывается следующим образом:

ϕоб (СО2) =  = = 11,7 %

ϕоб (Н2О) =  = = 5,8 %

ϕоб (N2) =  = = 54,8 %

ϕоб (ΔVв) =  = = 27,7 %

Обратите 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.

**2.2.2. Горючее – смесь газов и паров**

При расчете продуктов горения газовой смеси необходимо знать, какой объем продуктов горения выделяются при сгорании 1 м3 каждого горючего газа смеси. Далее, зная процентное содержание (в объемных %) 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.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет объема и процентного состава продуктов горения газовой смеси*** | ***Пример 2.9.*** 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. |

1. Составляем уравнение реакции горения для всех горючих газов смеси:

*СН4 + 2(О2 + 3,76N2) = СО2 + 2Н2О +2⋅3,76N2 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 β(С2Н6) = 3,5*

При сгорании 1 м3 этана *С2Н6* образуется 2 м3 *СО2*, 3 м3 *Н2О* и 3,5⋅3,76 м3 *N*2.

*С3Н8 +,5(О2 + 3,76N2) =3СО2 + 4Н2О +5⋅3,76N2 β(С3Н8) =5*

При сгорании 1 м3 этана *С3Н8* образуется 3 м3 *СО2*, 4 м3 *Н2О* и 5⋅3,76 м3 *N*2.

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) =  =

=  = 1,08 м3

При сгорании 10 м3 газовой смеси объем образовавшегося углекислого газа составит:

V(СО2) = 1,08 ⋅ 10 = 10,8 м3

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

V(Н2О) =  = 1,7 м3

При сгорании 10 м3 газовой смеси объем паров воды будет:

V(Н2О) = 1,7 ⋅ 10 = 17 м3

Объем азота в продуктах горения составит для 1 м3 природного газа:

V(N2) =  = 6,55 м3,

а для 10 м3

V(N2) = 6,55 ⋅ 10 = 65,5 м3

Теоретический объем продуктов горения 10 м3 газовой смеси составит:

VПГ = V(СО2)+ V(Н2О)+ V(N2) *=* (10,8 + 17 + 65,5) = 93,3 м3

2. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α = 1,2, следовательно, в состав продуктов горения войдет и избыток воздуха. Для его расчета по формуле (3.6) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной газовой смеси:

Vвтеор = = 82,9 м3

Избыток воздуха определим по формуле (3.4):

ΔVв= Vвтеор(α −1) = 82,9⋅(1,2 – 1) = 16,6 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит:

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

1. Определим процентный состав продуктов горения:

ϕоб (СО2) =  = = 9,8 %

ϕоб (Н2О) =  = = 15,5 %

ϕоб (N2) =  = = 59,6 %

ϕоб (ΔVв) =  = = 15,1 %

**2.2.3. Горючее – сложное вещество с известным элементным составом**

В этом случае 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 углерода:

1 кг *х1* м3 *х2* м3

*С + (О2 + 3,76N2) = СО2 + 3,76N2*

12 кг 22,4 м3 3,76⋅22,4 м3

V(СО2) = *х1 =* = 1,87 м3

V(N2) = *х2 =* = 7,0 м3

Для водорода:

1 кг *х1* м3 *х2* м3

*Н + 0,25(О2 + 3,76N2) = 0,5Н2О + 0,25⋅3,76N2*

1 кг 0,5⋅22,4 м3 0,25⋅3,76⋅22,4 м3

V(Н2О) = *х1 =* = 11,2 м3

V(N2) = *х2 =* = 21,0 м3

Для серы:

1 кг *х1* м3 *х2* м3

*S + (О2 + 3,76N2) = SО2 + 3,76N2*

32 кг 22,4 м3 3,76⋅22,4 м3

V(SО2) = *х1 =* = 0,7 м3

V(N2) = *х2 =* = 2,63 м3

Для фосфора:

1 кг *х1* м3 *х2* м3

*Р + 1,25(О2 + 3,76N2) = 0,5Р2О5 + 1,25⋅3,76N2*

31 кг 0,5⋅22,4 м3 1,25⋅3,76⋅22,4 м3

V(Р2О5) = *х1 =* = 0,36 м3

V(N2) = *х2 =* = 3,4 м3

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

Объем 1 кг азота при нормальных условиях составит:

V(N2) =  = 0,8 м3

При нормальных условиях 1 кг паров воды займет объем:

V(Н2О) =  = 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(N2) = ** = 2,63 м3

Полученные значения выходов продуктов горения элементов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.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 | 1,87 |  |  |  | 7,0 |
| Водород |  | 11,2 |  |  | 21,0 |
| Сера |  |  | 0,7 |  | 2,63 |
| Фосфор |  |  |  | 0,36 | 3,4 |
| Азот в горючем |  |  |  |  | 0,8 |
| Азот за счет кислорода в горючем |  |  |  |  | − 2,63 |
| Влага в горючем |  | 1,24 |  |  |  |

Используя данные таблицы 3.1., 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(СО2) = *m⋅* , м3 (2.9)

V(H2O) = *m⋅* , м3 (2.10)

V(SО2) = *m⋅* , м3 (2.11)

V(N2) = *m⋅* , м3 (2.12)

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет объема и процентного состава продуктов горения вещества сложного элементного состава*** | ***Пример 2.10.*** 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. |

1. По формулам (2.9) – (2.12) определяем объем каждого компонента продуктов горения 5 кг каменного угля.

V(СО2) = 5*⋅*  = 7 м3

V(H2O) = 5*⋅*  = 2,31 м3

V(SО2) =5*⋅* = 0,085 м3

V(N2) = 5*⋅*  = 33,14 м3

VПГ = 7 + 2,31 + 0,085 + 33,14 = 42,5 м3

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

По формуле (2.8) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

Vвтеор = 5 ⋅= 38,6 м3

Избыток воздуха определим по формуле (2.4):

ΔVв= Vвтеор(α −1) = 38,6⋅(1,3 – 1) = 11,6 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит:

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

1. Определим процентный состав продуктов горения:

ϕоб (СО2) =  = = 12,9 %

ϕоб (Н2О) =  = = 4,3 %

ϕоб (SО2) =  = = 0,2 %

ϕоб (N2) =  =  = 61,2 %

ϕоб (ΔVв) =  = = 21,4 %

* 1. ***3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ***

Тепловое воздействие – один из наиболее опасных факторов пожара, который вызывает основные разрушения, уничтожает материальные ценности, вызывает гибель людей, определяет обстановку на пожаре, создает огромные трудности при его ликвидации. Расчет тепловых явлений, сопровождающих горение, позволяет принять правильные и своевременные меры противопожарные защиты.

Практически единственным источником тепловой энергии любого процесса горения, а значит, и любого пожара, является тепловой эффект химических реакций окисления в пламени, т.е. теплота горения, которая относится к важнейшим характеристикам пожарной опасности веществ и материалов.

**3.1. Расчет теплоты горения**

**Энтальпией горения** (ΔНгор, кДж/моль) вещества называется тепловой эффект реакции окисления 1 моль горючего вещества с образованием высших оксидов.

**Теплота горения** (Qгор) численно равна энтальпии горения, но противоположна по знаку.

Для индивидуальных веществ тепловой эффект реакции может быть рассчитан по

I следствию закона Гесса.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет теплового эффекта реакции горения индивидуального вещества*** | ***Пример 3.1.*** Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль бутана *С4Н10*. |

1. Запишем уравнение реакции горения бутана.

*С4Н10* *+ 6,5(О2 +3,76 N2) = 4СО2 + 5Н2О + 6,53,76 N2*

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

*ΔН0р-и =* *4ΔН0(СО2) + 5ΔН0(Н2О) - ΔН0(С4Н10)*.

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

*ΔН0(СО2)* = −393,5 кДж/моль; *ΔН0(Н2О)* = − 241,8 кДж/моль;

*ΔН0(С4Н10)* = − 126, 2 кДж/моль.

Подставляем эти значения в выражение для теплового эффекта реакции

*ΔН0р-и* = 4⋅(–393,5) + 5⋅(–241,8) – (− 126,2) = − 1656,8 кДж

*ΔН0р-и* = *ΔН0гор* = − 1656,8 кДж/моль или *Qгор* = + 1656,8 кДж/моль.

Таким образом, при сгорании 1 моля бутана выделяется 1656,8 кДж тепла.

В пожарно-технических расчетах часто пользуются понятием удельной теплоты горения. **Удельная теплота горения** – это количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании единицы массы или объема горючего вещества. Размерность удельной теплоты горения – кДж/кг или кДж/м3.

В зависимости от агрегатного состояния воды в продуктах горения различают низшую и высшую теплоту горения. Если вода находится в парообразном состоянии, то теплоту горения называют **низшей теплотой горения Qн**. Если пары воды конденсируются в жидкость, то теплота горения – **высшая Qв**.

Температура пламени достигает 100 К и выше, а вода кипит при 373 К, поэтому в продуктах горения на пожаре вода всегда находится в парообразном состоянии, и для расчетов в пожарном деле используется низшая теплота горения Qн.

Низшая теплота горения индивидуальных веществ может быть определена переводом значения ΔНгор, кДж/моль в Qн, кДж/кг или кДж/м3. Для веществ сложного элементного состава низшая теплота горения может быть определена по формуле Д.И. Менделеева. Кроме того, для многих веществ значения низшей теплоты горения приведены в справочной литературе, некоторые данные представлены в приложении 2.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Перевод значения энтальпии горения из кДж/моль в кДж/кг*** | ***Пример 3.2.*** Энтальпия горения этилацетата *СН3СООС2Н5* равна *ΔНгор* = − 2256,3 кДж/моль. Выразить эту величину в кДж/кг. |

Значение *ΔНгор* = − 2256,3 кДж/моль показывает, что при сгорании 1 моля этилацетата выделяется 2256,3 кДж тепла, т.е. *Qгор* = + 2256,3 кДж/моль.

1 моль *СН3СООС2Н5* имеет массу 88 г. Можно составить пропорцию

*М* (*СН3СООС2Н5)* = 88 г/моль *Qгор* = 2256,3 кДж/моль

1 кг = 1000 г *Qн* кДж/кг

 кДж/кг

В общем виде формула для перевода из размерности *кДж/моль* в *кДж/кг* выглядит следующим образом:

 ; кДж/кг (3.1)

Если необходимо осуществить перевод из размерности *кДж/моль* в *кДж/м3*, то можно воспользоваться формулой

, кДж/м3. (3.2)

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет низшей теплоты сгорания Qн по формуле Д.И. Менделеева*** | ***Пример 3.3.*** Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина *С12Н14О2N4S* |

Значения низшей теплоты сгорания веществ и материалов могут быть рассчитаны по формуле Д.И.Менделеева. Данная формула может быть использована для расчетов *Qн* веществ сложного элементного состава, а также для любых индивидуальных веществ, если предварительно рассчитать массовую долю каждого элемента в соединении (*ω*).

*QН=339,4⋅ω(C)+1257⋅ω(H−108,9[(ω(O)+ω(N))−ω(S)]−25,1[9⋅ω(H)+ω(W)],*кДж/кг, Где *ω (С), ω (Н), ω (S), ω (О),ω (N)* – массовые доли элементов в веществе, %; *ω (W)* – содержание влаги в веществе, %.

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

Молярная масса сульфадимезина *С12Н14О2N4S* составляет 278 г/моль.

ω(C) = (12⋅12)/278 = 144/278 = 0,518 100 = 51,8 %

ω(H) = (1⋅14)/278 = 14/278 = 0,05 100 = 5,0 %

ω(O) = (16⋅2)/278 = 32/278 = 0,115 100 = 11,5 %

ω(N) = (14⋅4)/278 = 56/278 = 0,202 100 = 20,2 %

ω(S) = 100 – (51,8 + 5,0 + 11,5 + 20,2) = 11,5 %

2. Подставляем найденные значения в формулу Д.И. Менделеева.

*QН =* 339,451,8+12575,0−108,9(11,5+20,2−11,5)−25,195,0 = 22741 кДж/кг.

***Теплота горения смеси газов и паров*** определяется как сумма произведений теплот горения каждого горючего компонента (*Qн)* на его объемную долю в смеси (*ϕоб*):

*Qн* = , кДж/м3. (3.4)

Можно воспользоваться эмпирической формулой для расчета *Qн* для смеси:

*Qн=126,5⋅ϕ(СО)+107,7⋅ϕ(Н2)+358,2⋅ϕ(СН4)+590,8⋅ϕ(С2Н4)+636,9⋅ϕ(С2Н6)+913,4⋅ϕ(С3Н8)+1185,8⋅ϕ(С4Н10)+1462,3⋅ϕ(С5Н12)+234,6⋅ϕ(Н2S)*,кДж/м3 (3.5)

**3.2. Расчет температуры горения**

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 (табл.3.1).

Таблица 3.1. Условия определения температуры горения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***Температура горения*** | ***Условия определения*** | | |
| ***Q потерь*** | ***α*** | ***Учет диссоциации ПГ*** |
| Теоретическая | 0 | 1 | да |
| Калориметрическая | 0 | 1 | нет |
| Адиабатическая | 0 | ≠1 | нет |
| Действительная | ≠0 | ≠1 | нет |

В общем случае для вычисления температуры горения используется следующая зависимость:

*QПГ = VПГ ⋅ ⋅ТГ* , где (3.6)

*QПГ* – теплота (теплосодержание) продуктов горения, кДж/кг; *VПГ* – объем продуктов горения, м3/кг; **– средняя объемная теплоемкость смеси продуктов горения в интервале температур от Т0 до Тг, кДж/м3⋅К; *ТГ* – температура горения, К.

При расчете калориметрической температуры горения исходят из того, что теплопотери в окружающую среду отсутствуют, и в этом случае низшая теплота сгорания горючего вещества (*Qн)* равна теплосодержанию продуктов горения (*QПГ*), т.е. энергии, необходимой для нагревания продуктов горения от 00С до теоретической температуры горения.

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 (коэффицент теплопотерь η).

*Qпотерь = Qизлучения + Qнедожог + Qдиссоциации ПГ* (3.7)

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

Расчет температуры горения проводят по уравнению энергетического баланса:

*Qн ⋅ (1 – η) = VПГпр ⋅ Ср ⋅ (ТГ – Т0)* , где (3.8)

*Qн* – тепло, выделяемое в реакции горения, кДж;

*η*  – коэффициент теплопотерь; *Qн ⋅ (1 – η)= QПГ*;

*VПГпр* – объем продуктов полного горения с учетом избытка воздуха, м3;

*Ср* – средняя объемная теплоемкость продуктов горения при постоянном давлении, кДж/м3⋅К; *ТГ* – температура горения, К; *Т0* – начальная температура, К.

Из уравнения (3.8) следует, что для расчета температуры горения необходимо знать теплоту горения, объем и теплоемкость продуктов горения.

В первом приближении температуру горения можно рассчитать непосредственно из уравнения (3.6), имея в виду, что средняя теплоемкость газообразных продуктов горения в интервале температур 1500 – 2500 К может быть принята равной

** = 1,75 кДж/м3⋅К. Однако, теплоемкость зависит от температуры, и поэтому для более точных расчетов значения теплоемкостей берут из таблиц (приложение 3 и 4), а подсчет производят методом последовательных приближений (методом итераций), каждый раз определяя теплосодержание продуктов горения при выбранной температуре.

***Алгоритм расчета температуры горения***

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

*VПГпр = V(CO2) + V(H2O) + V(N2) + V(SO2) + ΔVвозд*

Расчет объема продуктов горения выполняется в зависимости от характера горючего вещества (индивидуальное вещество, смесь газов или вещество сложного элементного состава). Методика расчета приведена в примерах 2.8, 2.9, и 2.10.

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

2. 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 (3.3) расчет *Qн* может быть выполнен как для веществ с известным элементным составом, так и для индивидуальных веществ.

Для газовых смесей *Qн* рассчитывается по формулам (3.4) и (3.5).

3. Если по условию задачи есть теплопотери (*η*), то рассчитывается количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения *QПГ*

*QПГ = Qн (1* – *η)*, кДж/кг или кДж/м3(3.9)

4. Находим среднее теплосодержание продуктов горения *Qср*

при отсутствии теплопотерь (*η*)

*Qср = *, кДж/м3 (3.10)

при наличии теплопотерь

*Qср = *, кДж/м3 (3.11)

5. 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 100-2000С), чем по азоту.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при выбранной температуре Т1:

 (3.12)

Где *Q1(CO2), Q1(H2O), Q1(N2), Q1(SO2), Q1(возд)* – табличные значения теплосодержания газов при выбранной температуре Т1.

7. Сравниваем *Q1ПГ* с *Qн* или *QПГ*, рассчитанных по п.2 или п.3.

Если *Q1ПГ* < *Qн (QПГ),* то выбираем температуруТ2 > Т1 на 1000С;

если *Q1ПГ* > *Qн (QПГ),* то выбираем температуруТ2 < Т1 на 1000С .

8. Повторяем расчет теплосодержания продуктов горения при новой температуре Т2:



9. Расчет проводим до получения неравенства:

*Q1ПГ* < *Qн (QПГ) < Q2ПГ* , где

*Q1ПГ* и *Q2ПГ* – теплосодержание продуктов горения при температурах Т1 и Т2, отличающихся на 1000С.

10. Интерполяцией определяем температуру горения ТГ:

*ТГ = Т1* +  (3.13)

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

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет действительной температуры горения индивидуального вещества*** | ***Пример 3.4.*** Вычислить действительную температуру горения анилина *С6Н5NH2*, если потери тепла излучением составляют 20 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,1. |

1. Составляем уравнение реакции горения анилина:

*С6Н5NH2 + 7,75(O2 + 3,76 N2) = 6 CO2 + 3,5 H2O + 7,75⋅3,76 N2 + 0,5 N2*

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

nвтеор = 7,75 ⋅ 4,76 = 36,89 моль

Δnв = nвтеор (α –1) = 36,89 (1,1 – 1) = 3,689 моль

nпгпр = n(СО2)+n(Н2О) n(N2)+n(ΔVв) = 6 + 3,5 + 7,75⋅3,76 + 0,5 + 3,689 = 42,829 моль

2. Теплота горения анилина по справочным данным составляет

Qгор = 3484, кДж/моль = 3484000 Дж/моль

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

QПГ = 3484000 (1 – 0,2) = 2787200 Дж/моль

4. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения:

*Qср = * 65077,4 Дж

5. По таблице приложения 3, ориентируясь на азот, определяем Т1 = 18000С

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 18000С.

QПГ1800 = 96579,5⋅6 + 77598,8⋅3,5 + 59539,9⋅7,75⋅3,76 + 66000⋅3,689 = 2859312,7 Дж

7. QПГ1800 = 2859312,7 > QПГ = 2787200 , следовательно, выбираем Т2 = 17000С

8. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при 17000С.

QПГ1700 = 90545,9⋅6 + 72445,1⋅3,5 + 55936,5⋅7,75⋅3,76 + 56397,4⋅3,689=2662844,5 Дж

QПГ1700 = 2662844,5 < QПГ = 2787200, следовательно температура горения находится в интервале от 1700 до 18000С.

9. Рассчитываем температуру горения:

ТГ =1700 + = 17630С = 2036 К

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет действительной температуры горения сложного вещества с известным элементным составом*** | ***Пример 3.5.*** 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. |

1. По формулам (2.9) – (2.12) определяем объем каждого компонента продуктов горения 1 кг горючего сланца.

V(СО2) =  = 0,651 м3

V(H2O) =  = 0,746 м3

V(SО2) == 0,028 м3

V(N2) =  = 3,455 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 (3.8) определяем теоретический объем воздуха, необходимый для горения данной массы образца угля:

Vвтеор = = 4,28 м3

Избыток воздуха определим по формуле (2.4):

ΔVв= Vвтеор(α −1) = 4,28⋅(1,2 – 1) = 0,856 м3

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит:

VПГ\* = VПГ + ΔVв = 4,88 + 0,856 = 5,736 м3

3. Рассчитываем Qн по формуле Д.И. Менделеева.

Qн = 339,4⋅35 + 1257⋅5 – 108,9⋅(10 + 1 – 4) – 25,1⋅(9⋅5 + 15) = 15881,7 кДж/кг

4. С учетом теплопотерь определяем теплосодержание продуктов горения:

QПГ = 15881,7 (1,1 – 1) = 14293,53 кДж/кг

5. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения:

*Qср = *2480,22 кДж/м3

По таблице приложения 4, ориентируясь на азот, определяем Т1 = 15000С.

6. Определяем теплосодержание продуктов горения при 15000С:

QПГ1500 = 3505,7⋅0,651 + 2781,3⋅0,746 + 2176,7⋅3,455 + 3488,2⋅0,028 + 2194,7⋅0,856 = 13853,889 кДж

7. QПГ1500 = 13853,889 < QПГ = 14293,53, следовательно, выбираем Т2 = 16000С.

8. Определяем теплосодержание продуктов горения при 16000С:

QПГ1600 = 3771,4⋅0,651 + 3004,2⋅0,746 + 2335,5⋅3,455 + 3747,5⋅0,028 + 2355,2⋅0,856 = 14886,44 кДж

9. QПГ1600= 14886,44 > QПГ = 14293,53, следовательно, температура горения вещества находится в интервале от 1500 до 16000С.

10. Определяем температуру горения:

ТГ =1500 + = 15560С = 1829 К

***ГОРЕНИЕ ГАЗО- И ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ***

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет концентрационных пределов распространения пламени*** | ***Пример 4.1.*** Рассчитать КПР газа пропана *С3Н8.* |

Концентрационные пределы распространения пламени (область воспламенения) для газо- и паровоздушных смесей могут быть рассчитаны по следующей формуле

 , %, (4.1)

где *ϕ Н(В)*- нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени ( НКПР и ВКПР ), %;

*β* - число молекул кислорода ( коэффициент перед кислородом в уравнении реакции горения вещества );

*a* и *b* - константы, имеющие значения, приведенные в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значения коэффициентов “*а*” и “*b*” для расчета КПРП

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *КПР* | *а* | *b* |
| НКПР | 8,684 | 4,679 |
| ВКПР |  |  |
| β≤ 7,5 | 1,550 | 0,560 |
| β> 7,5 | 0,768 | 6,554 |

1. Составляем уравнение реакции горения этанола.

*С3Н8 + 5( О2 + 3,76 N2 ) =3СО2 + 4Н2О + 5 3,76 N2* *β = 5*

2. ϕн  = НКПР = 2,07 %

ϕв  = ВКПР =  12,03%

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет безопасных концентрации газов и паров с использованием коэффициентов безопасности*** | ***Пример 4.2.*** Газоанализатор показал наличие 0,3 % паров амилацетата СН3СООС5Н11. Можно ли проводить сварочные работы? |

Значения НКПР И ВКПР следует применять при расчетах безопасных концентраций газов и паров с использованием коэффициентов безопасности:

*ϕг.без.* ≤ , где (4.2)

*ϕг.без.* – безопасная концентрация горючих газов, паров или пылей, % объемных;

*ϕ*н – НКПР, % объемных; Кб – коэффициент безопасности.

1. При расчете взрывобезопасных концентраций газов, паров и пылей внутри технического оборудования, трубопроводов, вентиляционных систем. *Кб = 2.*

2. При расчете взрывобезопасных концентраций газов, парво, пылей в воздухе рабочей зоны с потенциальными источниками зажигания *Кб = 20.*

1. Составляем уравнение реакции горения амилацетата.

*СН3СООС5Н11 + 9,5( О2 + 3,76 N2 ) =7СО2 + 7Н2О + 9,5 3,76 N2* *β = 9,5*

2. ϕн  = НКПР =  1,14 %

3. Рассчитаем безопасную концентрацию:

ϕг.без. =  0,05 %

0,3 > 0,05, следовательно, проводить сварочные работы нельзя.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет стехиометрической концентрации*** | ***Пример 4.3.*** Рассчитать ϕстех пропана в % объемных и г/м3 при температуре 250С и давлении 95 кПа*.* |

Стехиометрической концентрацией называется такая концентрация, когда реагирующие вещества взяты в эквивалентных отношениях, при этом коэффициент избытка воздуха α = 1.

Расчет стехиометрической концентрации производится по уравнению реакции горения индивидуального вещества. Общие формулы для вычисления объемной и массовой стехиометрической концентрации следующие:

*ϕстехобъем* = , % (4.3)

*ϕстехмасс* = , г/м3. (4.4)

1. Уравнение реакции горения пропана.

*С3Н8 + 5( О2 + 3,76 N2 ) = 3СО2 +4Н2О + 5 3,76 N2*

*β = 5*

ϕстехобъем =  = 4,03 %

2. Молярная масса М (С3Н8) = 46 г/моль (кг/кмоль);

Vм = = 26,1 м3/кмоль

ϕстехмасс =  = 71,0 г/м3.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет коэффициента избытка воздуха α на ϕн и ϕв*** | ***Пример 4.4.*** Рассчитать значение α для реакции горения пропана *С3Н8*  при концентрации газа, равной *ϕн* и *ϕв.* |

1. В примере 7.1. были рассчитаны значения НКПР и ВКПР для пропана.

ϕн  = 2,07 %; ϕв  = 12,03%.

Это означает, что в 100 м3 пропано-воздушной смеси на НКПР содержится

2,07 м3 пропана и 97,93 м3 воздуха (Vвпр); на ВКПР – 12,03 м3 пропана и 87,97 м3 воздуха.

2. Для НКПР рассчитаем теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 2,07 м3 пропана.

2,07 м3 *х* м3

*С3Н8 + 5( О2 + 3,76 N2 ) = 3СО2 +4Н2О + 5 3,76 N2*

Vм м3 5⋅4,76⋅Vм м3

*х* = Vвтеор = 2,07 ⋅ 5 ⋅ 4,76 = 49,27 м3

3. Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе распространения пламени составит

α =  = 1,99

3. Аналогично рассчитаем для ВКПР Vвтеор и соответствующее значение α:

12,03 м3 *х* м3

*С3Н8 + 5( О2 + 3,76 N2 ) = 3СО2 +4Н2О + 5 3,76 N2*

Vм м3 5⋅4,76⋅Vм м3

*х* = Vвтеор = 12,03 ⋅ 5 ⋅ 4,76 = 286,31 м3

α =  = 0,31

Формула (4.1.) для расчета концентрационных пределов распространения пламени справедлива при температурах среды близкой к 200С. Как было указано выше, КПР не являются постоянной величиной и зависят от многих факторов. С повышением температуры область КПР расширяется, и, следовательно, для повышенных температур необходимо производить расчет с учетом изменения температуры.

Приближенно это можно сделать с помощью следующих формул:

*ϕн(t) = ϕн* ⋅ (4.6)

*ϕв(t) = ϕв* ⋅, где (4.7)

*ϕн, ϕв* – концентрационные пределы распространения пламени, рассчитанные или определенные экспериментально при ~ 200С;

*ϕн(t) ,ϕн(t)* – концентрационные пределы распространения пламени при температуре Т;

1550 К, 1100 К – температура горения соответственно на НКПР и ВКПР.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет КПР при повышенных температурах*** | ***Пример 4.5.*** Рассчитать КПР газа пропана *С3Н8* при 3000С. |

1. В примере 7.1. были рассчитаны значения НКПР и ВКПР для пропана при 200С:

ϕн  = 2,07 %; ϕв  = 12,03%.

2. С учетом заданной температуры КПР составят:

ϕн(t) = 2,07 ⋅ = 1,61 %

ϕв(t) = 12,03 ⋅ = 16,20 %

Для определения КПР смесей газов и паров можно воспользоваться формулой Ле Шателье:

*ϕн(см) = *, % (4.7)

*ϕв(см) = *, % где (4.8)

*ϕн(см), ϕн(см)* – концентрационные пределы распространения пламени смеси;

*ϕн1, ϕн2, ϕн3*  - НКПР каждого компонента газовой смеси;

*ϕв1, ϕв2, ϕв3*  - ВКПР каждого компонента газовой смеси.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет КПР газовой смеси*** | ***Пример 4.6.*** Рассчитать КПР смеси газов следующего состава:угарный газ СО – 10 %; водород Н2 – 60 %; метан СН4 – 30 %. |

1. Определяем НКПР и ВКПР каждого горючего компонента (по справочным данным или расчетным путем):

для угарного газа ϕн = 12,5 %; ϕв = 74 %

для водорода ϕн = 4 %; ϕв = 75 %

для метана ϕн = 5 %; ϕв = 15 %

2. Определяем НКПР и ВКПР для смеси газов по формулам (4.6) и (4.7):

ϕн(см) *= * = 4,58 %

ϕв(см) *= * = 34 %.

При взрыве газо- и паровоздушных смесей протекает кинетическое горение в замкнутом объеме. Давление, развиваемое при взрыве в этих условиях, зависит от соотношения числа молей продуктов горения, числа молей исходных веществ и температуры взрыва. Для большинства горючих веществ давление при взрыве лежит в пределах 0,6 – 1 МПа.

Наименьшее давление при взрыве развивается при концентрациях горючего вещества, равных нижнему и верхнему концентрационным пределам распространения пламени. Оно обычно не превышает 0,3 МПа. Это объясняется низкой температурой взрыва. На НКПР она равна 1550 К, на ВКПР – 1100 К. Наибольшее давление при взрыве наблюдается при концентрации, близкой к стехиометрической.

Расчет максимального давления взрыва производится по следующей формуле:

Рвзр =  , где (4.9)

Р0 – начальное давление, кПа (МПа); *Т0* – начальная температура, К;

*Твзр* – температура взрыва, К; *m* – число молей (киломолей) газообразных продуктов горения; *n* – число молей (кисломолей) исходных газообразных веществ.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Расчет максимального давления взрыва газов и паров*** | ***Пример 4.7.*** Вычислить максимальное давление взрыва смеси гексана С6Н14 с воздухом, если начальное давление 101,3 кПа, начальная температура 273 К, температура взрыва 2355 К. |

1. Уравнение реакции горения гексана в воздухе:

*С6Н14 + 9,5( О2 + 3,76 N2 ) =6СО2 + 7Н2О + 9,5 3,76 N2*

2. 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

**Литература:**

**Основная литература**

1. В.Р. Малинин и др. Теория горения и взрыва. Учебник для вузов МЧС России / Под ред. проф. В.С. Артамонова / СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2011 г. – 306 с. (http://192.168.0.15/?9&type=card&cid=ALSFR-171ddc57-2e70-4373-a34c-9592fca88130)

2. Порев В.А. Теория горения и взрыва [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Горев В.А.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010.— 200 c.— Режим доступа: (http://www.iprbookshop.ru/16330) .— ЭБС «IPRbooks» , по паролю

3. Баратов А.Н., Пчелинцев В.А. Пожарная безопасность: Учеб. пособие (издание 2-е доп., перераб.). – М.: Изд-во АСВ, 2006 (http://192.168.0.15/?21&type=card&cid=ALSFR-198a1904-2851-44ba-96aa-5894f4336302)

**Дополнительная литература**

1. Кутуев Р.Х., Малинин В.Р., Кожевникова Н.Ю. и др. Теоретические основы процессов горения. /Учебное пособие. - СПб.: СПбВПТШ МВД РФ, 1998.

2. Кутуев Р.Х., Ловчиков В.А. Теоретические основы процессов горения.Лабораторный практикум. – Спб.: СПбУ МВД России, 2001.

3. Абдурагимов И.М. и др. Процессы горения (Учебное пособие) - М.: ВИПТШ МВД СССР.1984. (http://192.168.0.15/?33&type=card&cid=ALSFR-5efc2356-5e81-49bb-890b-8dd2e9699796)

**Специализированные периодические издания**

1. Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (http://vestnik.igps.ru/)

2. Физика горения и взрыва: журнал/ РАН. Сибирское отделение. - Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 1965 - Выходит раз в два месяца. - ISSN 0430-6228

**Справочно-библиографические издания**

1. Химия [Текст]: химический энциклопедический словарь / ред. И.Л. Кнунянц. - М.: Сов. энциклопедия, 1983. - 972 с. - ISBN 5-85270-253-6 (http://192.168.0.15/?74&type=card&cid=ALSFR-6a9977dc-b7ef-490e-86f1-b489423c0696)

2. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения (Справ, изд. 1 книга) / Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. - М.: Химия, 1990. (http://192.168.0.15/?29&type=card&cid=ALSFR-336d7232-b5ea-4571-bf05-f45cfdd3df8a)

3. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения (Справ, изд. 2 книга) / Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. - М.: Химия, 1990. (http://192.168.0.15/?29&type=card&cid=ALSFR-336d7232-b5ea-4571-bf05-f45cfdd3df8a)

**Федеральные законы**

1. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности». (Электронная ссылка - http://192.168.0.15/?37&type=card&cid=ALSFR-578320f1-fd79-4f32-bb80-9da94c1caf5d)
2. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». (Электронная ссылка - http://192.168.0.15/?41&type=card&cid=ALSFR-9cdeb6ca-4326-4c38-be2e-64ae8a5e21b2)