

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 280700 «Техносферная безопасность»*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 622.8
ББК 33н:33.18
П60

Портола В.А.

П60 Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.
ISBN 0-00000-000-0

В учебном пособии рассмотрены процессы горения газообразных, жидких и твердых горючих веществ, а также взрывы газовых смесей и конденсированных взрывчатых соединений. Приведены примеры расчета основных процессов горения и взрывчатых превращений. Представлены варианты задач по теории горения и взрыва для самостоятельного решения.

Предназначено для студентов вузов, изучающих теорию горения и взрыва.

УДК 622.8
ББК33н:33.18

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор КузГТУ
А.И. Фомин

Доктор технических наук, профессор ЮТИ ТПУ
Э.К. Спирин

Кандидат технических наук, доцент ЮТИ ТПУ
В.М. Гришагин

ISBN 0-00000-000-0

© Юргинский технологический институт (филиал)
Томского политехнического университета, 2012
© Портола В.А., Луговцова Н.Ю., Торосян Е.С., 2012
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ.....	6
1.1 Расчет коэффициента горючести.....	6
1.2 Составление уравнений реакций горения в кислороде.....	7
1.3 Составление уравнений реакций горения в воздухе.....	8
1.4 Расчет молей (киломолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения.....	9
1.5 Расчет объема воздуха, необходимого для горения.....	10
1.5.1 Расчет теоретического объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества.....	12
1.5.2 Расчет объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества.....	13
1.6. Задание для самостоятельной проработки.....	14
2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ.....	17
2.1. Расчет объема воздуха, необходимого для горения газовой смеси.....	17
2.2. Расчет объема воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава.....	18
2.3. Расчет объема и процентного состава продуктов горения индивидуального вещества.....	19
2.4. Расчет объема и процентного состава продуктов горения газовой смеси.....	21
2.5. Расчет объема и процентного состава продуктов горения вещества сложного элементного состава.....	23
2.6. Задание для самостоятельной проработки.....	27
3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ.....	33
3.1. Расчет теплового эффекта реакции горения индивидуального вещества.....	33
3.2. Перевод значения энтальпии горения из кДж/моль в кДж/кг.....	34
3.3. Расчет низшей теплоты сгорания Q_n по формуле Д.И. Менделеева.....	35
3.4. Расчет температуры горения.....	36
3.4.1. Расчет действительной температуры горения индивидуального вещества.....	40
3.4.2. Расчет действительной температуры горения сложного вещества с известным элементным составом.....	41
3.5. Задание для самостоятельной проработки.....	42
4. ПЛАМЯ И ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ. РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ.....	46

4.1. Расчет стехиометрической концентрации.....	46
4.2. Определение характера свечения пламени.....	47
4.3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени (КПР) по аппроксимационной формуле.....	48
4.4. Расчет КПР газовой смеси.....	50
4.5. Расчет КПР при повышенных температурах.....	51
4.6. Расчет размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров.....	52
4.7. Расчет безопасных концентраций газов и паров с использованием коэффициентов безопасности.....	55
4.8. Задание для самостоятельной проработки.....	56
5. ГОРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ.....	61
5.1. Расчет давления насыщенного пара по уравнению Антуана.....	61
5.2. Расчет объемной концентрации паров по давлению насыщенного пара.....	62
5.3. Вычисление объемной доли и объема пара в паровоздушной смеси.....	63
5.4. Расчет температурных пределов распространения пламени по данным уравнения Антуана.....	64
5.5. Расчет температурных пределов распространения пламени по структурной формуле вещества.....	65
5.6. Расчет скорости испарения и массы испарившейся жидкости.....	66
5.7. Расчет температуры вспышки и температуры воспламенения по структурной формуле.....	68
5.8. Задание для самостоятельной проработки.....	70
6. ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ ВЗРЫВА. ТРОТИЛОВЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ.....	79
6.1. Расчет максимального давления взрыва газов и паров.....	79
6.2. Расчет избыточного давления взрыва индивидуальных веществ....	80
6.3. Расчет тротилового эквивалента взрыва.....	84
6.4. Расчет радиуса зон разрушения.....	85
6.5. Задание для самостоятельной проработки.....	87
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СМЕСИ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ.....	91
7.1. Задание для самостоятельной проработки.....	98
Приложения.....	100
Список литературы.....	106

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

Учитывая опасность взрывов, в пособии рассмотрены вопросы возникновения ударных волн при воспламенении горючих газовых смесей, приведены примеры расчета величины избыточного давления и расстояния распространения ударных волн, на котором эти волны представляют угрозу для людей, зданий, сооружений и промышленных установок.

Применение навыков, полученных при изучении пособия, позволят повысить безопасность жизнедеятельности людей и устойчивость промышленных объектов в условиях чрезвычайных ситуаций.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРЕНИЯ

1.1. Расчет коэффициента горючести

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

Коэффициент горючести K является безразмерным коэффициентом и служит для определения горючести вещества. Рассчитанный коэффициент горючести может быть использован для приближенного вычисления температуры вспышки вещества, а также величины нижнего концентрационного коэффициента распространения пламени.

Для расчета коэффициента горючести можно использовать следующую формулу:

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

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

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

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

Пример 1.1. Рассчитать коэффициент горючести глюкозы $C_6H_{12}O_6$ и угольной кислоты H_2CO_3 .

Решение.

1. В молекуле глюкозы содержится атомов:

углерода $n(C) = 6$; водорода $n(H) = 12$; кислорода $n(O) = 6$.

Подставляя количество атомов в формулу 1.1, имеем

$$K = 4 \cdot 6 + 12 - 2 \cdot 6 = 24.$$

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

2. В молекуле угольной кислоты

$n(H) = 2$; $n(Cl) = 1$; $n(O) = 3$;

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

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

1.2. 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 1.1. приведены элементы, входящие в состав горючего вещества, и вещества, образующиеся в результате сгорания.

Таблица 1.1

Состав продуктов горения от состава исходного вещества

Элементы, входящие в состав горючего вещества	Продукты горения
Углерод С	Углекислый газ CO ₂
Водород Н	Вода Н ₂ О
Сера S	Оксид серы (IV) SO ₂
Азот N	Молекулярный азот N ₂
Фосфор P	Оксид фосфора (V) P ₂ O ₅
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.

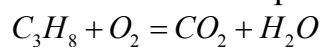
Стехиометрический коэффициент, показывающий число молей кислорода, необходимое для полного сгорания вещества, обозначается буквой ***β***.

Пример 1.2. Составить уравнение реакции горения в кислороде пропана C₃H₈, глицерина C₃H₈O₃, аммиака NH₃, сероуглерода CS₂.

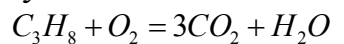
Решение.

Горение пропана в кислороде

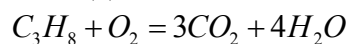
1. Записываем реакцию горения



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



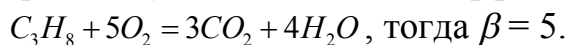
3. Атомов водорода в молекуле пропана 8, из них образуется 4 молекулы воды



4. Подсчитаем число атомов кислорода в правой части уравнения

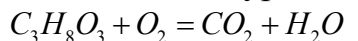
$$2 \cdot 3 + 4 = 10$$

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

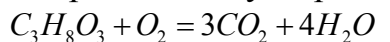


Горение глицерина в кислороде

1. Записываем уравнение реакции горения.



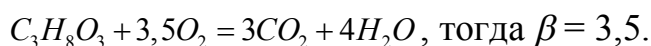
2. Уравниваем углерод и водород



3. В правой части уравнения 10 атомов кислорода.

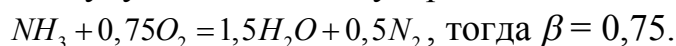
В составе горючего вещества есть 3 атома кислорода, следовательно, из кислорода в продукты горения перешли $10 - 3 = 7$ атомов кислорода.

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



Горение аммиака в кислороде

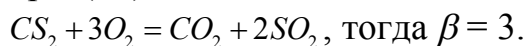
Аммиак состоит из водорода и азота, следовательно, в продуктах горения будут вода и молекулярный азот.



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 CS_2 будут углекислый газ и оксид серы (IV).



1.3. 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 ($79 : 21 = 3,76$).

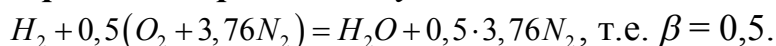
В соответствии с законом Авогадро, соотношение молей этих газов будет 1 : 3,76. Таким образом, можно записать, что **молекулярный состав воздуха ($O_2 + 3,76N_2$)**.

Составление реакций горения веществ в воздухе аналогично составлению реакций горения в кислороде. Особенность состоит только в том, что азот воздуха при температуре горения ниже 2000 °С в реакцию горения не вступает и выделяется из зоны горения вместе с продуктами горения.

Пример 1.3. Составить уравнение реакции горения в воздухе водорода H_2 , анилина $C_6H_5NH_2$, пропанола C_3H_7OH , угарного газа CO .

Решение.

Горение водорода в воздухе



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

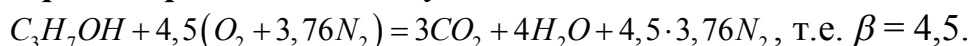
Горение анилина в воздухе



т.е. $\beta = 7,75$.

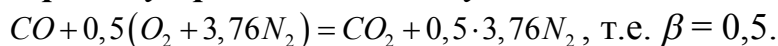
В этом уравнении азот в правой части уравнения встречается дважды: азот воздуха и азот из горючего вещества.

Горение пропанола в воздухе



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

Горение угарного газа в воздухе



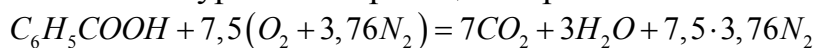
1.3. Расчет молей (киломолей) исходных веществ и продуктов реакции по уравнению реакции горения

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

Пример 1.4. Сколько молей исходных веществ участвовало в реакции и сколько молей продуктов горения образовалось при полном сгорании 1 моля бензойной кислоты C_6H_5COOH ?

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бензойной кислоты.



2. Исходные вещества: 1 моль бензойной кислоты;

7,5 молей кислорода;

7,5·3,76 молей азота.

Газов воздуха всего $7,5 \cdot 4,76$ молей.
 Всего $(1 + 7,5 \cdot 4,76)$ молей исходных веществ.
 3. Продукты горения: 7 молей углекислого газа;
 3 моля воды;
 $7,5 \cdot 3,76$ моля азота.
 Всего $(7 + 3 + 7,5 \cdot 3,76)$ молей продуктов горения.

Аналогичные соотношения и в том случае, когда сгорает 1 кило-моль 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.

1.5. Расчет объема воздуха, необходимого для горения

Расчет объема воздуха, необходимого для горения, предполагает вычисление:

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

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

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

$$V_g^{np} = V_g^{теор} + \Delta V_g \quad (1.2)$$

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

$$\Delta V_g = V_g^{np} - V_g^{теор} \quad (1.3)$$

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

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

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 $\alpha = 1$, 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 $\alpha > 1$ горючую смесь называют *бедной по горючему компоненту*, а при $\alpha < 1$ – *богатой по горючему компоненту*. В технике эти понятия имеют очень большое значение для правильного управления организованным 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

$$\Delta V_g = V_g^{теор} (\alpha - 1) \quad (1.5)$$

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 $\varphi(O_2)^{III}$* . Для большинства органических веществ она составляет 12–16 % O_2 . Для некоторых веществ, например ацетилена C_2H_2 , ряда металлов, горение возможно и при значительно меньшем содержании кислорода (до 5 % объемных O_2).

Коэффициент избытка воздуха для диффузионного горения правильнее назвать *коэффициент участия воздуха в горении*. Эта характеристика более полно отражает суть процесса горения на пожаре и не дает ошибочных представлений и понятий. Это важный параметр, опре-

деляющий динамику развития пожара и, как следствие, развитие его опасных факторов.

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

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi(O_2)^{III}}. \quad (1.6)$$

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

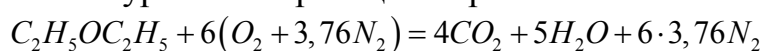
1.5.1. Расчет теоретического объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества

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

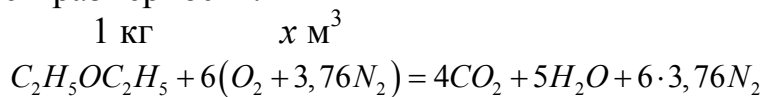
Пример 1.5. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания 1 кг диэтилового эфира $C_2H_5OC_2H_5$? Температура $10^\circ C$, давление 1,2 атм.

Решение.

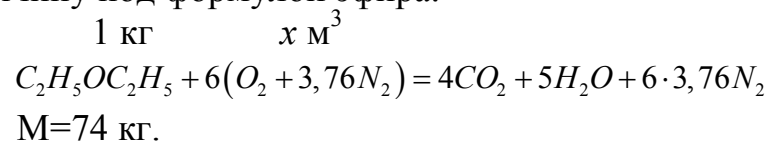
1. Записываем уравнение реакции горения



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



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



4. При нормальных условиях молярный объем (V_M) любого газообразного вещества составляет 22,4 л/моль или $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

Если условия отличаются от нормальных, то необходимо определить, какой объем будет занимать 1 кмоль любого газообразного вещества при данных условиях. Расчет V_M ведут по формуле объединенного газового закона:

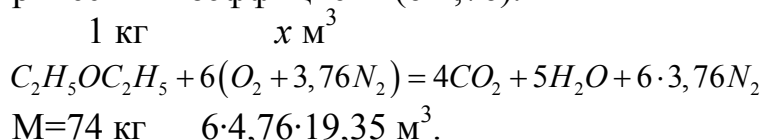
$$V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P},$$

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

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

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

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



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

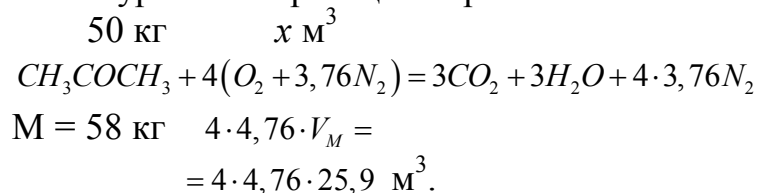
$$V_g^{np} = x = \frac{1 \cdot 6 \cdot 4,76 \cdot 19,35}{74} = 7,5 \text{ м}^3.$$

1.5.2. Расчет объема воздуха, необходимого для горения индивидуального вещества

Пример 1.5. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания 50 кг ацетона CH_3COCH_3 при температуре 23 °С и давлении 95 кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха 1,2?

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения



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

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

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

$$V_g^{теор} = x = \frac{50 \cdot 4 \cdot 4,76 \cdot 25,9}{58} = 425,1 \text{ м}^3.$$

4. По условию задачи коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

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

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

1.6. Задание для самостоятельной проработки

Задача 1.1. Рассчитать коэффициент горючести приведенных веществ (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Задание к задаче 1.1

№ вар	Вещества	
1	метионин $C_3H_{11}NO_2S$	азотная кислота HNO_3
2	глюкоза $C_6H_{12}O_6$	угольная кислота H_2CO_3
3	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	лимонная кислота $C_6H_8O_7$
4	дихлорметан CH_2Cl_2	уксусная кислота $C_2H_4O_2$
5	глутамин $C_5H_{10}N_2O_3$	хлорметан CH_3Cl
6	аспартам $C_{14}H_{18}N_2O_5$	фосген $COCl_2$
7	хинин $C_{20}H_{24}O_2N_2$	серная кислота H_2SO_4
8	аспарагин $C_4H_8N_2O_3$	хлорметан CH_3Cl
9	нитробензол $C_6H_5NO_2$	сероуглерод CS_2
10	анилин $C_6H_5NH_2$	метан CH_4
11	мочевина NH_2CONH_2	диоксид хлора ClO_2
12	винная кислота $H_2C_4H_4O_6$	сернистая кислота H_2SO_3
13	формамид $HCONH_2$	хлористая кислота $HClO_2$
14	глицин $C_2H_5NO_2$	циклогексан C_6H_{12}
15	бутиловый спирт C_4H_9OH	ацетилен C_2H_2
16	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	толуол C_7H_8
17	фенол C_6H_5OH	кетен CH_2CO
18	нитрат аммония NH_4NO_3	антрацен $C_{14}H_{10}$
19	стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$	этилен C_2H_4
20	диметилсульфид CH_3SCH_3	бензол C_6H_6

Задача 1.2. 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. 1.3.

Таблица 1.3

Задание к задаче 1.2

№ вар.	Вещество
1	ацетилен C_2H_2
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$
3	толуол C_7H_8
4	метан CH_4
5	этанол C_2H_5OH
6	бензол C_6H_6
7	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$

Окончание табл. 1.3

8	бутан C_4H_{10}
9	пентанол $C_5H_{11}OH$
10	фенол C_6H_5OH
11	ксилол C_8H_{10}
12	этилен C_2H_4
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$
14	бутилен C_4H_8
15	метанол CH_3OH
16	формальдегид CH_2O
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$
18	винилхлорид C_2H_3Cl
19	хлорид аммония NH_4Cl
20	бромэтан C_2H_5Br

Задача 1.3. Какой теоретический объем воздуха необходим для полного сгорания m кг вещества, при заданной температуре и давлении? Исходные данные по вариантам приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Задание к задаче 1.3

№ вар.	Вещество	Масса, кг	Температура, °C	Давление, атм
1	ацетилен C_2H_2	1	11	1,2
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$	2	12	1,2
3	толуол C_7H_8	3	13	1,2
4	метан CH_4	4	14	1,2
5	этанол C_2H_5OH	5	15	1,2
6	бензол C_6H_6	6	16	1,3
7	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	7	17	1,3
8	бутан C_4H_{10}	8	18	1,3
9	пентанол $C_5H_{11}OH$	9	19	1,3
10	фенол C_6H_5OH	10	20	1,3
11	ксилол C_8H_{10}	11	21	1,4
12	этилен C_2H_4	12	22	1,4
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$	13	23	1,4
14	бутилен C_4H_8	14	24	1,4
15	метанол CH_3OH	15	25	1,4
16	формальдегид CH_2O	16	8	1,1
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	17	9	1,1
18	винилхлорид C_2H_3Cl	18	10	1,1
19	хлорид аммония NH_4Cl	19	11	1,1
20	бромэтан C_2H_5Br	20	12	1,1

Задача 1.4. Какой объем воздуха необходим для полного сгорания m кг вещества при заданной температуре и давлении кПа, если горение протекало с коэффициентом избытка воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Задание к задаче 1.4

№ вар.	Вещество	Масса, кг	Температура, °С	Давление, кПа	Коэффициент избытка воздуха, α
1	ацетилен C_2H_2	20	15	85	1,0
2	нитробензол $C_6H_5NO_2$	22	16	87	1,0
3	толуол C_7H_8	24	17	89	1,1
4	метан CH_4	26	18	90	1,1
5	этанол C_2H_5OH	28	19	92	1,2
6	бензол C_6H_6	30	20	93	1,2
7	диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	32	21	94	1,3
8	бутан C_4H_{10}	34	22	95	1,3
9	пентанол $C_5H_{11}OH$	36	23	96	1,4
10	фенол C_6H_5OH	38	24	97	1,4
11	ксилол C_8H_{10}	40	25	98	1,5
12	этилен C_2H_4	42	26	99	1,5
13	этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$	44	15	85	1,4
14	бутилен C_4H_8	46	16	86	1,4
15	метанол CH_3OH	48	17	87	1,3
16	формальдегид CH_2O	50	18	88	1,3
17	дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	52	19	89	1,2
18	винилхлорид C_2H_3Cl	54	20	90	1,2
19	хлорид аммония NH_4Cl	56	21	91	1,1
20	бромэтан C_2H_5Br	58	22	92	1,1

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

2.1. Расчет объема воздуха, необходимого для горения газовой смеси

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

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:

$$V_{\text{г}}^{\text{теор}} = \frac{\beta_1 \cdot \varphi_1 + \beta_2 \cdot \varphi_2 + \beta_3 \cdot \varphi_3 + \dots - \varphi(O_2)}{21} \cdot V_{\text{гг}} \text{ м}^3, \quad (2.1)$$

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

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

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

$V_{\text{гг}}$ – объем газовой смеси, м^3 .

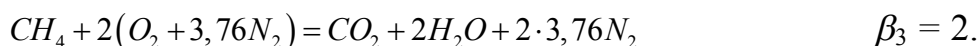
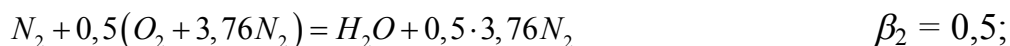
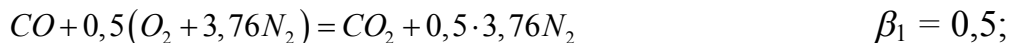
Если горение протекает с избытком воздуха, то практический объем воздуха рассчитывают по уже известной формуле

$$V_{\text{г}}^{\text{пр}} = V_{\text{г}}^{\text{теор}} \cdot \alpha.$$

Пример 2.1. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания 10 м^3 доменного газа следующего состава (в % объемных): оксид углерода (II) CO – 27 %; водород H_2 – 3 %; углекислый газ CO_2 – 13 %; метан CH_4 – 1 %; азот N_2 – 56 %. Горение протекает при $\alpha = 1,3$.

Решение.

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



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

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

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

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

2.2. Расчет объема воздуха, необходимого для горения вещества сложного элементного состава

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. Для этого воспользуемся методикой, изложенной в предыдущем разделе, – записываем в уравнении все известные и неизвестные величины и выводим пропорцию для углерода, водорода и серы:

$$\begin{aligned} &1 \text{ кг} \quad x \text{ м}^3 \\ &C + (O_2 + 3,76N_2) = CO_2 + 3,76N_2 \\ &12 \text{ кг} \quad 4,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\ &V_g(C)^{теор} = x = \frac{4,76 \cdot 22,4}{12} = 8,885 \text{ м}^3 - \end{aligned}$$

объем воздуха для сгорания 1 кг углерода;

$$\begin{aligned} &1 \text{ кг} \quad x \text{ м}^3 \\ &H + 0,25(O_2 + 3,76N_2) = 0,5H_2O + 0,25 \cdot 3,76N_2 \\ &1 \text{ кг} \quad 0,25 \cdot 4,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\ &V_g(H)^{теор} = x = \frac{0,25 \cdot 4,76 \cdot 22,4}{1} = 26,656 \text{ м}^3 - \end{aligned}$$

объем воздуха для сгорания 1 кг водорода;

$$\begin{aligned} &1 \text{ кг} \quad x \text{ м}^3 \\ &S + (O_2 + 3,76N_2) = SO_2 + 3,76N_2 \\ &32 \text{ кг} \quad 4,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\ &V_g(S)^{теор} = x = \frac{4,76 \cdot 22,4}{32} = 3,332 \text{ м}^3 - \end{aligned}$$

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.

$$32 \text{ кг } O_2 - 4,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \text{ воздуха}$$

$$1 \text{ кг} = x \text{ м}^3$$

$$V_g(O)^{теор} = x = \frac{4,76 \cdot 22,4}{32} = 3,332 \text{ м}^3 -$$

объем воздуха, содержащий 1 кг кислорода.

Сопоставим полученные значения:

$$V_g(H)^{теор} : V_g(C)^{теор} : V_g(S)^{теор} : V_g(O)^{теор} = 26,665 : 8,885 : 3,332 : 3,332 = 1 : 1/3 : 1/8 : 1/8.$$

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

$$V_g^{теор} = V_g(C)^{теор} \cdot \frac{\omega(C)}{100} + V_g(H)^{теор} \cdot \frac{\omega(H)}{100} + V_g(S)^{теор} \cdot \frac{\omega(S)}{100} - V_g(O)^{теор} \cdot \frac{\omega(O)}{100} \text{ м}^3, \quad (2.2)$$

где $\omega(C)$, $\omega(H)$, $\omega(S)$, $\omega(O)$ – 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

$$V_g^{теор} = m \cdot 0,267 \cdot \left(\frac{\omega(C)}{3} + \omega(H) + \frac{\omega(S)}{8} - \frac{\omega(O)}{8} \right) \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.3)$$

Пример 2.2. 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 $\alpha = 1,5$, условия нормальные.

Решение.

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

$$V_g^{теор} = 5 \cdot 0,267 \cdot \left(\frac{56,4}{3} + 5,04 + \frac{0,06}{8} - \frac{24}{8} \right) = 27,7 \text{ м}^3.$$

2. С учетом коэффициента избытка воздуха реально на сгорание данной массы образца торфа будет затрачено воздуха

$$V_g^{np} = V_g^{теор} \cdot \alpha = 27,7 \cdot 1,5 = 41,6 \text{ м}^3.$$

2.3. Расчет объема и процентного состава продуктов горения индивидуального вещества

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) SO_2 и азот – продукты горения соединений, содержащих серу и азот.

Продукты неполного сгорания – угарный газ CO (оксид углерода (II)), сажа, C, 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 $\alpha > 1$.

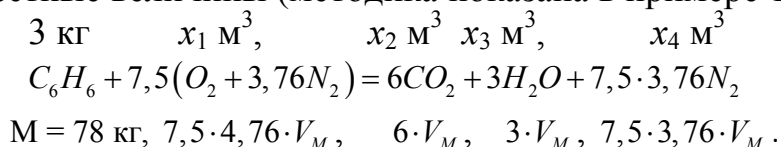
Как и в случае расчета объема воздуха, необходимого для горения, свои особенности имеет расчет продуктов горения для индивидуальных веществ, смеси газов и веществ с известным элементным составом.

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

Пример 2.3. Определить объем и состав в объемных % продуктов горения, образовавшихся при сгорании 3 кг бензола C_6H_6 . Температура $20^\circ C$, давление 770 мм рт. ст., коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,4$.

Решение.

1. Записываем уравнение реакции горения и вписываем все известные и неизвестные величины (методика показана в примере 1.5):



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

$$V_M = \frac{760 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{293}{770} = 23,7 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

3. Теоретический объем продуктов горения (V_{III}) определяем по уравнению реакции

$$V_{III} = \frac{3 \cdot (6 + 3 + 7,5 \cdot 3,76) \cdot 23,7}{78} = 33,9 \text{ м}^3.$$

4. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха, следовательно, в состав продуктов горения войдет избыточный воздух ΔV_6 .

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

$$V_6^{теор} = x_1 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 4,76 \cdot 23,7}{78} = 32,5 \text{ м}^3.$$

Избыток воздуха определим по формуле (1.5)

$$\Delta V_6 = V_6^{теор} (\alpha - 1) = 32,5(1,4 - 1) = 13 \text{ м}^3.$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{III}^* = V_{III} + \Delta V_6 = 33,9 + 13 = 46,9 \text{ м}^3.$$

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

В этом случае по уравнению реакции определяем объем CO_2 , H_2O и N_2 .

$$V(\text{CO}_2) = x_2 = \frac{3 \cdot 6 \cdot 23,7}{78} = 5,47 \text{ м}^3,$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = x_3 = \frac{3 \cdot 3 \cdot 23,7}{78} = 2,73 \text{ м}^3,$$

$$V(\text{N}_2) = x_4 = \frac{3 \cdot 7,5 \cdot 3,76 \cdot 23,7}{78} = 25,71 \text{ м}^3,$$

$$\Delta V_6 = 13 \text{ м}^3.$$

Объемная концентрация каждого компонента смеси рассчитывается следующим образом:

$$\varphi^{об}(\text{CO}_2) = \frac{V(\text{CO}_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{5,47 \cdot 100}{46,9} = 11,7 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V(\text{H}_2\text{O}) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{2,73 \cdot 100}{46,9} = 5,8 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(\text{N}_2) = \frac{V(\text{N}_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{25,71 \cdot 100}{46,9} = 54,8 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(\Delta V_6) = \frac{V(\Delta V_6) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{13 \cdot 100}{46,9} = 27,7 \text{ \%}.$$

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

2.4. Расчет объема и процентного состава продуктов горения газовой смеси

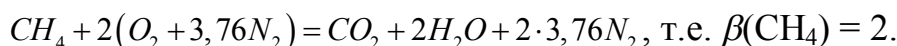
При расчете продуктов горения газовой смеси необходимо знать, какой объем продуктов горения выделяется при сгорании 1 м^3 каждого горючего газа смеси. Далее, зная процентное содержание (в объемных

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 2.4. Определить объем и состав продуктов горения 10 м^3 природного газа следующего состава (в % объемных): метан CH_4 – 75 %; этан C_2H_6 – 4 %; пропан C_3H_8 – 2 %; углекислый газ CO_2 – 19 %. Горение протекает при $\alpha = 1,2$.

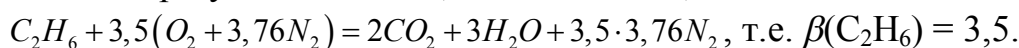
Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения для всех горючих газов смеси

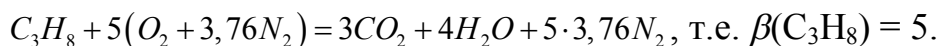


Для газообразных веществ отношение числа моль равно отношению объемов, следовательно, стехиометрические коэффициенты для каждого вещества в реакции горения – это и есть объем в м^3 каждого компонента продуктов горения, выделившийся при сгорании 1 м^3 горючего газа.

По уравнению реакции можно определить, что при сгорании 1 м^3 метана CH_4 образуется $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$, $2 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ и $2 \cdot 3,76 \text{ м}^3 \text{ N}_2$.



При сгорании 1 м^3 этана C_2H_6 образуется $2 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$, $3 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ и $3,5 \cdot 3,76 \text{ м}^3 \text{ N}_2$.



При сгорании 1 м^3 этана C_3H_8 образуется $3 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$, $4 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ и $5 \cdot 3,76 \text{ м}^3 \text{ N}_2$.

2. Определим теоретический объем продуктов горения.

Суммарный объем углекислого газа, образовавшегося при сгорании 1 м^3 газовой смеси определяется с учетом процентного состава каждого горючего компонента газовой смеси, и также включается объем углекислого газа, входящий в состав исходной газовой смеси:

$$V(\text{CO}_2) = 1 \cdot \frac{\varphi(\text{CH}_4)^{\text{об}}}{100} + 2 \cdot \frac{\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)^{\text{об}}}{100} + 3 \cdot \frac{\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)^{\text{об}}}{100} + \frac{\varphi(\text{CO}_2)}{100} \text{ м}^3.$$

$$\text{Тогда } V(\text{CO}_2) = 1 \cdot \frac{75}{100} + 2 \cdot \frac{4}{100} + 3 \cdot \frac{2}{100} + \frac{19}{100} = 1,08 \text{ м}^3.$$

При сгорании 10 м^3 газовой смеси объем образовавшегося углекислого газа составит

$$V(\text{CO}_2) = 1,08 \cdot 10 = 10,8 \text{ м}^3.$$

Аналогично рассчитываем объем паров воды, образовавшийся в результате сгорания 1 м^3 смеси газов:

$$V(H_2O) = 2 \cdot \frac{75}{100} + 3 \cdot \frac{4}{100} + 4 \cdot \frac{2}{100} = 1,7 \text{ м}^3.$$

При сгорании 10 м^3 газовой смеси объем паров воды будет

$$V(H_2O) = 1,7 \cdot 10 = 17 \text{ м}^3.$$

Объем азота в продуктах горения составит для 1 м^3 природного газа

$$V(N_2) = 2 \cdot 3,76 \cdot \frac{75}{100} + 3,5 \cdot 3,76 \cdot \frac{4}{100} + 5 \cdot 3,76 \cdot \frac{2}{100} = 6,55 \text{ м}^3,$$

а для 10 м^3

$$V(N_2) = 6,55 \cdot 10 = 65,5 \text{ м}^3.$$

Теоретический объем продуктов горения 10 м^3 газовой смеси составит

$$V_{III} = V(CO_2) + V(H_2O) + V(N_2) = (10,8 + 17 + 65,5) = 93,3 \text{ м}^3.$$

3. Горение протекает с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,2$, 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:

$$V_6^{теор} = \frac{2 \cdot 75 + 3,5 \cdot 4 + 5 \cdot 2}{21} \cdot 10 = 82,9 \text{ м}^3.$$

Избыток воздуха определим по формуле (1.5)

$$\Delta V_6 = V_6^{теор} \cdot (\alpha - 1) = 82,9 \cdot (1,2 - 1) = 16,6 \text{ м}^3.$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{III}^* = V_{III} + \Delta V_6 = 93,3 + 16,6 = 109,9 \text{ м}^3.$$

4. Определим процентный состав продуктов горения:

$$\varphi^{об}(CO_2) = \frac{V(CO_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{10,8 \cdot 100}{109,9} = 9,8 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(H_2O) = \frac{V(H_2O) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{17 \cdot 100}{109,9} = 15,5 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(N_2) = \frac{V(N_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{65,5 \cdot 100}{109,9} = 59,6 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(\Delta V_6) = \frac{V(\Delta V_6) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{16,6 \cdot 100}{109,9} = 15,1 \text{ \%}.$$

2.5. Расчет объема и процентного состава продуктов горения вещества сложного элементного состава

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

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ кг} \quad x_1 \text{ м}^3 \quad x_2 \text{ м}^3 \\
 C + (O_2 + 3,76N_2) = CO_2 + 3,76N_2 \\
 12 \text{ кг} \quad 22,4 \text{ м}^3 \quad 3,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\
 V(CO_2) = x_1 = \frac{22,4}{12} = 1,87 \text{ м}^3, \\
 V(N_2) = x_2 = \frac{3,76 \cdot 22,4}{12} = 7,0 \text{ м}^3;
 \end{array}$$

для водорода

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ кг} \quad x_1 \text{ м}^3 \quad x_2 \text{ м}^3 \\
 H + 0,25(O_2 + 3,76N_2) = 0,5H_2O + 0,25 \cdot 3,76N_2 \\
 1 \text{ кг} \quad 0,5 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \quad 0,25 \cdot 3,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\
 V(H_2O) = x_1 = \frac{0,5 \cdot 22,4}{1} = 11,2 \text{ м}^3, \\
 V(N_2) = x_2 = \frac{0,25 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{1} = 21,0 \text{ м}^3;
 \end{array}$$

для серы

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ кг} \quad x_1 \text{ м}^3 \quad x_2 \text{ м}^3 \\
 S + (O_2 + 3,76N_2) = SO_2 + 3,76N_2 \\
 32 \text{ кг} \quad 22,4 \text{ м}^3 \quad 3,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\
 V(SO_2) = x_1 = \frac{22,4}{32} = 0,7 \text{ м}^3, \\
 V(N_2) = x_2 = \frac{3,76 \cdot 22,4}{32} = 2,63 \text{ м}^3;
 \end{array}$$

для фосфора

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ кг} \quad x_1 \text{ м}^3 \quad x_2 \text{ м}^3 \\
 P + 1,25(O_2 + 3,76N_2) = 0,5P_2O_5 + 1,25 \cdot 3,76N_2 \\
 31 \text{ кг} \quad 0,5 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \quad 1,25 \cdot 3,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3 \\
 V(P_2O_5) = x_1 = \frac{0,5 \cdot 22,4}{31} = 0,36 \text{ м}^3, \\
 V(N_2) = x_2 = \frac{1,25 \cdot 3,76 \cdot 22,4}{31} = 3,4 \text{ м}^3.
 \end{array}$$

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

Объем 1 кг азота при нормальных условиях составит

$$V(N_2) = \frac{m(N_2) \cdot V_M}{M(N_2)} = \frac{1 \cdot 22,4}{28} = 0,8 \text{ м}^3.$$

При нормальных условиях 1 кг паров воды займет объем

$$V(H_2O) = \frac{m(H_2O) \cdot V_M}{M(H_2O)} = \frac{1 \cdot 22,4}{18} = 1,24 \text{ м}^3.$$

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

$$V(N_2) = \frac{3,76 \cdot 22,4}{32} = 2,63 \text{ м}^3.$$

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 (м ³) на 1 кг вещества				
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	P ₂ O ₅	N ₂
Углерод	1,86				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 2.1., можно вычислить объем продуктов горения любого вещества с известным элементным составом.

Пусть $\omega(C)$, $\omega(H)$, $\omega(S)$, $\omega(O)$, $\omega(N)$ – массовые доли элементов в веществе, %; $\omega(W)$ – содержание влаги в веществе, %.

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

$$V(CO_2) = m \cdot \frac{1,86 \cdot \omega(C)}{100} \text{ м}^3; \quad (2.4)$$

$$V(H_2O) = m \cdot \left(\frac{11,2 \cdot \omega(H)}{100} + \frac{1,24 \cdot \omega(W)}{100} \right) \text{ м}^3; \quad (2.5)$$

$$V(SO_2) = m \cdot \frac{0,7 \cdot \omega(S)}{100} \text{ м}^3; \quad (2.6)$$

$$V(N_2) = m \cdot \left(\frac{7 \cdot \omega(C)}{100} + \frac{21 \cdot \omega(H)}{100} + \frac{2,63 \cdot \omega(S)}{100} + \frac{0,8 \cdot \omega(N)}{100} - \frac{2,63 \cdot \omega(O)}{100} \right) \text{ м}^3. \quad (2.7)$$

Пример 2.5. 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 $\alpha = 1,3$, условия нормальные.

Решение.

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

$$V(CO_2) = 5 \cdot \frac{1,86 \cdot 75,8}{100} = 7 \text{ м}^3,$$

$$V(H_2O) = 5 \cdot \left(\frac{11,2 \cdot 3,8}{100} + \frac{1,24 \cdot 3,0}{100} \right) = 2,31 \text{ м}^3,$$

$$V(SO_2) = 5 \cdot \frac{0,7 \cdot 2,5}{100} = 0,085 \text{ м}^3,$$

$$V(N_2) = 5 \cdot \left(\frac{7 \cdot 75,8}{100} + \frac{21 \cdot 3,8}{100} + \frac{2,63 \cdot 2,5}{100} + \frac{0,8 \cdot 1,1}{100} - \frac{2,63 \cdot 2,8}{100} \right) = 33,14 \text{ м}^3,$$

$$V_{III} = 7 + 2,31 + 0,085 + 33,14 = 42,5 \text{ м}^3.$$

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:

$$V_6^{теор} = 5 \cdot 0,267 \left(\frac{75,8}{3} + 3,8 + \frac{2,5}{8} - \frac{2,8}{8} \right) = 38,6 \text{ м}^3.$$

Избыток воздуха определим по формуле (2.4)

$$\Delta V_6 = V_6^{теор} \cdot (\alpha - 1) = 38,6 \cdot (1,3 - 1) = 11,6 \text{ м}^3.$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{III}^* = V_{III} + \Delta V_6 = 42,5 + 11,6 = 54,1 \text{ м}^3.$$

3. Определим процентный состав продуктов горения:

$$\varphi^{об}(CO_2) = \frac{V(CO_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{7,0 \cdot 100}{54,1} = 12,9 \text{ %};$$

$$\varphi^{об}(H_2O) = \frac{V(H_2O) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{2,31 \cdot 100}{54,1} = 4,3 \text{ %};$$

$$\varphi^{об}(SO_2) = \frac{V(SO_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{0,085 \cdot 100}{54,1} = 0,2 \text{ %};$$

$$\varphi^{об}(N_2) = \frac{V(N_2) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{33,14 \cdot 100}{54,1} = 61,2 \text{ \%};$$

$$\varphi^{об}(\Delta V_6) = \frac{V(\Delta V_6) \cdot 100}{V_{III}^*} = \frac{11,6 \cdot 100}{54,1} = 21,4 \text{ \%}.$$

2.6. Задание для самостоятельной проработки

Задача 2.1. Определить объем воздуха, необходимого для полного сгорания $x \text{ м}^3$ данной горючей газовой смеси имеющегося состава. Горение протекает при коэффициенте избытка воздуха α . Исходные данные по вариантам приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Задание к задаче 2.1

№ вар.	Газовая смесь	Состав газовой смеси, %	Объем газовой смеси, м^3	Коэффициент избытка воздуха, α
1	Доменный газ	оксид углерода (II) CO – 27 %, водород H_2 – 3 %, углекислый газ CO_2 – 13 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 56 %	15	1,2
2	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 3 %, водород H_2 – 50 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, метан CH_4 – 5 %, азот N_2 – 6 %	20	1,1
3	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 35 %, водород H_2 – 40 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, метан CH_4 – 14 %, азот N_2 – 6 %	100	1,2
4	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 40 %, водород H_2 – 50 %, углекислый газ CO_2 – 4 %, метан CH_4 – 1 %, азот N_2 – 5 %	60	1,3
5	Природный газ	водород H_2 – 4 %, метан CH_4 – 86 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 4 %, бутан C_4H_{10} – 4 %	80	1,4
6	Природный газ	метан CH_4 – 90 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 5 %, пропан C_3H_8 – 4 %	90	1,4
7	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 10 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 30 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, кислород O_2 – 2 %, азот N_2 – 5 %	85	1,5
8	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 20 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 2 %	35	1,0

Окончание табл. 2.2

9	Коксовый газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H ₂ – 57 %, метан CH ₄ – 22 %, углекислый газ CO ₂ – 2 %, азот N ₂ – 8 %, вода H ₂ O – 4 %	45	1,1
10	Саратовский природный газ	метан CH ₄ – 92 %, этан C ₂ H ₆ – 8 %	50	1,1
11	Ухтинский природный газ	метан CH ₄ – 88 %, углекислый газ CO ₂ – 4 %, азот N ₂ – 5 %, этан C ₂ H ₆ – 2 %, пропан C ₃ H ₈ – 1 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 1 %	65	1,2
12	Дашавский природный газ	метан CH ₄ – 98 %, азот N ₂ – 1 %, этан C ₂ H ₆ – 1 %, пропан C ₃ H ₈ – 1 %	85	1,2
13	Попутный нефтяной газ	метан CH ₄ – 42 %, азот N ₂ – 8 %, этан C ₂ H ₆ – 20 %, пропан C ₃ H ₈ – 20 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 10 %	70	1,4
14	Шебелинский природный газ	метан CH ₄ – 92 %, углекислый газ CO ₂ – 2 %, азот N ₂ – 2 %, этан C ₂ H ₆ – 3 %, пропан C ₃ H ₈ – 2 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 1 %	75	1,5
15	Генераторный газ	оксид углерода (II) – 30 %, водород H ₂ – 15 %, метан CH ₄ – 5 %, углекислый газ CO ₂ – 10 %, азот N ₂ – 40 %	55	1,3
16	Воздушный газ	оксид углерода (II) – 33 %, водород H ₂ – 10 %, метан CH ₄ – 1 %, углекислый газ CO ₂ – 1 %, азот N ₂ – 55 %	40	1,3
17	Бухарский газ	метан CH ₄ – 95 %, углекислый газ CO ₂ – 1 %, азот N ₂ – 1 %, этан C ₂ H ₆ – 4 %	30	1,0
18	Сжиженный газ	метан CH ₄ – 4 %, этан C ₂ H ₆ – 4 %, пропан C ₃ H ₈ – 79 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 11 %	25	1,1
19	Биогаз	водород H ₂ – 1 %, метан CH ₄ – 70 %, углекислый газ CO ₂ – 28 %, азот N ₂ – 1 %, сероводород H ₂ S – 1 %	95	1,6
20	Коксовый очищенный газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H ₂ – 58 %, метан CH ₄ – 22 %, углекислый газ CO ₂ – 2 %, кислород O ₂ – 1 %, азот N ₂ – 8 %, этан C ₂ H ₆ – 2 %, сероводород H ₂ S – 1 %	110	1,3

Задача 2.2. 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 2.3.

Таблица 2.3

Задание к задаче 2.2

№ вар	Название вещества	Масса, кг	Коэффициент избытка воздуха, α	Состав вещества, %						
				C	H	O	N	S	Вла-га	Зо-ла
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	1,1	76,0	4,5	3,5	1,8	4,7	3,0	6,5
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 мало-сернистый	6	1,3	85,8	8,7	0,4	0,4	0,7	3,8	0,2
20	Мазут высоко-сернистый	7	1,4	83,7	11,5	0,5	-	4,0	-	0,3

Задача 2.3. 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 2.4.

Таблица 2.4

Задание к задаче 2.3

№ вар	Вещество	Масса кг	Температура, °С	Давление мм рт ст	Коэффициент избытка воздуха, α
1	Ацетилен C_2H_6	1	10	750	1,0
2	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	2	11	760	1,1
3	Толуол C_7H_8	3	12	755	1,2
4	Метан CH_4	4	13	765	1,3
5	Этанол C_2H_5OH	5	14	740	1,4
6	Бензол C_6H_6	6	15	745	1,5
7	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	7	16	770	1,0
8	Бутан C_4H_{10}	8	17	775	1,1
9	Пентанол $C_5H_{11}OH$	9	18	780	1,2
10	Фенол C_6H_5OH	10	19	785	1,3
11	Ксилол C_8H_{10}	11	20	790	1,4
12	Этилен C_2H_4	12	21	760	1,5
13	Этиловый эфир уксусной кислоты $C_4H_8O_2$	13	22	765	1,0
14	Бутилен C_4H_8	14	23	770	1,1
15	Метанол C_4H_8OH	15	24	745	1,2
16	Формальдегид CH_2O	16	25	750	1,3
17	Дихлорэтилен $C_2H_4Cl_2$	17	26	755	1,4
18	Винилхлорид C_2H_3Cl	18	15	775	1,5
19	Хлорид аммония NH_4Cl	19	16	780	1,6
20	Бромэтан C_2H_5Br	20	17	785	1,0

Задача 2.4. Определить объем и состав продуктов горения x м³ газовой смеси известного состава. Горение протекает с избытком воздуха. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Задание к задаче 2.4

№ вар	Газовая смесь	Состав газовой смеси, %	Объем газовой смеси, м ³	Коэффициент избытка воздуха, α
1	Коксовый очищенный газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H ₂ – 58 %, метан CH ₄ – 23 %, углекислый газ CO ₂ – 3 %, кислород O ₂ – 1 %, азот N ₂ – 8 %, этан C ₂ H ₆ – 2 %, сероуглерод H ₂ S – 1 %	11	1,1
2	Биогаз	водород H ₂ – 1 %, метан CH ₄ – 70 %, углекислый газ CO ₂ – 28 %, азот N ₂ – 1 %, сероуглерод H ₂ S – 1 %	12	1,2
3	Сжиженный газ	метан CH ₄ – 4 %, этан C ₂ H ₆ – 6 %, пропан C ₃ H ₈ – 79 %, бутан C ₄ H ₁₀ – 11 %	13	1,3

Окончание табл. 2.5

4	Бухарский газ	метан CH_4 – 95 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 4 %	14	1,4
5	Воздушный газ	оксид углерода (II) CO – 34 %, водород H_2 – 10 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 1 %, азот N_2 – 56 %	15	1,5
6	Генераторный газ	оксид углерода (II) CO – 30 %, водород H_2 – 15 %, метан CH_4 – 5 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, азот N_2 – 40 %	16	1,4
7	Шебелинский природный газ	метан CH_4 – 92 %, углекислый газ CO_2 – 2 %, азот N_2 – 3 %, этан C_2H_6 – 3 %, пропан C_3H_8 – 2 %, бутан C_4H_{10} – 1 %	17	1,3
8	Попутный нефтяной газ	метан CH_4 – 42 %, азот N_2 – 8 %, этан C_2H_6 – 20 %, пропан C_3H_8 – 20 %, бутан C_4H_{10} – 10 %	18	1,2
9	Дашавский природный газ	метан CH_4 – 98 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 1 %, пропан C_3H_8 – 1 %	19	1,1
10	Ухтинский природный газ	метан CH_4 – 89 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, азот N_2 – 5 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 1 %, бутан C_4H_{10} – 1 %	20	1,2
11	Саратовский природный газ	метан CH_4 – 93 %, этан C_2H_6 – 8 %	21	1,3
12	Коксовый газ	оксид углерода (II) CO – 7 %, водород H_2 – 57 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, азот N_2 – 8 %, вода H_2O – 4 %	22	1,4
13	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 20 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 23 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, азот N_2 – 2 %, этан C_2H_6 – 2 %	23	1,5
14	Светильный газ	оксид углерода (II) CO – 10 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 30 %, углекислый газ CO_2 – 3 %, кислород O_2 – 2 %, азот N_2 – 5 %	24	1,4
15	Природный газ	метан CH_4 – 90 %, углекислый газ CO_2 – 0,5 %, азот N_2 – 1 %, этан C_2H_6 – 6 %, пропан C_3H_8 – 4 %	25	1,3
16	Природный газ	водород H_2 – 4 %, метан CH_4 – 86 %, этан C_2H_6 – 2 %, пропан C_3H_8 – 4 %, бутан C_4H_{10} – 4 %	26	1,2
17	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 40 %, водород H_2 – 50 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, азот N_2 – 5 %	27	1,1
18	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 35 %, водород H_2 – 40 %, метан CH_4 – 14 %, углекислый газ CO_2 – 5 %, азот N_2 – 6 %	28	1,2
19	Водяной газ	оксид углерода (II) CO – 4 %, водород H_2 – 49 %, метан CH_4 – 5 %, углекислый газ CO_2 – 10 %, азот N_2 – 5,5 %	29	1,3
20	Доменный газ	оксид углерода (II) CO – 28 %, водород H_2 – 3 %, метан CH_4 – 1 %, углекислый газ CO_2 – 13 %, азот N_2 – 57 %	30	1,4

Задача 2.5. 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 2.6.

Таблица 2.6

Задание к задаче 2.5

№ вар	Вещество	Масса, кг	Коэффициент избытка воздуха, α	Состав вещества, %						
				C	H	O	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 малосернистый	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

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

3.1. Расчет теплового эффекта реакции горения индивидуального вещества

Тепловой баланс процесса горения складывается из следующих составляющих:

Приход: основная статья приходной части теплового баланса – это теплота горения вещества $Q_{гор}$.

Вторая составляющая $Q_{исх}$ – теплота исходных веществ, т.е. теплоемкость горючего и окислителя. Эта величина зависит от агрегатного состояния и химической природы горючего. Например, для метана $Q_{исх} < 1 \%$, а для древесины $\approx 3 \%$.

Расход: $Q_{ПГ}$ – теплота, уходящая с продуктами горения. Так как продукты горения создают конвективный поток над пламенем, то $Q_{ПГ}$ называют также теплотой конвекции или конвективной теплотой. $Q_{ПГ}$ колеблется в пределах 35–95 % от $Q_{гор}$.

$Q_{недожог}$ – это часть химической энергии исходного горючего вещества, заключенная в продуктах неполного горения, уходящих из пламени. В зависимости от условий газообмена и вида горючего. $Q_{недожог}$ составляет 5–25 % от $Q_{гор}$.

$Q_{излуч}$ – теплота излучения пламени. Небольшая часть ее уходит с конвективным потоком, а также падает на горящую поверхность, основная часть излучается в окружающую среду. Величина $Q_{излуч}$ достигает до 40 % от $Q_{гор}$.

С учетом перечисленных составляющих уравнение теплового баланса процесса горения будет выглядеть следующим образом:

$$Q_{исх} + Q_{гор} = Q_{ПГ} + Q_{недожог} + Q_{излуч} \quad (3.1)$$

приход

расход

Анализ этого уравнения показывает, что 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.

Энтальпией горения ($\Delta H_{гор}$, кДж/моль) вещества называется тепловой эффект реакции окисления 1 моль горючего вещества с образованием высших оксидов.

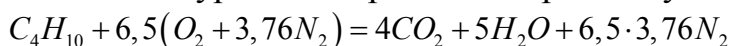
Теплота горения ($Q_{гор}$) численно равна энтальпии горения, но противоположна по знаку.

Для индивидуальных веществ тепловой эффект реакции может быть рассчитан по I следствию закона Гесса.

Пример 3.1. Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль бутана C_4H_{10} .

Решение.

1. Запишем уравнение реакции горения бутана.



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

$$\Delta H_{p-u}^0 = 4\Delta H^0(CO_2) + 5\Delta H^0(H_2O) - \Delta H^0(C_4H_{10})$$

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

$$\Delta H^0(CO_2) = -393,5 \quad \text{кДж/моль}; \quad \Delta H^0(H_2O) = -241,8 \quad \text{кДж/моль};$$

$$\Delta H^0(C_4H_{10}) = -126,2 \quad \text{кДж/моль}.$$

2. Подставляем эти значения в выражение для теплового эффекта реакции

$$\Delta H_{p-u}^0 = 4 \cdot (-393,5) + 5 \cdot (-241,8) - (-126,2) = -2656,8 \quad \text{кДж},$$

$$\Delta H_{p-u}^0 = \Delta H_{гор}^0 = -2656,8 \quad \text{кДж/моль} \quad \text{или} \quad Q_{гор} = +2656,8 \quad \text{кДж/моль}.$$

Таким образом, при сгорании 1 моля бутана выделяется 2656,8 кДж тепла.

3.2. Перевод значения энтальпии горения из кДж/моль в кДж/кг

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 Q_H** . Если пары воды конденсируются в жидкость, то теплота горения – **высшая Q_B** .

Температура пламени достигает 1000 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 Q_H .

Низшая теплота горения индивидуальных веществ может быть определена переводом значения $\Delta H_{гор}$, кДж/моль в Q_H , кДж/кг или кДж/м³.

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

$$Q_H = \frac{1000 \cdot \left| \Delta H \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right|}{M \frac{\text{г}}{\text{моль}}} \text{ кДж/кг.} \quad (3.2)$$

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

$$Q_H = \frac{1000 \cdot \left| \Delta H \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right|}{V_M \frac{\text{л}}{\text{моль}}} \text{ кДж/м}^3. \quad (3.3)$$

Пример 3.2. Энтальпия горения этилацетата $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ равна $\Delta H_{\text{гор}} = -2256,3$ кДж/моль. Выразить эту величину в кДж/кг.

Решение.

Значение $\Delta H_{\text{гор}} = -2256,3$ кДж/моль показывает, что при сгорании 1 моля этилацетата выделяется 2256,3 кДж тепла, т.е. $Q_{\text{гор}} = +2256,3$ кДж/моль.

1 моль $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ имеет массу 88 г. Можно составить пропорцию:

$$\begin{array}{ll} M(\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5) = 88 \text{ г/моль} & - \quad Q_{\text{гор}} = 2256,3 \text{ кДж/моль,} \\ 1 \text{ кг} = 1000 \text{ г} & - \quad Q_H \text{ кДж/кг.} \end{array}$$

$$\text{Тогда } Q_H = \frac{1000 \cdot 2256,3}{88} = 25639,8 \text{ кДж/кг.}$$

3.3. Расчет низшей теплоты сгорания Q_H по формуле Д.И. Менделеева

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

$$Q_H = 339,4 \cdot \omega(C) + 1257 \cdot \omega(H) - 108,9 \cdot [(\omega(O) + \omega(N)) - \omega(S)] - 25,1[9 \cdot \omega(H) + \omega(W)] \text{ кДж/кг,} \quad (3.4)$$

где $\omega(C)$, $\omega(H)$, $\omega(S)$, $\omega(O)$, $\omega(N)$ – массовые доли элементов в веществе, %;

$\omega(W)$ – содержание влаги в веществе, %.

Теплота горения смеси газов и паров определяется как сумма произведений теплоты горения каждого горючего компонента (Q_H) на его объемную долю в смеси ($\varphi^{об}$)

$$Q_H = Q_{H(1)} \cdot \frac{\varphi_1^{oo}}{100} + Q_{H(2)} \cdot \frac{\varphi_2^{oo}}{100} + Q_{H(3)} \cdot \frac{\varphi_3^{oo}}{100} + \dots \text{ кДж/м}^3. \quad (3.5)$$

Пример 3.3. Вычислить низшую теплоту сгорания сульфадимезина $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ 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 $C_{12}H_{14}O_2N_4S$ составляет 278 г/моль. Тогда

$$\omega(C) = (12 \cdot 12) / 278 = 144 / 278 = 0,518 \cdot 100 = 51,8 \%,$$

$$\omega(H) = (1 \cdot 14) / 278 = 14 / 278 = 0,05 \cdot 100 = 5,0 \%,$$

$$\omega(O) = (16 \cdot 2) / 278 = 32 / 278 = 0,115 \cdot 100 = 11,5 \%,$$

$$\omega(N) = (14 \cdot 4) / 278 = 56 / 278 = 0,202 \cdot 100 = 20,2 \%,$$

$$\omega(S) = 100 - (51,8 + 5,0 + 11,5 + 20,2) = 11,5 \%.$$

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

$$Q_H = 339,4 \cdot 51,8 + 1257 \cdot 5,0 - 108,9 \cdot (11,5 + 20,2 - 11,5) - 25,1 \cdot 9 \cdot 5,0 = \\ = 22741 \text{ кДж/кг}.$$

3.4. 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.

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 $\alpha > 1$) 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:

$$Q_{\text{ПГ}} = V_{\text{ПГ}} \cdot \overline{C_p} \cdot T_G, \quad (3.7)$$

где $Q_{\text{ПГ}}$ – теплота (теплосодержание) продуктов горения, кДж/кг;

$V_{\text{ПГ}}$ – объем продуктов горения, м³/кг;

$\overline{C_p}$ – средняя объемная теплоемкость смеси продуктов горения в интервале температур от T_0 до T_G , кДж/м³·К;

T_G – температура горения, К.

При расчете калориметрической температуры горения исходят из того, что теплотери в окружающую среду отсутствуют, и в этом случае низшая теплота сгорания горючего вещества (Q_H) равна теплосодержанию продуктов горения ($Q_{\text{ПГ}}$), т.е. энергии, необходимой для нагревания продуктов горения от 0 °С 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 теплотерь (коэффициент теплотерь η)

$$Q_{\text{потерь}} = Q_{\text{излучения}} + Q_{\text{недожог}} + Q_{\text{диссоциацииПГ}} \quad (3.8)$$

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

Расчет температуры горения проводят по уравнению энергетического баланса

$$Q_H \cdot (1 - \eta) = V_{\text{пр}}^{\text{пр}} \cdot \overline{C_p} \cdot [T_G - T_0], \quad (3.9)$$

где Q_H – тепло, выделяемое в реакции горения, кДж;

η – коэффициент теплотерь; $Q_H \cdot (1 - \eta) = Q_{\text{пр}}$;

$V_{\text{пр}}^{\text{пр}}$ – объем продуктов полного горения с учетом избытка воздуха, м³;

$\overline{C_p}$ – средняя объемная теплоемкость продуктов горения при постоянном давлении, кДж/м³·К;

T_G – температура горения, К;

T_0 – начальная температура, К.

Из уравнения (3.9) 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 (3.7), имея в виду, что средняя теплоемкость газообразных продуктов горения в интервале температур 1500–2500 К может быть принята равной $\overline{C_p} = 1,75$ 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, 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.

$$V_{\text{пр}}^{\text{пр}} = V(\text{CO}_2) + V(\text{H}_2\text{O}) + V(\text{N}_2) + V(\text{SO}_2) + \Delta V_{\text{возд}}$$

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 2.3, 2.4, и 2.5.

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 (3.4) расчет Q_H может быть выполнен как для веществ с известным элементным составом, так и для индивидуальных веществ.

Для газовых смесей Q_H рассчитывается по формулам (3.5) и (3.6).

3. Если по условию задачи есть теплотери (η), то рассчитывается количество тепла, пошедшего на нагрев продуктов горения $Q_{ПГ}$

$$Q_{ПГ} = Q_H (1 - \eta) \text{ кДж/кг или кДж/м}^3. \quad (3.9)$$

4. Находим среднее теплосодержание продуктов горения $Q_{ср}$: при отсутствии теплотерь (η)

$$Q_{ср} = \frac{Q_H}{V_{ПГ}^{нр}} \text{ кДж/м}^3; \quad (3.10)$$

при наличии теплотерь

$$Q_{ср} = \frac{Q_{ПГ}}{V_{ПГ}^{нр}} \text{ кДж/м}^3. \quad (3.11)$$

5. По значению $Q_{ср}$ с помощью таблиц приложений 3 и 4 («Теплосодержание газов при постоянном давлении»), ориентируясь на азот, приближенно определяем температуру горения T_1 .

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 °С), чем по азоту.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при выбранной температуре T_1

$$Q_{ПГ}^1 = Q^1(CO_2) \cdot V(CO_2) + Q^1(H_2O) \cdot V(H_2O) + Q^1(N_2) \cdot V(N_2) + Q^1(SO_2) \cdot V(SO_2) + Q^1(возд) \cdot \Delta V(в), \quad (3.12)$$

где $Q^1(CO_2)$, $Q^1(H_2O)$, $Q^1(N_2)$, $Q^1(SO_2)$, $Q^1(возд)$ – табличные значения теплосодержания газов при выбранной температуре T_1 .

7. Сравниваем $Q_{ПГ}^1$ с Q_H или $Q_{ПГ}$, рассчитанных по п.2 или п.3.

Если $Q_{ПГ}^1 < Q_H$ ($Q_{ПГ}$), то выбираем температуру $T_2 > T_1$ на 100 °С;

Если $Q_{ПГ}^1 > Q_H$ ($Q_{ПГ}$), то выбираем температуру $T_2 < T_1$ на 100 °С.

8. Повторяем расчет теплосодержания продуктов горения при новой температуре T_2

$$Q_{ПГ}^2 = Q^2(CO_2) \cdot V(CO_2) + Q^2(H_2O) \cdot V(H_2O) + Q^2(N_2) \cdot V(N_2) + Q^2(SO_2) \cdot V(SO_2) + Q^2(возд) \cdot \Delta V(в). \quad (3.13)$$

9. Расчет проводим до получения неравенства

$$Q_{ПГ}^1 < Q_H (Q_{ПГ}) < Q_{ПГ}^2,$$

где $Q_{ПГ}^1$ и $Q_{ПГ}^2$ – теплосодержание продуктов горения при температурах T_1 и T_2 , отличающихся на 100 °С.

10. Интерполяцией определяем температуру горения $T_{Г}$:

$$T_r = T_1 + \frac{Q_{пр} - Q_{пр}^1}{Q_{пр}^2 - Q_{пр}^1} \cdot (T_2 - T_1), \quad \text{если } T_1 < T_2; \quad (3.14)$$

$$T_r = T_2 + \frac{Q_{пр} - Q_{пр}^2}{Q_{пр}^1 - Q_{пр}^2} \cdot (T_1 - T_2), \quad \text{если } T_1 > T_2. \quad (3.15)$$

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

3.4.1. Расчет действительной температуры горения индивидуального вещества

Пример 3.4. Вычислить действительную температуру горения анилина $C_6H_5NH_2$, если потери тепла излучением составляют 20 %, а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха 1,1.

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения анилина



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

$$n_6^{теор} = 7,75 \cdot 4,76 = 36,89 \text{ моль},$$

$$\Delta n_6 = n_6^{теор} \cdot (\alpha - 1) = 36,89 \cdot (1,1 - 1) = 3,689 \text{ моль},$$

$$n_{пр}^{np} = n(CO_2) + n(H_2O) + n(N_2) + n(\Delta V_6) = 6 + 3,5 + 7,75 \cdot 3,76 + 0,5 + 3,689 = 42,829 \text{ моль}.$$

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

$$Q_{гор} = 3484,0 \text{ кДж/моль} = 3484000 \text{ Дж/моль}.$$

3. По условию задачи теплотопотери составляют 20 %, следовательно, $\eta = 0,2$.

$$Q_{пр} = 3484000(1 - 0,2) = 2787200 \text{ Дж/моль (кДж/кмоль)}.$$

4. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения

$$Q_{cp} = \frac{Q_{пр}}{n_{пр}^{np}} = \frac{2787200}{42,829} = 65077,4 \text{ кДж}.$$

5. По таблице приложения 3, ориентируясь на азот, определяем $T_1 = 1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Q_{пр}^{1800} = 96579,5 \cdot 6 + 77598,8 \cdot 3,5 + 59539,9 \cdot 7,75 \cdot 3,76 + 66000 \cdot 3,689 = 2859312,7 \text{ кДж}.$$

7. $Q_{пр}^{1800} = 2859312,7 > Q_{пр} = 2787200$, следовательно, выбираем $T_2 = 1700 \text{ }^\circ\text{C}$.

8. Рассчитываем теплосодержание продуктов горения при $1700 \text{ }^\circ\text{C}$.

$Q_{III}^{1700} = 90545,9 \cdot 6 + 72445,1 \cdot 3,5 + 55936,5 \cdot 7,75 \cdot 3,76 + 56397,4 \cdot 3,689 = 2662844,5$
кДж.

$Q_{III}^{1700} = 2662844,5 < Q_{III} = 2787200$, следовательно температура горения находится в интервале от 1700 до 1800 °С.

9. Рассчитываем температуру горения по формуле (3.14)

$$T_r = 1700 + \frac{2787200 - 2662844}{2859312 - 2662844} \cdot (1800 - 1700) = 1763^\circ\text{C} = 2036 \text{ К.}$$

3.4.2. 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.

Решение.

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

$$V(\text{CO}_2) = \frac{1,86 \cdot 35}{100} = 0,651 \text{ м}^3,$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = \frac{11,2 \cdot 5}{100} + \frac{1,24 \cdot 15}{100} = 0,746 \text{ м}^3,$$

$$V(\text{SO}_2) = \frac{0,7 \cdot 4}{100} = 0,028 \text{ м}^3,$$

$$V(\text{N}_2) = \frac{7 \cdot 35}{100} + \frac{21 \cdot 5}{100} + \frac{2,63 \cdot 4}{100} + \frac{0,8 \cdot 1}{100} - \frac{2,63 \cdot 10}{100} = 3,455 \text{ м}^3,$$

$$V_{III} = 0,651 + 0,746 + 0,028 + 3,455 = 4,88 \text{ м}^3.$$

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:

$$V_{\text{г}}^{\text{теор}} = 0,267 \left(\frac{35}{3} + 5 + \frac{4}{8} - \frac{10}{8} \right) = 4,28 \text{ м}^3.$$

Избыток воздуха определим по формуле (1.5)

$$\Delta V_{\text{г}} = V_{\text{г}}^{\text{теор}} \cdot (\alpha - 1) = 4,28 \cdot (1,2 - 1) = 0,856 \text{ м}^3.$$

С учетом избытка воздуха практический объем продуктов горения составит

$$V_{III}^* = V_{III} + \Delta V_{\text{г}} = 4,88 + 0,856 = 5,736 \text{ м}^3.$$

3. Рассчитываем Q_H по формуле (3.4) Д.И. Менделеева

$$Q_u = 339,4 \cdot 35 + 1257 \cdot 5 - 108,9 \cdot (10 + 1 - 4) - 25,1 \cdot (9 \cdot 5 + 15) = 15881,7 \text{ кДж/кг.}$$

4. С учетом теплототерь определяем теплосодержание продуктов горения

$$Q_{\text{пр}} = 15881,7 \cdot (1 - 0,1) = 14293,53 \text{ кДж/кг.}$$

5. Определяем среднее теплосодержание продуктов горения

$$Q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{V_{\text{пр}}^{\text{нр}}} = \frac{14293,53}{5,736} = 2480,22 \text{ кДж/м}^3.$$

По таблице приложения 4, ориентируясь на азот, определяем $T_1 = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Определяем теплосодержание продуктов горения при $1500 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{пр}}^{1500} = 3505,7 \cdot 0,651 + 2781,3 \cdot 0,746 + 2176,7 \cdot 3,455 + 3488,2 \cdot 0,028 + 2194,7 \cdot 0,856 = 13853,889 \text{ кДж.}$$

7. $Q_{\text{пр}}^{1500} = 13853,889 < Q_{\text{пр}} = 14293,53$, следовательно, выбираем $T_2 = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$.

8. Определяем теплосодержание продуктов горения при $1600 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{пр}}^{1600} = 3771,4 \cdot 0,651 + 3004,2 \cdot 0,746 + 2335,5 \cdot 3,455 + 3747,5 \cdot 0,028 + 2355,2 \cdot 0,856 = 14886,44 \text{ кДж.}$$

9. $Q_{\text{пр}}^{1600} = 14886,44 > Q_{\text{пр}} = 14293,53$, следовательно, температура горения вещества находится в интервале от 1500 до $1600 \text{ }^\circ\text{C}$.

10. Определяем температуру горения по формуле (3.13)

$$T_r = 1500 + \frac{14293,53 - 13853,889}{14886,44 - 13583,889} \cdot (1600 - 1500) = 1556 \text{ }^\circ\text{C} = 1829 \text{ К.}$$

3.5. Задание для самостоятельной проработки

Задача 3.1. Рассчитать тепловой эффект реакции горения 1 моль заданного вещества и выразить полученную величину в кДж/кг. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Задание к задаче 3.1

№ вар.	Вещество
1	Нитробензол – $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$
2	Анилин – $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$
3	Пентан – C_5H_{12}
4	Глицерин – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
5	Ацетон – CH_3COCH_3
6	Этаналь – CH_3COH
7	Метаналь – HCOH
8	Изопропиловый спирт – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$

Окончание табл. 3.1

9	Пропиловый спирт – C_3H_7OH
10	Этиловый спирт – C_2H_5OH
11	Метиловый спирт – CH_3OH
12	Толуол – C_7H_8
13	Бензол – C_6H_6
14	Пропен – C_3H_6
15	Этилен – C_2H_4
16	Ацетилен – C_2H_2
17	Циклогексан – C_6H_{12}
18	Октан – C_8H_{18}
19	Гептан – C_7H_{16}
20	Гексан – C_6H_{14}

Задача 3.2. Вычислить низшую теплоту сгорания заданного вещества по формуле Д.И. Менделеева. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Задание к задаче 3.2

№ вар.	Вещество
1	Ацетат аммония – $NH_4C_2H_3O_2$
2	Метионин – $C_5H_{11}NO_2S$
3	Анилин – $C_6H_5NH_2$
4	Диметилфосфат – $(CH_3)_2HPO_4$
5	Пентанол – $C_5H_{11}OH$
6	Глицин – H_2NCH_2COOH
7	Хинин – $C_{20}H_{24}O_2N_2$
8	Этиленгликоль – CH_2OHCH_2OH
9	Хлоруксусная кислота – $CH_2ClCOOH$
10	Сульфаниловая кислота – $NH_2C_6H_4SO_3H$
11	Мочевина – NH_2CONH_2
12	Аспартам – $C_{14}H_{18}N_2O_5$
13	Глутамин – $C_5H_{10}N_2O_3$
14	Бензойная кислота – C_6H_5COOH
15	Пропен – CH_3CHCH_2
16	Винная кислота – $H_2C_4H_4O_6$
17	Никотиновая кислота – C_5H_4NCOOH
18	Пропанол-1 – $CH_3CH_2CH_2OH$
19	Нитробензол – $C_6H_5NO_2$
20	Бромэтан – CH_3CH_2Br

Задача 3.3. Вычислить действительную температуру горения индивидуального вещества, если есть потери тепла излучением η , а горение протекает с коэффициентом избытка воздуха α . Теплота горения веще-

ства по справочным данным составляет $Q_{гор}$, кДж/моль. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Задание к задаче 3.3

№ вар.	Вещество	Потери тепла изучением η , %	Коэффициент избытка воздуха, α	Теплота горения $Q_{гор}$, кДж/моль
1	Бутан – C_4H_{10}	30	1,2	2657
2	Гептан – C_7H_{16}	40	1,3	4501
3	Глицерин – $C_3H_8O_3$	20	1,4	1483
4	Изобутиловый спирт – $C_4H_{10}O$	10	1,5	2723,4
5	Изопропиловый спирт – C_3H_8O	30	1,1	2051,4
6	Метилацетат – $C_3H_6O_2$	40	1,2	1472,2
7	Метилциклогексан – C_7H_{14}	50	1,3	4293
8	Октан – C_8H_{18}	60	1,4	5116
9	Антрацен – $C_{14}H_{10}$	10	1,1	7059
10	Пентен – C_5H_{10}	20	1,2	3154
11	Циклогексен – C_6H_{10}	30	1,3	3565
12	Циклокептан – C_7H_{14}	40	1,4	4328
13	Этиламин – C_2H_7N	50	1,5	1421,6
14	Этилацетат – $C_4H_8O_2$	10	1,4	2078
15	Этан – C_2H_6	20	1,3	1576
16	Фенол – C_6H_6O	30	1,2	2992,3
17	Пропанол – C_3H_8O	40	1,1	2067,4
18	Гексадекан – $C_{16}H_{34}$	50	1,2	10034
19	Гептадекан – $C_{17}H_{36}$	10	1,3	10649
20	Диэтиламин – $C_4H_{11}N$	20	1,4	2550,8

Задача 3.4. Вычислить действительную температуру горения сложного вещества с известным элементным составом, при потерях тепла излучением η и коэффициенте избытка воздуха α . Условия нормальные. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Задание к задаче 3.4

№ вар	Вещество	Состав, %							Потери тепла излучением, η , %	Коэффициент избытка воздуха, α
		C	H	O	N	S	вла-га	зола		
1	Уголь	75,0	4,0	6,0	3,0	2,0	4,0	6,0	20	1,1
2	Бензин	85,0	14,9	0,02	0,03	0,15	0,5	0,01	30	1,2
3	Нефть	84,0	14,0	0,5	1,0	1,0	0,8	0,7	40	1,3

Окончание табл. 3.4

4	Древесина	41,5	6,0	43,0	2,0	1,0	7,5	11,3	50	1,4
5	Каменный уголь	76,0	4,8	3,6	2,8	1,8	2,8	8,2	10	1,5
6	Мазут высокосернистый	83,7	11,5	0,5	0,8	4,0	1,0	0,3	20	1,1
7	Полуантрацит	90,4	4,3	4,3	1,0	1,0	0,8	0,2	30	1,2
8	Березовский уголь	44,3	3,0	14,4	0,4	0,2	33,0	4,7	40	1,3
9	Мазут	85,0	14,0	0,4	0,3	0,3	0,2	1,0	50	1,4
10	Сланец	38,8	3,2	4,0	0,1	1,5	15,0	37,4	10	1,5
11	Уголь	29,1	2,2	8,7	0,6	2,9	33,0	23,5	20	1,1
12	Древесина	46,0	6,0	42,0	10,0	1,0	6,0	12,0	30	1,2
13	Керосин	85,3	14,1	0,6	0,3	0,8	1,0	1,0	40	1,3
14	Каменный уголь	79,4	5,3	10,3	1,0	2,8	1,0	2,2	50	1,4
15	Торф	43,0	7,0	41,0	2,0	1,0	7,0	7,0	10	1,5
16	Мазут мало-сернистый	85,8	8,7	0,4	0,4	0,7	3,8	0,2	20	1,1
17	Уголь	37,2	2,6	12,0	0,4	0,6	40,0	7,2	30	1,2
18	Торф	36,0	4,0	12,0	8,0	1,0	35,0	5,0	40	1,3
19	Каменный уголь	76,0	4,5	3,5	1,8	4,7	3,0	6,5	50	1,4
20	Мазут	83,4	10,0	0,1	0,3	2,9	3,0	0,3	10	1,5

ПЛАМЯ И ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ. РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

4.1. Расчет стехиометрической концентрации

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

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

$$\varphi_{стех}^{объем} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta} \% \quad (4.1)$$

$$\varphi_{стех}^{масс} = \frac{1000 \cdot M}{(1 + 4,76 \cdot \beta) \cdot V_M} \text{ г/м}^3, \quad (4.2)$$

где β – стехиометрический коэффициент, стоящий перед воздухом в уравнении реакции горения;

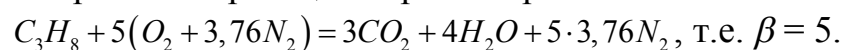
M – молярная масса;

V_M – молярный объем.

Пример 4.1. Рассчитать стехиометрическую концентрацию пропана C_3H_8 в % объемных и г/м^3 при температуре 25°C и давлении 95 кПа .

Решение.

1. Уравнение реакции горения пропана



Подставляем это значение в формулу 4.1.

$$\varphi_{стех}^{объем} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot 5} = 4,03 \%$$

3. Молярная масса $M(C_3H_8) = 46 \text{ г/моль (кг/кмоль)}$;

По формуле объединенного газового закона

$$V_M = \frac{22,4 \cdot 101,3}{273} \cdot \frac{298}{95} = 26,1 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Подставляем значения в формулу 4.2. и находим стехиометрическую концентрацию пропана в г/м^3

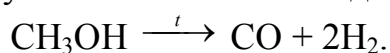
$$\varphi_{стех}^{масс} = \frac{1000 \cdot 46}{(1 + 4,76 \cdot 5) \cdot 26,1} = 71,0 \text{ г/м}^3.$$

4.2. Определение характера свечения пламени

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

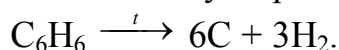
Если в горючем веществе при термическом разложении углерод не образуется, то вещество горит бесцветным пламенем как, например, в случае горения водорода H_2 .

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



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

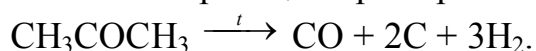
При горении веществ, содержащих более 75 % углерода (ацетилен C_2H_2 , бензол C_6H_6), в зоне горения образуется настолько много частиц C, что поступающего путем диффузии воздуха не хватает для полного окисления всего углерода



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

Если кислород в веществе отсутствует или его содержание не превышает 30 %, но, в свою очередь, и массовая доля углерода не очень велика (менее 75 %), то при термическом разложении будет выделяться значительное количество частиц углерода, но при нормальном доступе воздуха в зону горения они успевают окислиться до CO_2 .

Возможная реакция при термическом разложении ацетона



В подобных случаях пламя будет яркое, но не коптящее.

Ниже в таблице 4.1. приводится сопоставление значений процентного содержания углерода и кислорода в горючих веществах, по которым можно приблизительно судить о характере свечения пламени.

Таблица 4.1

Характер свечения пламени в зависимости от $\omega(C)$ и $\omega(O)$

Содержание углерода в горючем веществе, $\omega(C)$ %	Содержание кислорода в горючем веществе, $\omega(O)$ %	Характер свечения пламени
< 50	> 30	пламя бесцветное или голубоватое

< 75	отсутствует или < 30	пламя яркое, не коптящее
> 75	отсутствует или < 25	пламя яркое, коптящее

Пример 4.2. Определить характер свечения пламени метанола НСОН , фенола $\text{С}_6\text{Н}_5\text{ОН}$ и пентанола $\text{С}_5\text{Н}_{11}\text{ОН}$.

Решение.

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

$$M(\text{НСОН}) = 30$$

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

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

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

$$M(\text{С}_6\text{Н}_5\text{ОН}) = 94$$

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

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

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

$$M(\text{С}_5\text{Н}_{11}\text{ОН}) = 88$$

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

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

4.3. Расчет концентрационных пределов распространения пламени (КПР) по аппроксимационной формуле

Рассмотрим рис. 4.1. На нем представлена зависимость нормальной скорости распространения пламени от концентрации горючего в газопаровоздушной среде.

В данном случае максимальное значение скорости реакции и U_n соответствует стехиометрической концентрации горючего, т.е. при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$. При отклонении от стехиометрического состава смеси как в сторону бедных по горючему компоненту смесей ($\alpha > 1$), так и в сторону богатых смесей ($\alpha < 1$) скорость реакции горения снижается, достигая своих предельных значений, ниже которых реакция горения невозможна.

Это означает, что существуют два значения концентраций горючего вещества, при которых нормальная скорость распространения пламени достигает своих критических значений. Их называют концентрационными пределами распространения пламени (сокращенно – КПР).

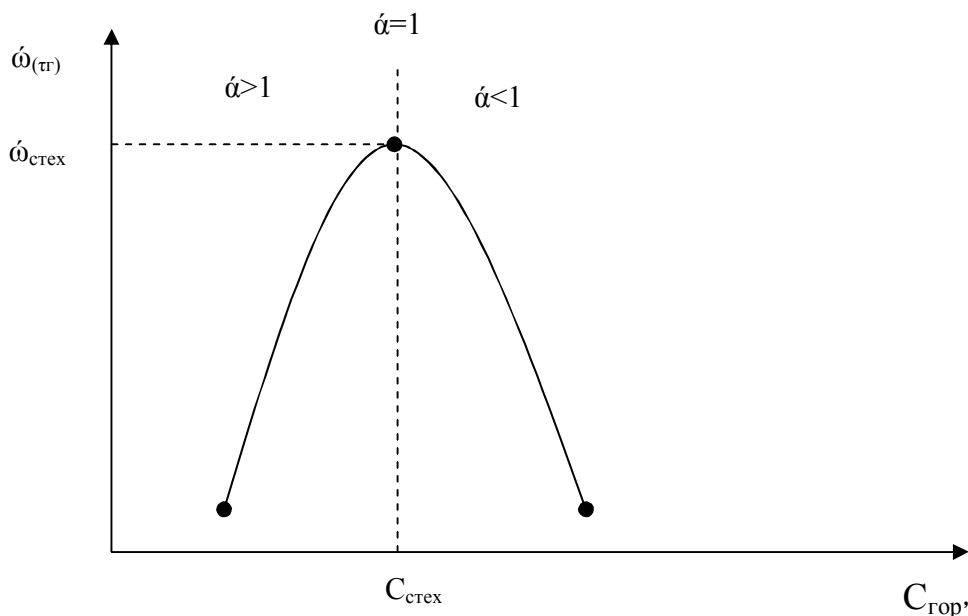


Рис.4.1. Зависимость скорости горения от концентрации горючего в смеси

Нижний и верхний концентрационный предел распространения пламени (воспламенения) – соответственно, минимальное и максимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания. Обозначается НКПР (φ_H) и ВКПР (φ_B).

КПР применяют при расчете взрывобезопасных концентраций газов, паров, пылей в воздухе рабочей зоны, внутри технологического оборудования, трубопроводов, при проектировании вентиляционных систем.

Область концентраций горючего, заключенная между КПР, называется областью распространения пламени или областью воспламенения.

Горючие смеси, в которых концентрация горючего вещества находится вне области воспламенения, не могут быть зажжены даже от самого мощного источника зажигания. **Если смесь не имеет КПР, то она вообще негорюча.**

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

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b} \% \quad (4.3)$$

где $\varphi_{H(B)}$ – 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 4.2.

Для расчета массовой концентрации можно воспользоваться формулой

$$\varphi_H^{масс} = \frac{M}{(a \cdot \beta + b) \cdot V_M} \text{ кг/м}^3 \text{ или г/л.} \quad (4.4)$$

Таблица 4.2

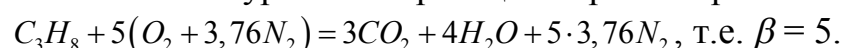
Значения коэффициентов «а» и «b» для расчета концентрационных пределов распространения пламени

КПР	a	b
НКПР	8,684	4,679
ВКПР		
$\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
$\beta > 7,5$	0,768	6,554

Пример 4.3. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени газа пропана C_3H_8 .

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения пропана



2. Находим концентрационные пределы по формуле 4.3:

$$\varphi_H = НКПР = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,679} = 2,07 \%;$$

$$\varphi_B = ВКПР = \frac{100}{1,55 \cdot 5 + 0,56} = 12,03 \%$$

4.4. Расчет КПР газовой смеси

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

$$\varphi_{H(см)} = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{\varphi_{H1}} + \frac{\varphi_2}{\varphi_{H2}} + \frac{\varphi_3}{\varphi_{H3}} + \dots} \% ; \quad (4.5)$$

$$\varphi_{B(см)} = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{\varphi_{B1}} + \frac{\varphi_2}{\varphi_{B2}} + \frac{\varphi_3}{\varphi_{B3}} + \dots} \% , \quad (4.6)$$

где $\varphi_{H(см)}$, $\varphi_{B(см)}$ – концентрационные пределы распространения пламени смеси;

φ_{H1} , φ_{H2} , φ_{H3} – НКПР каждого компонента газовой смеси;

φ_{B1} , φ_{B2} , φ_{B3} – ВКПР каждого компонента газовой смеси.

Пример 4.4. Рассчитать КПР смеси газов следующего состава: угарный газ CO – 10 %; водород H₂ – 60 %; метан CH₄ – 30 %.

Решение.

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

для угарного газа $\varphi_H = 12,5 \%$, $\varphi_B = 74 \%$;

для водорода $\varphi_H = 4 \%$, $\varphi_B = 75 \%$;

для метана $\varphi_H = 5 \%$, $\varphi_B = 15 \%$.

2. Определяем НКПР и ВКПР для смеси газов по формулам (4.5) и (4.6):

$$\varphi_{H(см)} = \frac{100}{\frac{10}{12,5} + \frac{60}{4} + \frac{30}{5}} = 4,58 \%$$

$$\varphi_{B(см)} = \frac{100}{\frac{10}{74} + \frac{60}{75} + \frac{30}{15}} = 34 \%$$

4.5. Расчет КПР при повышенных температурах

При увеличении начальной температуры горючей смеси область воспламенения расширяется в основном за счет увеличения ВКПР.

Формулы для расчета концентрационных пределов распространения пламени справедливы при температурах среды, близкой к 20 °С. Для более высоких температур необходимо производить расчет с учетом изменения температуры.

Приближенно это можно сделать с помощью следующих формул:

$$\varphi_{H(t)} = \varphi_H \cdot \left(1 - \frac{T - T_0}{1550 - T_0} \right), \quad (4.7)$$

$$\varphi_{B(t)} = \varphi_B \cdot \left(1 + \frac{T - T_0}{1100 - T_0} \right), \quad (4.8)$$

где φ_H, φ_B – концентрационные пределы распространения пламени, рассчитанные или определенные экспериментально при $\sim 20^\circ\text{C}$;

$\varphi_{H(t)}, \varphi_{H(t)}$ – концентрационные пределы распространения пламени при температуре T ;

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

Пример 4.5. Рассчитать КПР газа пропана C_3H_8 при 300°C .

Решение.

1. В примере 4.3. были рассчитаны значения НКПР и ВКПР для пропана при 20°C

$$\varphi_H = 2,07\%; \quad \varphi_B = 12,03\%.$$

2. С учетом заданной температуры КПР составят:

$$\varphi_{H(t)} = 2,07 \cdot \left(1 - \frac{573 - 293}{1550 - 293}\right) = 1,61\%;$$

$$\varphi_{B(t)} = 12,03 \cdot \left(1 + \frac{573 - 293}{1100 - 293}\right) = 16,20\%.$$

4.6. Расчет размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров

В практических расчетах для организации эффективной противопожарной защиты часто требуется знать геометрические размеры взрывоопасной зоны. Для этого используется *метод расчета размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров, при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей в помещение.*

Расстояния $X_{\text{НКПР}}, Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ для горючих газов (ГГ) и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), ограничивающие область концентраций, превышающих НКПР, рассчитывают по формулам:

$$X_{\text{НКПР}} = K_1 \cdot l \cdot \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta \cdot C_0}{C_{\text{НКПР}}}\right)^{0,5}; \quad (4.9)$$

$$Y_{\text{НКПР}} = K_1 \cdot b \cdot \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta \cdot C_0}{C_{\text{НКПР}}}\right)^{0,5}; \quad (4.10)$$

$$Z_{\text{НКПР}} = K_1 \cdot h \cdot \left(K_2 \cdot \ln \frac{\delta \cdot C_0}{C_{\text{НКПР}}}\right)^{0,5}, \quad (4.11)$$

где K_1 – коэффициент, принимаемый равным:

1,1314 для горючих газов;

1,1958 для легковоспламеняющихся жидкостей.

K_2 – коэффициент, равный:

1 для ГГ;

$T/3600$ для ЛВЖ;

T – продолжительность поступления паров ЛВЖ, с;

K_3 – коэффициент, принимаемый равным:

0,0253 для ГГ при отсутствии подвижности воздушной среды,

0,02828 для ГГ при подвижности воздушной среды,

0,04714 для ЛВЖ при отсутствии подвижности воздушной среды,

0,3536 для ЛВЖ при подвижности воздушной среды;

l – длина помещения, м;

b – ширина помещения, м;

h – высота помещения, м;

δ – допустимые отклонения концентраций при задаваемом уровне значимости. При уровне значимости $Q = 0,05$ значения δ будут равны:

1,27 для ЛВЖ при работающей вентиляции;

1,25 для ЛВЖ при неработающей вентиляции;

1,37 для ГГ при работающей вентиляции;

1,38 для ГГ при неработающей вентиляции;

C_0 – предэкспоненциальный множитель, % (объемн.), равный:

$$C_0 = 3,77 \cdot 10^3 \cdot \frac{m}{\rho_2 \cdot V_{св}} \quad (4.12)$$

для ГГ при отсутствии подвижности воздушной среды;

$$C_0 = 3 \cdot 10^2 \cdot \frac{m}{\rho_2 \cdot V_{св} \cdot U} \quad (4.13)$$

для ГГ при подвижности воздушной среды;

U – подвижность воздушной среды, м/с;

$$C_0 = C_H \cdot \left(\frac{m \cdot 100}{C_H \cdot \rho_n \cdot V_{св}} \right)^{0,41} \quad (4.14)$$

для ЛВЖ при отсутствии подвижности воздушной среды;

$$C_0 = C_H \cdot \left(\frac{m \cdot 100}{C_H \cdot \rho_n \cdot V_{св}} \right)^{0,46} \quad (4.15)$$

для ЛВЖ при подвижности воздушной среды;

C_H – концентрация насыщенных паров при расчетной температуре, кПа.

C_H может быть рассчитана по формуле

$$C_H = \frac{100 \cdot p_H}{p_0}, \quad (4.16)$$

где p_H – давление насыщенных паров при расчетной температуре, кПа;

p_0 – атмосферное давление, равное 101,3 кПа;

ρ_n – плотность паров, кг/м³.

Плотность паров ρ_n рассчитывается по формуле

$$\rho_n = M / V_M, \text{ кг/м}^3. \quad (4.17)$$

При отрицательных значениях логарифмов расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ принимают равным 0.

Во всех случаях значения расстояний $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ должны быть не менее 0,3 м для ГГ и ЛВЖ.

Пример 4.6. Определить размеры зоны, ограниченной НКПР паров, образующейся при аварийной разгерметизации аппарата с ацетоном при работающей и неработающей вентиляции.

Данные для расчета.

В центре помещения размером 40×40×3 м установлен аппарат с ацетоном. Масса ацетона в аппарате 25 кг. Расчетная температура в помещении 30 °С, давление нормальное. НКПР ацетона составляет 2,7 % (об). В результате разгерметизации в помещение поступило 25 кг паров ацетона за время испарения 208 с. При работающей общеобменной вентиляции подвижность воздушной среды в помещении $U = 0,1$ м/с.

Решение.

1. Расчет молярного объема паров при заданных условиях.

$$V_M = \frac{1 \cdot 22,4 \cdot 303}{273 \cdot 1} = 24,9 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

2. Расчет плотности паров при заданных условиях:

молярная масса $M(\text{CH}_3\text{COCH}_3) = 58$ кг/кмоль, подставляем в формулу 4.17;

$$\rho_n = M / V_M = 58 / 24,9 = 2,33 \text{ кг/м}^3.$$

3. Расчет свободного объема помещения

$$V_{св} = 0,8 \cdot l \cdot b \cdot h = 40 \cdot 40 \cdot 3 \cdot 0,8 = 3840 \text{ м}^3.$$

4. Расчет давления насыщенного пара ацетона при 30 °С по уравнению Антуана (приложение 5).

$$\text{Из уравнения Антуана } \lg p = 6,37551 - 1281,721 / (237,088 + t),$$

$$P_H = 10^{\left(6,37551 - \frac{1281,721}{237,088 + 30}\right)} = 37,73 \text{ кПа}.$$

5. Расчет концентрации насыщенных паров C_H по формуле 4.16.

$$C_H = 100 \cdot 37,73 / 101,3 = 37,36 \text{ \%}.$$

6. Расчет предэкспоненциального множителя C_0 при работающей вентиляции (4.15)

$$C_0 = 37,36 \cdot \left(\frac{25 \cdot 100}{3736 \cdot 2,33 \cdot 3840} \right)^{0,46} = 3,93 \text{ \%}.$$

7. Расчет предэкспоненциального множителя C_0 при неработающей вентиляции (4.14)

$$C_0 = 37,36 \cdot \left(\frac{25 \cdot 100}{3736 \cdot 2,33 \cdot 3840} \right)^{0,41} = 5,02 \text{ \%}.$$

8. Расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ при работающей вентиляции составят

$$X_{НКПР} = 1,1958 \cdot 40 \cdot \left(\frac{208}{3600} \cdot \ln \frac{1,27 \cdot 3,93}{2,7} \right)^{0,5} = 9,01 \text{ м},$$

$$Y_{НКПР} = 1,1958 \cdot 40 \cdot \left(\frac{208}{3600} \cdot \ln \frac{1,27 \cdot 3,93}{2,7} \right)^{0,5} = 9,01 \text{ м},$$

$$Z_{НКПР} = 0,3536 \cdot 3 \cdot \left(\frac{208}{3600} \cdot \ln \frac{1,27 \cdot 3,93}{2,7} \right)^{0,5} = 0,2 \text{ м}.$$

9. Расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ при неработающей вентиляции составят

$$X_{НКПР} = 1,1958 \cdot 40 \cdot \left(\frac{208}{3600} \cdot \ln \frac{1,25 \cdot 5,02}{2,7} \right)^{0,5} = 10,56 \text{ м},$$

$$Y_{НКПР} = 1,1958 \cdot 40 \cdot \left(\frac{208}{3600} \cdot \ln \frac{1,25 \cdot 5,02}{2,7} \right)^{0,5} = 10,56 \text{ м},$$

$$Z_{НКПР} = 0,04714 \cdot 3 \cdot \left(\frac{208}{3600} \cdot \ln \frac{1,25 \cdot 5,02}{2,7} \right)^{0,5} = 0,03 \text{ м}.$$

За начало отсчета принимают внешние габаритные размеры аппарата.

4.7. Расчет безопасных концентраций газов и паров с использованием коэффициентов безопасности

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

$$\varphi_{г.без} \leq \frac{\varphi_H}{K_б}, \quad (4.18)$$

где $\varphi_{г.без}$ – безопасная концентрация горючих газов, паров или пылей, % объемных;

φ_H – НКПР, % объемных;

$K_б$ – коэффициент безопасности.

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

2. При расчете предельно-допустимых взрывобезопасных концентраций газов, паров, пылей в воздухе рабочей зоны с потенциальными источниками зажигания $K_б = 20$.

Пример 4.7. Газоанализатор показал наличие 0,3 % паров амилацетата $\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$. Можно ли проводить сварочные работы?

Решение.

1. Составляем уравнение реакции горения амилацетата



$$2. \varphi_{\text{H}} = \text{НКПР} = \frac{100}{8,684 \cdot 9,5 + 4,679} = 1,14 \%$$

3. Рассчитаем безопасную концентрацию

$$\varphi_{\text{з.без}} = \frac{1,14}{20} = 0,05 \%, \text{ то}$$

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

4.8. Задание для самостоятельной проработки

Задача 4.1. Рассчитать стехиометрическую концентрацию заданного вещества в % объемных и г/м^3 при заданной температуре и давлении. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Задание к задаче 4.1

№ вар	Вещество	Температура, °С	Давление, кПа
1	Глицерин $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	20	90
2	Аммиак NH_3	21	93
3	Ацетилен C_2H_2	22	95
4	Толуол C_7H_8	23	97
5	Метан CH_4	24	99
6	Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	25	101
7	Бензол C_6H_6	26	103
8	Бутан C_4H_{10}	27	105
9	Пентанол $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	28	75
10	Фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	15	80
11	Ксилол C_8H_{10}	16	85
12	Этилен C_2H_4	17	90
13	Бутилен C_4H_8	18	95
14	Метанол CH_3OH	19	100
15	Пропанол $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	20	76
16	Анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	21	78
17	Этиловый эфир уксусной кислоты $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	22	80
18	Нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	23	67
19	Бромэтан $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	24	70
20	Формальдегид CH_2O	25	72

Задача 4.2. Определить характер свечения пламени заданных веществ. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Задание к задаче 4.2

№ вар	Вещества		
1	Глицерин $C_3H_8O_3$	Этанол C_2H_5OH	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$
2	Пропанол C_3H_7OH	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	Метанол CH_3OH
3	Формальдегид CH_2O	Этиленгликоль C_2H_5OH	Линолевая кислота $C_{18}H_{32}O_2$
4	Бутиловый спирт C_4H_9OH	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	Кетен CH_2CO
5	Лимонная кислота $C_6H_8O_7$	Бензиловый спирт C_7H_7OH	Угльная кислота H_2CO_3
6	Аспарагин $C_4H_8N_2O_3$	Бензойная кислота C_6H_5COOH	Мочевина NH_2CONH_2
7	Стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$	Аспартам $C_{14}H_{18}N_2O_5$	Бензофенон $C_{13}H_{10}O$
8	Глюкоза $C_6H_{12}O_6$	Метионин $C_5H_{11}NO_2S$	Глутамин $C_5H_{10}N_2O_3$
9	Глутаминовая кислота $C_5H_9NO_4$	Аспарагиновая кислота $C_4H_7NO_4$	Фосген $COCl_2$
10	Ацетальдегид CH_3CHO	Хинин $C_{20}H_{24}O_2N_2$	Никотиновая кислота C_5H_4NCOOH
11	Винная кислота $H_2C_4H_4O_6$	Глицин $C_2H_5NO_2$	Аскорбиновая кислота $C_6H_8O_6$
12	Ацетилсалициловая кислота $C_9H_8O_4$	Молочная кислота $C_3H_6O_3$	Муравьиная кислота $HCOOH$
13	Формаимид $HCONH_2$	Хлоруксусная кислота $C_2H_3ClO_2$	Сульфадимезин $C_{12}H_{14}O_2N_2S$
14	Ацетат аммония $NH_4C_2H_3O_2$	Диметилфосфат $(CH_3)_2HPO_4$	Пропионовая кислота C_2H_5COOH
15	Ацетон CH_3COCH_3	Ацетилхлорид CH_3COCl	Аланин $C_3H_7CNO_2$
16	Цистеин $C_3H_7NO_2S$	Серин $C_3H_7NO_3$	Гистидин $C_6H_9N_3O_2$
17	Тирозин $C_9H_{11}NO_3$	Камфора $C_{10}H_{16}O$	Бензофенон $C_{13}H_{10}O$
18	Щавелевая кислота $HOOC-COOH$	Фталевая кислота $H_2C_8H_4O_4$	Карбамат аммония $NH_4CO_2NH_2$
19	Сахароза $C_{12}H_{22}O_{11}$	Триптофан $C_{11}H_{12}N_2O_2$	Эфедрин $C_{10}H_{15}ON$
20	Фенилаланин $C_9H_{11}NO_2$	Аргинин $C_6H_{14}N_4O_2$	Лизин $C_6H_{14}N_2O_2$

Задача 4.3. Рассчитать концентрационные пределы распространения пламени заданного вещества. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Задание к задаче 4.3

№ вар	Вещество	Характеристика вещества
1	Глицерин $C_3H_8O_3$	ГЖ
2	Ацетилен C_2H_2	Газ
3	Толуол C_7H_8	ЛВЖ
4	Метан CH_4	Газ
5	Этан C_2H_6	Газ
6	Бутан C_4H_{10}	Газ

Окончание табл. 4.5

7	Этанол C_2H_5OH	ЛВЖ
8	Пентанол $C_5H_{11}OH$	ЛВЖ
9	Фенол C_6H_5OH	ЛВЖ
10	Ксилол C_8H_{10}	ЛВЖ
11	Бутилен C_4H_8	ЛВЖ
12	Метанол CH_3OH	ЛВЖ
13	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	ЛВЖ
14	Бензол C_6H_6	ЛВЖ
15	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	ЛВЖ
16	Формальдегид CH_2O	Газ
17	Анилин $C_6H_5NH_2$	ГЖ
18	Этилен C_2H_4	Газ
19	Бутилен C_4H_8	Газ
20	Октан C_8H_{18}	ЛВЖ

Задача 4.4. Рассчитать КПР газовой смеси. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Задание к задаче 4.4

№ вар	Состав газовой смеси, %		
	1	угарный газ CO – 20 %	этан C_2H_6 – 70 %
2	водород H_2 – 15 %	пропан C_3H_8 – 25 %	бутан C_4H_{10} – 60 %
3	оксид углерода CO – 22 %	водород H_2 – 48 %	метан CH_4 – 30 %
4	этан C_2H_6 – 0,3 %	пропан C_3H_8 – 58 %	бутан C_4H_{10} – 41,7 %
5	оксид углерода CO – 45 %	водород H_2 – 33 %	метан CH_4 – 22 %
6	оксид углерода CO – 18 %	метан CH_4 – 45 %	этан C_2H_6 – 37 %
7	метан CH_4 – 50 %	этан C_2H_6 – 15 %	пропан C_3H_8 – 35 %
8	водород H_2 – 43 %	метан CH_4 – 25,5 %	бутан C_4H_{10} – 31,5 %
9	оксид углерода CO – 48 %	водород H_2 – 23 %	метан CH_4 – 29 %
10	этан C_2H_6 – 5 %	пропан C_3H_8 – 66 %	бутан C_4H_{10} – 29 %
11	оксид углерода CO – 17 %	этан C_2H_6 – 46 %	бутан C_4H_{10} – 37 %
12	метан CH_4 – 20 %	пропан C_3H_8 – 40 %	бутан C_4H_{10} – 40 %
13	водород H_2 – 15 %	метан CH_4 – 25 %	этан C_2H_6 – 60 %
14	оксид углерода CO – 30 %	метан CH_4 – 35 %	бутан C_4H_{10} – 35 %
15	этан C_2H_6 – 20 %	пропан C_3H_8 – 50 %	бутан C_4H_{10} – 30 %
16	метан CH_4 – 80 %	водород H_2 – 15 %	оксид углерода CO – 5 %
17	этан C_2H_6 – 50 %	пропан C_3H_8 – 25 %	бутан C_4H_{10} – 25 %
18	метан CH_4 – 60 %	этан C_2H_6 – 25 %	пропан C_3H_8 – 15 %
19	оксид углерода CO – 10 %	водород H_2 – 70 %	метан CH_4 – 20 %
20	этан C_2H_6 – 48 %	пропан C_3H_8 – 33 %	бутан C_4H_{10} – 19 %

Задача 4.5. Рассчитать КПР газа при повышенной температуре. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Задание к задаче 4.5

№ вар	Вещество (газ)	Температура, °С
1	Аммиак NH_3	400
2	Ацетилен C_2H_2	500
3	Бутадиен C_4H_6	600
4	Бутан C_4H_{10}	100
5	Бутен C_4H_8	200
6	Бутен C_4H_8	300
7	Винилхлорид $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	400
8	Водород H_2	500
9	Изобутан C_4H_{10}	600
10	Изобутилен C_4H_8	700
11	Метан CH_4	800
12	Оксид углерода CO	900
13	Оксид этилена $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	100
14	Пропан C_3H_8	200
15	Пропилен C_3H_6	300
16	Сероводород H_2S	400
17	Формальдегид CH_2O	500
18	Хлорэтан $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	600
19	Этан C_2H_6	700
20	Этилен C_2H_4	800

Задача 4.6. Определить размеры зоны, ограниченной НКПР паров, образующихся при аварийной разгерметизации аппарата с ЛВЖ при работающей и неработающей вентиляции.

Данные для расчета. В центре помещения размером $l \times b \times h$ установлен аппарат с ЛВЖ. Масса ЛВЖ в аппарате m кг. Расчетная температура в помещении t °С, давление нормальное. НКПР ЛВЖ составляет φ_H , %. В результате разгерметизации в помещение поступило m кг паров ЛВЖ за время испарения T , с. При работающей общеобменной вентиляции подвижность воздушной среды в помещении U , м/с. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Задание к задаче 4.6

№ вар	Вещество (ЛВЖ)	Размеры помещения, м	Масса ЛВЖ, кг	t , °С	НКПР, %	T , с	U , м/с
1	Амиловый спирт $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	25×25×2,5	10	20	1,46	188	0,2
2	Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	30×40×3	12	25	2,7	200	0,3
3	Ацетальдегид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	50×30×3,5	14	27	4,12	305	0,1
4	Бензол C_6H_6	20×40×4	20	22	1,43	290	0,2
5	Гексан C_6H_{14}	40×50×3	18	24	1,24	250	0,3
6	Гептан C_7H_{16}	30×30×2,5	22	26	1,07	180	0,1

Окончание табл. 4.8

7	Диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	10×10×3	16	30	1,7	205	0,2
8	м-Ксилол C ₈ H ₁₀	40×30×4	15	15	1,1	105	0,3
9	о-Ксилол C ₈ H ₁₀	50×25×3	20	17	1,0	150	0,1
10	Этилбензол C ₈ H ₁₀	40×30×2,5	18	20	1,0	185	0,2
11	Октан C ₈ H ₂₀	20×30×3,5	25	16	0,9	198	0,3
12	Пентан C ₅ H ₁₂	40×40×3	28	30	1,47	142	0,1
13	Толуол C ₇ H ₈	30×30×2,5	30	25	1,27	173	0,2
14	Уксусная кислота C ₂ H ₄ O ₂	25×25×3	40	27	4,0	100	0,3
15	Циклогексан C ₆ H ₁₂	20×20×3,5	50	20	1,3	80	0,1
16	Амилацетат C ₇ H ₁₄ O ₂	50×50×4	20	15	1,08	130	0,2
17	Бутилацетат C ₆ H ₁₂ O ₂	45×25×4	25	30	1,35	203	0,3
18	Диэтиламин C ₄ H ₁₁ N	35×35×3	10	18	1,78	306	0,1
19	Метиловый спирт CH ₄ O	30×40×3,5	13	20	6,98	230	0,2
20	Стирол C ₈ H ₈	20×30×3	27	27	1,1	280	0,3

Задача 4.7. Рассчитать безопасные концентрации паров вещества с использованием коэффициентов безопасности и определить, можно ли проводить данный вид работ. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9

Задание к задаче 4.7

№ вар	Вещество	Концентрация паров, %	Вид работы
1	Амилен C ₅ H ₁₀	0,2	резка металла
2	Ацетальдегид C ₂ H ₄ O	0,5	вентиляц. камера
3	Ацетон C ₃ H ₆ O	0,8	сварочные
4	Бензол C ₆ H ₆	0,1	токарные
5	Бутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	0,3	трубопровод
6	Гексан C ₆ H ₁₄	0,4	покраска
7	Гептан C ₇ H ₁₆	0,5	сварочные
8	Гидразин N ₂ H ₄	0,1	газопровод
9	Декан C ₁₀ H ₂₂	0,2	резка металла
10	Диэтиламин C ₄ H ₁₁ N	0,3	токарные
11	Диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	0,4	вентиляц. камера
12	Изобутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	0,5	сварочные
13	Метиловый спирт CH ₄ O	0,1	резка металла
14	Октан C ₈ H ₁₈	0,2	трубопровод
15	Пентан C ₅ H ₁₂	0,3	покраска
16	Пиридин C ₅ H ₅ N	0,4	вентиляц. камера
17	Сероуглерод CS ₂	0,5	сварочные
18	Стирол C ₈ H ₈	0,1	резка металла
19	Толуол C ₇ H ₈	0,2	газопровод
20	Этилацетат C ₄ H ₈ O ₂	0,3	сварочные

ГОРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

5.1. Расчет давления насыщенного пара по уравнению Антуана

Реакция горения жидкости начинается и протекает сложнее, чем у газов. Рассмотрим жидкость, налитую в открытый сосуд. Жидкости непрерывно испаряются даже при низких температурах. Поэтому над зеркалом жидкости всегда присутствует парообразная смесь с воздухом из-за того, что часть молекул на поверхности, которые имеют большую кинетическую энергию, покидают жидкость и смешиваются с воздухом. При этом поверхность жидкости охлаждается. Благодаря тепловому движению молекулы постепенно распространяются за пределы открытого сосуда. Плотность пара жидкостей по воздуху больше единицы, т.е. пар тяжелее воздуха. Он оседает вниз, скапливаясь на поверхности земли, пола и т.п. В результате длительного испарения могут образовываться взрывоопасные паровоздушные облака очень большой протяженности – до нескольких десятков и даже сотен метров.

Иначе ведут себя жидкости в закрытом сосуде. В этом случае пары уже не могут рассеиваться в окружающую среду. По мере испарения концентрация пара в свободном пространстве сосуда повышается и в итоге достигает состояния насыщения. Устанавливается динамическое равновесие, за время, при котором количество испаряющихся молекул жидкости равно количеству молекул пара, конденсирующихся обратно в жидкость. Такой пар называют насыщенным, а его парциальное давление – давлением насыщенного пара. Как правило, давление насыщенного пара обозначается P_s . Концентрация насыщенного пара во всем закрытом объеме одинакова.

Давление насыщенного пара горючих жидкостей часто используется в пожарно-технических расчетах.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса:

в дифференциальной форме

$$d \ln P / dT = Q_{исп} / (RT^2); \quad (5.1)$$

или в интегральной форме

$$P_s = P_0 \cdot \exp(-Q_{исп} / (RT_0)), \quad (5.2)$$

где P_s – давление насыщенного пара;

$Q_{исп}$ – мольная теплота испарения жидкости.

В пожарных расчетах наиболее распространенным способом определения давления насыщенного пара при заданной температуре является расчет по **уравнению Антуана**

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t_p}. \quad (5.3)$$

Уравнение Антуана для большого числа горючих жидкостей приведено в справочной литературе

$$P_s = 10^{\left(A - \frac{B}{C + t_p} \right)},$$

где P_s – давление насыщенного пара, кПа;

t_p – рабочая (заданная) температура, °С;

A, B, C – константы уравнения Антуана из справочной литературы [27] или из таблицы 5 приложения.

Пример 5.1. Определить давление насыщенного пара толуола $C_6H_5CH_3$ при температуре 20 °С по уравнению Антуана.

Решение.

Для нашей задачи:

$t_p = 20$ °С;

$A = 6,0507$; $B = 1328,17$; $C = 217,713$.

$$P = 10^{\left(6,0507 - \frac{1328,17}{217,713 + 20} \right)} = 2,9 \text{ кПа.}$$

5.2. Расчет объемной концентрации паров по давлению насыщенного пара

Зная величину давления насыщенного пара в емкости, можно определить **объемную концентрацию паров жидкости** при данных условиях. Величина давления насыщенного пара не зависит от объема жидкости в резервуаре.

Объемная концентрация паров (газов) в замкнутом объеме рассчитывается через давление насыщенного пара по формуле

$$\varphi_{об} = \frac{P_s}{P_{ATM}} \cdot 100 \%, \quad (5.4)$$

где $\varphi_{об}$ – объемная концентрация газа или пара, %;

P_s – давление насыщенного пара при данной температуре, мм рт. ст., кПа, МПа, атм. P_s рассчитывают по уравнению Антуана или определяют по номограмме;

P_{ATM} – внешнее давление, мм рт. ст., кПа, МПа, атм.

Массовая концентрация рассчитывается по формуле

$$\varphi_{масс} = \frac{P_s}{P_{ATM}} \cdot \frac{M}{V_M}, \quad (5.5)$$

где $\varphi_{масс}$ – массовая концентрация, кг(г)/м³;

P_s – давление насыщенного пара, мм рт.ст., кПа, МПа, атм;

P_{ATM} – внешнее давление, мм рт.ст., кПа, МПа, атм;

M – молярная масса вещества, г/моль, кг/кмоль;

V_M – молярный объем газа или пара, л/моль, м³/кмоль.

Пример 5.2. Резервуар заполнен бензолом C₆H₆. Вычислить объемную и массовую концентрацию паров бензола в свободном пространстве резервуара. Температура 10 °С, давление 780 мм рт.ст.

Решение.

При температуре 10 °С для бензола $P_S = 40$ мм рт. ст. (по номограмме). Тогда по формуле (5.4)

$$\varphi_{об} = \frac{40}{780} \cdot 100 = 5,1 \text{ \%}.$$

Определяем массовую концентрацию паров бензола по формуле (5.5). Для этого сначала находим молярную массу и молярный объем:

$$M(C_6H_6) = 78 \text{ кг/кмоль};$$

V_M необходимо рассчитать.

$$V_M = \frac{760 \cdot 22,4}{273} \cdot \frac{283}{780} = 22,6 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Подставляем найденные значения в формулу и определяем

$$\varphi_{масс} = \frac{40}{780} \cdot \frac{78}{22,6} = 0,177 \text{ кг/м}^3 = 177 \text{ г/м}^3.$$

Зная концентрационные пределы распространения пламени вещества и объемную концентрацию его паров, можно оценить взрывоопасность паров при заданной температуре. Так КПР бензола составляет от 1,4 до 7,1% (объемных). Сравним этот интервал с полученной объемной концентрацией паров бензола при заданных условиях – 5,1%. Можно сделать вывод, что данная концентрация паров бензола **взрывоопасна**.

5.3. Вычисление объемной доли и объема пара в паровоздушной смеси

Пример 5.3. В герметичной емкости объемом 30 м³, заполненной на 1/3, давление паров ацетона при температуре 30 °С составляет 190 мм рт. ст. Определить концентрацию паров ацетона в % и объем его паров в м³ в свободном пространстве емкости.

Решение.

1. Объемная концентрация паров в замкнутом объеме рассчитывается через давление насыщенного пара по формуле (5.4).

В условии данной задачи величина атмосферного давления не указана, поэтому принимаем его равным нормальному атмосферному давлению.

Определим объемную концентрацию паров ацетона

$$\varphi_{об} = \frac{190}{760} \cdot 100 = 25 \text{ \%}.$$

2. По условию задачи в емкости жидкий ацетон занимает $1/3$ всего объема. Следовательно, газообразная фаза, в которую входят пары ацетона и воздух, составляет $2/3$ объема емкости или

$$30 \cdot (2/3) = 20 \text{ м}^3.$$

25 % этого объема составляют пары ацетона. Определим объем паров ацетона в м^3

$$20 \cdot 0,25 = 5 \text{ м}^3.$$

5.4. Расчет температурных пределов распространения пламени по данным уравнения Антуана

Парциальное давление насыщенного пара пропорционально температуре жидкости. Графически эта зависимость в общем виде представлена на рис. 5.1 (здесь численные значения P_S пересчитаны на концентрацию пара). На приведенном графике видно, что НКПР и ВКПР пара достигаются при значениях температур: T_H и T_B . Эти температуры называются температурными пределами распространения пламени жидкости, обозначаются ТПР.

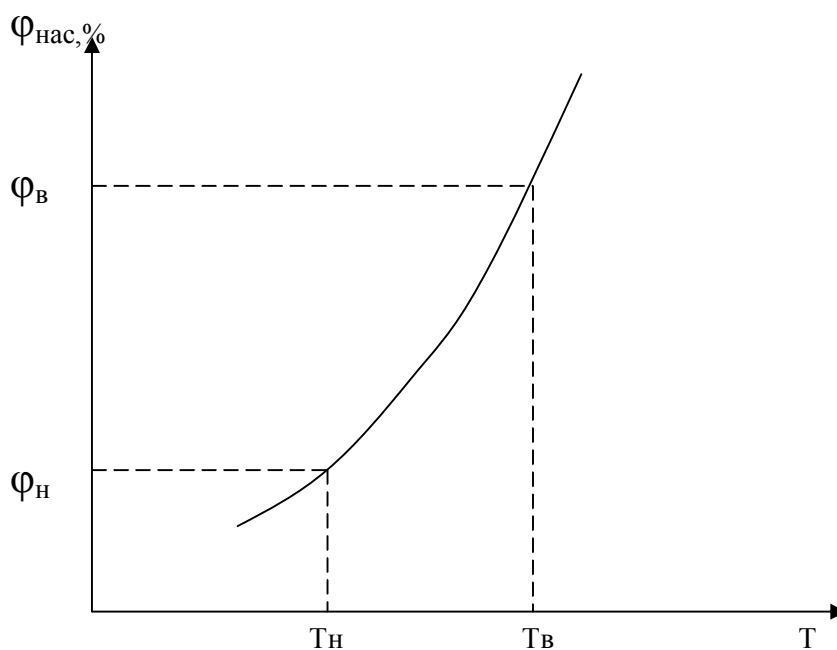


Рис. 5.1. Зависимость концентрации паров от температуры жидкости

Нижним (НТПР) или верхним (ВТПР) температурным пределом распространения пламени называется температура жидкости, при которой концентрация паров над ее поверхностью равна соответствующему концентрационному пределу.

Температурные пределы распространения пламени могут быть определены как экспериментальным, так и расчетным путем.

Температурные пределы T_H и T_B связаны с КПР пламени зависимостью

$$t_{np} = \frac{B}{A - \lg(0,01 \cdot \varphi_{np} \cdot P_0)} - C_a, \quad (5.6)$$

где φ_{np} – нижний или верхний КПР, %;

P_0 – атмосферное давление, кПа;

A, B, C_a – константы уравнения Антуана для давления насыщенных паров.

Пример 5.4. Вычислить температурные пределы распространения пламени 2-метилнонана, если известны следующие данные: НКПР 0,71 %; ВКПР 5,4 %; уравнение Антуана $\lg p = 6,12003 - 1521,3/(202,75 + t)$; $P_0 = 101,3$ кПа.

Решение.

Расчет НТПР

$$t_H = \frac{1521,3}{6,12003 - \lg\left(0,71 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 202,75 = 40,1^\circ\text{C}.$$

Расчет ВТПР

$$t_B = \frac{1521,3}{6,12003 - \lg\left(5,4 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 202,75 = 79,9^\circ\text{C} \cdot 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ м}^3.$$

5.5. Расчет температурных пределов распространения пламени по структурной формуле вещества

Если неизвестна зависимость давления насыщенного пара от температуры, то для веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, значение нижнего или верхнего температурного предела (t_n) вычисляют по формуле

$$t_n = a_0 + a_1 \cdot t_{кин} + \sum_{j=2}^n a_j \cdot l_j, \quad (5.7)$$


где a_0 – размерный коэффициент, равный $-62,46$ °С для нижнего и $-41,43$ °С для верхнего пределов;

a_1 – безразмерный коэффициент, равный 0,655 для нижнего и 0,723 для верхнего пределов;

a_j – эмпирические коэффициенты, характеризующие вклад j -х структурных групп, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Эмпирические коэффициенты, характеризующие вклад
j-х структурных групп

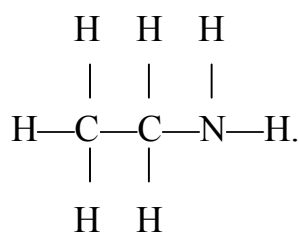
Вид структурной группы	a _j , °C		Вид структурной группы	a _j , °C	
	t _н	t _в		t _н	t _в
C—C	-0,909	-1,158	C—N	-2,14	0,096
C=C	-2,66	-4,64	N—H	6,53	6,152
C—H	-0,009	0,570	O—H	19,75	17,80
C—O	0,110	1,267		-4,40	-4,60
C=O	5,57	5,86			

Среднее квадратичное отклонение расчета составляет 9 °C.

Пример 5.5. Рассчитать температурные пределы распространения пламени этиламина C₂H₅NH₂.

Решение.

Данные для расчета:



$$t_{\text{кип}} = 16,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Число связей:

$$\text{C} - \text{C} \rightarrow 1;$$

$$\text{C} - \text{H} \rightarrow 5;$$

$$\text{C} - \text{N} \rightarrow 1;$$

$$\text{N} - \text{H} \rightarrow 2;$$

Для расчета воспользуемся формулой 5.7 и данными таблицы 5.1.

Расчет НТПР

$$\begin{aligned}
 t_{\text{н}} &= -62,46 + 0,655 \cdot 16,6 + 1 \cdot (-0,909) + 5 \cdot (-0,009) + 1 \cdot (-2,14) + 2 \cdot (6,53) = \\
 &= -41,6 \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

Расчет ВТПР

$$\begin{aligned}
 t_{\text{в}} &= -41,43 + 0,723 \cdot 16,6 + 1 \cdot (-1,158) + 5 \cdot 0,570 + 1 \cdot 0,0967 + 2 \cdot 6,152 = -15,3 \text{ } ^\circ\text{C}. \\
 20 \cdot 0,25 &= 5 \text{ м}^3.
 \end{aligned}$$

5.6. Расчет скорости испарения и массы испарившейся жидкости

Интенсивность испарения $W_{\text{исп}}$ жидкости с открытой поверхности может быть определена расчетным путем по следующей формуле:

$$W_{\text{исп}} = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_s \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (5.8)$$

где M – молярная масса, кг/кмоль;

P_S – давление насыщенного пара жидкости при рабочей температуре $t_{раб}$, определяемое по номограмме или расчетным способом по уравнению Антуана, кПа;

Приведенную формулу допускается использовать для ненагретых выше температуры окружающей среды ЛВЖ при отсутствии справочных и экспериментальных данных.

η – коэффициент, принимаемый по таблице 5.2, приведенной ниже, в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения.

Таблица 5.2

Значение коэффициента η в зависимости от скорости воздушного потока

Скорость воздушного потока в помещении, м с ⁻¹	Значение коэффициента η при температуре t , °С, воздуха в помещении				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Масса испарившейся жидкости рассчитывается по следующей формуле:

$$m_{испар.жидк} = S_{исп} \cdot W_{исп} \cdot \tau_{исп}, \quad (5.9)$$

где $S_{исп}$ – площадь испарения жидкости, м²;

$\tau_{исп}$ – время испарения, с;

$W_{исп}$ – интенсивность испарения, кг/м²·с.

Площадь испарения жидкости $S_{исп}$ определяется исходя из следующего расчета:

- 1 литр смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на площади 0,5 м², соответственно 1 м³ разливается на площади 500 м².

- 1 литр остальных жидкостей разливается на площади 1,0 м², соответственно 1 м³ разливается на площади 1000 м².

Пример 5.6. Какая масса жидкости испарится за 0,5 часа при разливе 20 л этанола, если температура воздуха 18 °С, скорость движения воздуха в помещении $v = 0,2$ м/с.

Решение.

1. Константы уравнения Антуана для этанола составляют

$A = 7,81158$; $B = 1918,508$; $C = 252,125$.

2. Давление насыщенного пара этанола определяем по уравнению Антуана

$$t_{ж} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$P_s = 10^{\left(7,81158 - \frac{1918,508}{252,125+18}\right)} = 3,3 \text{ кПа}.$$

3. Рассчитаем интенсивность испарения $W_{ИСП}$.

При $\omega_{ВОЗД}$ равным 0,2 м/с значение коэффициента $\eta = 3,5$.

Молярная масса этанола $M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 46 \text{ кг/кмоль}$.

Интенсивность испарения будет равна

$$W_{ИСП} = 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot \sqrt{46} \cdot 3,3 = 78,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}.$$

4. Рассчитываем массу жидкости, испарившейся с поверхности разлива $m_{ИСП \text{ РАЗЛ}}$, если время испарения 1800 с, площадь испарения 20 м^2 . Тогда

$$m_{исп.жидк} = 78,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1800 \cdot 20 = 2,8 \text{ кг}.$$

5.7. Расчет температуры вспышки и температуры воспламенения по структурной формуле

Температура вспышки – это наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары и газы, способные вспыхивать от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

Температура воспламенения – это наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие газы и пары с такой скоростью, что при воздействии источника зажигания наблюдается воспламенение жидкости.

Температура воспламенения обычно на 1–30 $^{\circ}\text{C}$ выше температуры вспышки.

Температура вспышки является важнейшим показателем пожарной опасности жидкостей. Применяется при классификации жидкостей по степени пожарной опасности, при категорировании помещений и зданий по взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности, а также при определении классов взрывоопасных и пожароопасных зон.

Жидкости с температурой вспышки до 61 $^{\circ}\text{C}$ относятся к **легковоспламеняющимся (ЛВЖ)**, а выше 61 $^{\circ}\text{C}$ – к **горючим (ГЖ)**.

Температура вспышки и температура воспламенения могут быть определены как экспериментально, так и расчетными методами.

Температуру вспышки жидкостей ($t_{всп}$) в закрытом тигле в $^{\circ}\text{C}$, имеющих нижеперечисленные виды связей (табл. 5.3), вычисляют по формуле

$$t_{\text{всп}} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j \cdot l_j \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5.10)$$

где a_0 – размерный коэффициент, равный $-73,14 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 a_1 – безразмерный коэффициент, равный $0,659$;
 $t_{\text{кип}}$ – температура кипения исследуемой жидкости, $^\circ\text{C}$;
 a_j – эмпирические коэффициенты, приведённые в табл. 5.3. в зависимости от связей в структурной формуле вещества;
 l_j – количество связей вида j в молекуле исследуемой жидкости.
Средняя квадратичная погрешность расчета по этой формуле составляет $13 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Таблица 5.3

Эмпирические коэффициенты в зависимости от связей в структурной формуле вещества

Вид связи	$a_j, \text{ } ^\circ\text{C}$	Вид связи	$a_j, \text{ } ^\circ\text{C}$
C—C	-2,03	C—Cl	15,11
C ≡ C	-0,28	C—Br	19,40
C=C	1,72	C—Si	-4,84
C—H	1,105	Si—H	11,00
C—O	2,47	Si—Cl	10,07
C=O	11,66	N—H	5,83
C—N	14,15	O—H	23,90
CS≡N	12,13	S—H	5,64
C—S	2,09	P—O	3,27
C=S	-11,91	P=O	9,64
C—F	3,33		

Температура воспламенения жидкости рассчитывается по той же формуле что и температура вспышки, но со своими коэффициентами

$$t_{\text{воспл}} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j \cdot l_j \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5.11)$$

где $a_0 = -47,78 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 $a_1 = 0,882$;
 $t_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости, $^\circ\text{C}$;
 a_j – коэффициент j -той химической связи, приведены в табл. 5.4.
 l_j – число химических связей вида j в молекуле жидкости

Таблица 5.4

Коэффициенты j -той химической связи

Вид связи	$a_j, \text{ } ^\circ\text{C}$	Вид связи	$a_j, \text{ } ^\circ\text{C}$
C—C	0,027	C=O	-0,826
C ≡ C	-2,069	C—N	-5,876

Окончание табл. 5.4

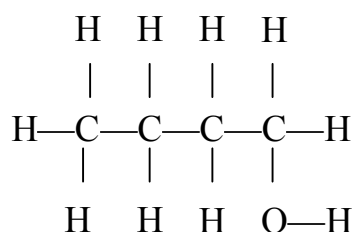
C=C	- 8,980	O—H	8,216
C—H	- 2,118	N—H	- 0,261
C—O	- 0,111		

Средняя квадратичная погрешность расчета составляет 5 °С.

Пример 5.7. Вычислить температуру вспышки и температуру воспламенения 2-метилпропанола-1 (изобутилового спирта).

Решение.

Структурная формула 2-метилпропанола-1 выглядит следующим образом:



Данные для расчета:

$$t_{\text{кип}} = 107,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

число связей:

$$\text{C} - \text{C} \rightarrow 3;$$

$$\text{C} - \text{H} \rightarrow 9;$$

$$\text{C} - \text{O} \rightarrow 1;$$

$$\text{O} - \text{H} \rightarrow 1.$$

Используя данные таблицы 5.3, по формуле 5.10 вычисляем температуру вспышки

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + 0,659 \cdot 107,8 + 3 \cdot (-2,03) + 9 \cdot 1,105 + 2,47 + 23,90 = 28,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Используя данные таблицы 5.4. и формулу 5.11, рассчитываем температуру воспламенения

$$t_{\text{воспл}} = -47,78 + 0,882 \cdot 107,8 + 3 \cdot 0,027 - 9 \cdot 2,118 - 0,111 + 8,216 = 36,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5.8. Задание для самостоятельной проработки

Задача 5.1. Определить давление насыщенного пара заданного вещества при известной температуре по уравнению Антуана. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Задание к задаче 5.1

№ вар	Вещество	Температура, °С
1	Уксусная кислота C ₂ H ₄ O ₂	15
2	Этилбензол C ₈ H ₁₀	16
3	Циклогексан C ₆ H ₁₂	17
4	Бензол C ₆ H ₆	18
5	Амиловый спирт C ₅ H ₁₁ OH	19

Окончание табл. 5.5

6	Этиленгликоль $C_2H_4O_2$	20
7	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	21
8	Ацетон C_3H_6O	22
9	Ацетальдегид C_2H_4O	23
10	Гексан C_6H_{14}	24
11	Гептан C_7H_{16}	25
12	Метанол CH_3OH	26
13	Бутанол C_4H_9OH	27
14	Октан C_8H_{18}	28
15	Пентан C_5H_{12}	29
16	Пропанол C_3H_7OH	30
17	Пропилбензол C_9H_{12}	20
18	Этанол C_2H_5OH	21
19	Этилацетат $C_4H_8O_2$	22
20	Муравьиная кислота CH_2O_2	23

Задача 5.2. Резервуар заполнен жидким веществом. Вычислить объемную и массовую концентрацию паров вещества в свободном пространстве резервуара при заданной температуре и давлении. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6

Задание к задаче 5.2

№ вар	Жидкое вещество	Температура, °С	Давление, мм. рт. ст
1	Амиловый спирт $C_5H_{11}OH$	10	770
2	Ацетальдегид C_2H_4O	11	780
3	Гексан C_6H_{14}	12	790
4	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	13	800
5	n-Ксилол C_8H_{10}	14	795
6	Метанол CH_3OH	15	790
7	Этиленгликоль $C_2H_4O_2$	16	785
8	Октан C_8H_{18}	17	780
9	Пропанол C_3H_7OH	18	775
10	Пропилбензол C_9H_{12}	19	770
11	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	20	765
12	Этилацетат $C_4H_8O_2$	21	760
13	Диметилвый эфир C_2H_6O	22	755
14	2-Метилбутан C_5H_{12}	23	750
15	Циклогексан C_6H_{12}	24	745
16	Циклогексен C_6H_{10}	25	740
17	2-Метилгексан C_7H_{16}	26	755
18	Ацетон C_3H_6O	27	770
19	Бутанол C_4H_9OH	28	780
20	Этанол C_2H_5OH	29	790

Задача 5.3. В герметичной емкости с известным объемом, заполненной на определенную часть, давление паров вещества при заданной температуре составляет P мм рт. ст. Определить концентрацию паров вещества в % и объем его паров в м^3 в свободном пространстве емкости. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7

Задание к задаче 5.3

№ вар	Вещество	Объем, м^3	Часть заполнения	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Давление, мм. рт. ст.
1	Амилацетат $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$	40	1/2	10	200
2	Ацетальдегид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	50	1/3	15	210
3	Бензол C_6H_6	60	1/4	20	220
4	Бутилацетат $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	70	1/5	25	230
5	Диэтиламин $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}$	80	1/6	30	240
6	Изобутиловый спирт $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	90	1/2	10	150
7	Метиловый спирт CH_4O	10	1/3	15	160
8	Октан C_8H_{18}	20	1/4	20	170
9	Пентан C_5H_{12}	30	1/5	25	180
10	Пиридин $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	40	1/6	30	190
11	Пропиловый спирт $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	50	1/2	10	200
12	Сероуглерод CS_2	60	1/3	15	210
13	Стирол C_8H_8	70	1/4	20	220
14	Толуол C_7H_8	80	1/5	25	230
15	Уксусная кислота $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	90	1/6	30	240
16	Хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	10	1/2	10	150
17	Циклогексан C_6H_{12}	20	1/3	15	160
18	Этилацетат $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$	30	1/4	20	170
19	Этилбензол C_8H_{10}	40	1/5	25	180
20	Этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	50	1/6	30	190

Задача 5.4. Вычислить температурные пределы распространения пламени заданного вещества при нормальном давлении $P_0=101,3$ кПа. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8

Задание к задаче 5.4

№ вар	Вещество	НКПР, %	ВКПР, %	Уравнение Антуана
1	Амиловый спирт $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	1,46	8,3	$\lg P = 6,3073 - 1287,625 / (161,330 + t)$
2	Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	2,7	13,0	$\lg P = 6,37551 - 1281,721 / (237,088 + t)$
3	Ацетальдегид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	4,12	57,0	$\lg P = 6,31653 - 1093,537 / (233,413 + t)$
4	Бензол C_6H_6	1,43	8,0	$\lg P = 5,61391 - 902,275 / (178,099 + t)$
5	Бутанол $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	1,8	10,9	$\lg P = 8,72232 - 2664,684 / (279,638 + t)$

Окончание табл. 5.8

6	Гексан C ₆ H ₁₄	1,24	7,5	$\lg P = 5,99517 - 1166,274 / (223,661 + t)$
7	Гептан C ₇ H ₁₆	1,07	6,7	$\lg P = 6,07647 - 1295,405 / (219,819 + t)$
8	Диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	1,7	49,0	$\lg P = 6,12270 - 1098,945 / (232,372 + t)$
9	Диметиловый эфир C ₂ H ₆ O	3,67	26,7	$\lg P = 6,34963 - 1004,099 / (254,831 + t)$
10	Метиловый спирт CH ₄ O	6,98	35,5	$\lg P = 7,3527 - 1660,454 / (245,818 + t)$
11	Муравьиная кислота CH ₂ O ₂	18,0	58,0	$\lg P = 4,99272 - 765,889 / (154,546 + t)$
12	Октан C ₈ H ₁₈	0,9	6,2	$\lg P = 6,09396 - 1379,556 / (211,896 + t)$
13	Пентан C ₅ H ₁₂	1,47	7,7	$\lg P = 5,97208 - 1062,555 / (231,805 + t)$
14	Пропанол C ₃ H ₈ O	2,3	13,6	$\lg P = 7,44201 - 1751,981 / (225,125 + t)$
15	Пропилбензол C ₉ H ₁₂	0,9	6,0	$\lg P = 6,29713 - 1627,827 / (220,499 + t)$
16	Толуол C ₇ H ₈	1,27	6,8	$\lg P = 6,0507 - 1328,171 / (217,713 + t)$
17	Уксусная кислота C ₂ H ₄ O ₂	4,0	19,9	$\lg P = 7,10337 - 1906,53 / (255,973 + t)$
18	Этанол C ₂ H ₆ O	3,6	17,7	$\lg P = 7,81158 - 1918,508 / (252,125 + t)$
19	Этилацетат C ₄ H ₈ O ₂	2,0	11,4	$\lg P = 6,22672 - 1244,951 / (217,881 + t)$
20	Этилбензол C ₈ H ₁₀	1,0	6,8	$\lg P = 6,35879 - 1590,660 / (229,581 + t)$

Задача 5.5. Рассчитать температурные пределы распространения пламени по структурной формуле вещества. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9

Задание к задаче 5.5

№ вар	Вещество	Структурная формула	Температура кипения, °С	Число связей
1	Этиламин	$\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \ \\ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	15,8	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 1$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 5$ $\text{C}-\text{N} \rightarrow 1$ $\text{N}-\text{H} \rightarrow 2$
2	Амиловый спирт	$\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \ \ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	118,2	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 4$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 11$ $\text{C}-\text{O} \rightarrow 1$ $\text{O}-\text{H} \rightarrow 1$
3	Ацетон	$\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \\ \text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	117,3	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 2$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 6$ $\text{C}-\text{O} \rightarrow 1$

Продолжение табл. 5.9

4	Ацетальдегид	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	108,8	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \end{array} $
5	Гексан	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	110,4	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 5 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 14 \end{array} $
6	Гептан	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	118,8	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 6 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 16 \end{array} $
7	Диэтиловый эфир	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	120,5	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 9 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
8	Метанол	$ \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} $	113,7	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{H} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
9	Этиленгликоль	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \end{array} $	102,3	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 2 \end{array} $
10	Бутанол	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	111,0	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 9 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
11	Пентан	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array} $	123,3	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 12 \end{array} $

Окончание табл. 5.9

12	Пропанол	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{O}-\text{H} \end{array} $	103,8	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 2$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 7$ $\text{C}-\text{O} \rightarrow 1$ $\text{O}-\text{H} \rightarrow 1$
13	Толуол	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C} \\ \ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	115,4	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 6$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 8$
14	Уксусная кислота	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \ \\ \text{H} \ \text{O} \end{array} $	109,2	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 1$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 4$ $\text{C}-\text{O} \rightarrow 2$
15	Этанол	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \ \\ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	106,8	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 1$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 5$ $\text{C}-\text{O} \rightarrow 1$ $\text{O}-\text{H} \rightarrow 1$
16	Этилацетат	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{O} \end{array} $	112,1	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 3$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 8$ $\text{C}-\text{O} \rightarrow 2$
17	Этан	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \ \\ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	103,9	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 1$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 6$
18	Хлорэтан	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{Cl} \\ \ \\ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	884	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 1$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 5$ $\text{C}-\text{Cl} \rightarrow 1$
19	Пропан	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	93,6	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 2$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 8$
20	Бутан	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	101,8	$\text{C}-\text{C} \rightarrow 3$ $\text{C}-\text{H} \rightarrow 10$

Задача 5.6. Какая масса жидкости испарится за определенное время при разливе некоторого объема вещества, если известна температура воздуха и скорость движения воздуха в помещении. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10

Задание к задаче 5.6

№ вар	Вещество	Время, ч	Объем вещества, л	Температура, °С	Скорость движения воздуха, м/с
1	Амилацетат $C_7H_{14}O_2$	0,3	10	15	0,1
2	Амилен C_5H_{10}	0,2	15	16	0,2
3	Амиловый спирт $C_5H_{12}O$	0,1	17	17	0,3
4	Анилин C_6H_7N	0,4	18	18	0,4
5	Ацетальдегид C_2H_4O	0,5	20	19	0,1
6	Ацетон C_3H_6O	0,6	22	20	0,2
7	Бензол C_6H_6	0,7	23	21	0,3
8	Бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	0,8	25	22	0,4
9	Бутиловый спирт $C_4H_{10}O$	0,1	27	23	0,1
10	Гексан C_6H_{14}	0,2	28	24	0,2
11	Диэтиламин $C_4H_{11}N$	0,3	30	25	0,3
12	Изобутиловый спирт $C_4H_{10}O$	0,4	32	15	0,4
13	Метиловый спирт CH_4O	0,5	35	16	0,1
14	Октан C_8H_{18}	0,6	37	17	0,2
15	Пентан C_5H_{12}	0,7	40	18	0,3
16	Пропиловый спирт C_3H_8O	0,8	10	19	0,4
17	Сероуглерод CS_2	0,1	12	20	0,1
18	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	0,2	15	21	0,2
19	Этилацетат $C_4H_8O_2$	0,3	17	22	0,3
20	Этиленгликоль $C_2H_8O_2$	0,4	20	23	0,4

Задача 5.7. Вычислить температуру вспышки и температуру воспламенения данного вещества. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11

Задание к задаче 5.7

№ вар	Вещество	Структурная формула	Температура кипения, °С	Число связей
1	Этиламин	$ \begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \ \\ \text{H} \ \text{H} \end{array} $	16,8	$ \begin{array}{l} \text{C} - \text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C} - \text{H} \rightarrow 5 \\ \text{C} - \text{N} \rightarrow 1 \\ \text{N} - \text{H} \rightarrow 2 \end{array} $

Продолжение табл. 5.11

2	Амиловый спирт	$ \begin{array}{cccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ & & & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	128,2	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 11 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
3	Ацетон	$ \begin{array}{ccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}-\text{O} \\ & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	127,3	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 2 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 6 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \end{array} $
4	Ацетальдегид	$ \begin{array}{cc} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ & \text{C} & -\text{C}-\text{O} \\ & & \\ & \text{H} & \text{H} \end{array} $	108,8	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \end{array} $
5	Гексан	$ \begin{array}{cccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}-\text{H} \\ & & & & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	140,4	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 5 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 14 \end{array} $
6	Гептан	$ \begin{array}{ccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & & & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}-\text{H} \\ & & & & & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	148,8	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 6 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 16 \end{array} $
7	Диэтиловый эфир	$ \begin{array}{cccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}-\text{O} \\ & & & & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	120,6	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 9 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
8	Метанол	$ \begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} $	123,7	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{H} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
9	Этиленгликоль	$ \begin{array}{cc} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ \text{H} & -\text{C} & -\text{C}-\text{H} \\ & & \\ & \text{O} & \text{O} \end{array} $	102,5	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 2 \end{array} $

Продолжение табл. 5.11

10	Бутанол	$ \begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	114,0	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 9 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
11	Пентан	$ \begin{array}{ccccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ & & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	125,3	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 12 \end{array} $
12	Пропанол	$ \begin{array}{ccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{O}-\text{H} \end{array} $	105,8	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 2 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 7 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
13	Толуол	$ \begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C} \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	145,4	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 6 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 8 \end{array} $
14	Уксусная кислота	$ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O} \\ & \\ \text{H} & \text{O} \end{array} $	109,3	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 4 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 2 \end{array} $
15	Этанол	$ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} $	106,8	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 5 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 1 \\ \text{O}-\text{H} \rightarrow 1 \end{array} $
16	Этилацетат	$ \begin{array}{cccc} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O} \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{O} \end{array} $	112,4	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 8 \\ \text{C}-\text{O} \rightarrow 2 \end{array} $
17	Этан	$ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} $	105,9	$ \begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 6 \end{array} $

Окончание табл. 5.11

18	Хлорэтан	$\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \\ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{Cl} \\ \ \\ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	88,4	$\begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 1 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 5 \\ \text{C}-\text{Cl} \rightarrow 1 \end{array}$
19	Пропан	$\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	95,6	$\begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 2 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 8 \end{array}$
20	Бутан	$\begin{array}{c} \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \\ \ \ \ \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ \ \ \ \\ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \ \text{H} \end{array}$	104,8	$\begin{array}{l} \text{C}-\text{C} \rightarrow 3 \\ \text{C}-\text{H} \rightarrow 10 \end{array}$

ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ ВЗРЫВА. ТРОТИЛОВЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ

6.1. Расчет максимального давления взрыва газов и паров

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:

$$P_{\text{взр}} = \frac{P_0 \cdot T_{\text{взр}}}{T_0} \cdot \frac{m}{n}, \quad (6.1)$$

где P_0 – начальное давление, кПа (МПа);

T_0 – начальная температура, К;

$T_{\text{взр}}$ – температура взрыва, К;

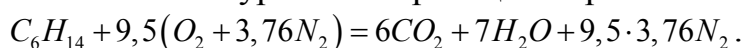
m – число молей (киломолей) газообразных продуктов горения;

n – число молей (киломолей) исходных газообразных веществ.

Пример 6.1. Вычислить максимальное давление взрыва смеси гексана C_6H_{14} 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



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

$$m = 6 + 7 + 9,5 \cdot 3,76 = 48,72 \text{ моль};$$

$$n = 1 + 9,5 \cdot 4,76 = 46,22 \text{ моль}.$$

3. Максимальное давление взрыва составит

$$P_{взр} = \frac{101,3 \cdot 2355}{273} \cdot \frac{48,72}{46,22} = 921,1 \text{ кПа}.$$

6.2. Расчет избыточного давления взрыва индивидуальных веществ

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

$$\Delta P = P_{MAX} - P_0 \quad (6.2)$$

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 ΔP индивидуальных веществ и смесей имеют более сложный вид.

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

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

$$\Delta P = (P_{MAX} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{CB} \cdot \rho_{Г(П)}} \cdot \frac{100}{C_{СТЕХ}} \cdot \frac{1}{K_H} \text{ кПа}, \quad (6.3)$$

где P_{MAX} – максимальное давление взрыва стехиометрической газовой и паровой смеси в замкнутом объеме. Определяется экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных допускается принимать $P_{MAX} = 900$ кПа;

P_0 – 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 6.1;

V_{CB} – свободный объем помещения, м³. Свободный объем помещения определяется как разность между объемом помещения и объемом, занимаемым технологическим оборудованием.

Если свободный объем помещения определить невозможно, то его допускается принимать равным 80 % геометрического объема помещения

$$V_{CB} = 0,8 \cdot V_{помещ} \quad (6.4)$$

$\rho_{Г(П)}$ – плотность газа или пара при расчетной температуре $t_{РАСЧ}$, кг/м³,

где $\rho_{Г(П)} = \frac{M_{Г(П)}}{V_M}$ кг/м³, а $V_M = \frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \frac{T_{РАСЧ}}{P_{РАСЧ}}$ м³/кмоль.

Таблица 6.1

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:

$$\rho_{Г(II)} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,0037 \cdot t_{РАСЧ})} \text{ кг/м}^3, \quad (6.5)$$

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

V_0 – молярный объем при нормальных условиях, равный 22,4 м³/кмоль;

$t_{РАСЧ}$ – расчетная температура, °С.

$C_{СТЕХ}$ – стехиометрическая концентрация горючих газов или паров ЛВЖ и ГЖ, % (объемных). Стехиометрическая концентрация вычисляется по формуле

$$C_{СТЕХ} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta} \%, \quad (6.6)$$

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

$$\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}, \quad (6.7)$$

где n_C , n_H , n_X , n_O – число атомов С, Н, О, галогенов в молекуле горючего вещества.

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

Пример 6.2. Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, где обращается толуол.

Данные для расчета.

1. Характеристика горючего вещества:

толуол $C_6H_5CH_3$ – метилбензол; температура вспышки $t_{ВСП} = -5$ °С; нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР = 1,21 %; константы уравнения Антуана: $A = 6,0507$; $B = 1328,17$; $C = 217,713$; плотность жидкости $\rho_{Ж} = 867$ кг/м³; максимальное давление взрыва паров толуола $P_{МАХ} = 634$ кПа.

2. Характеристика помещения:

длина $l = 18$ м;

ширина $b = 12$ м;

высота $h = 6$ м;

температура воздуха в помещении 25 °С;
скорость воздушного потока в помещении 0,1 м/с.

3. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса:

объем аппарата $V_{АП} = 0,05 \text{ м}^3$;
степень заполнения аппарата жидкостью $\varepsilon = 0,85$;
температура жидкости в аппарате 40 °С.

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 $m_{АП}$.

$$m = 867 \cdot 0,05 \cdot 0,85 = 37 \text{ кг.}$$

2. Определяем площадь испарения жидкости

$$S_{ИСПАР} = 37 \text{ м}^2.$$

3. Определяем интенсивность испарения $W_{ИСП}$. Для этого находим неизвестные величины.

При 25 °С и $\omega_{ВОЗД} = 0,1 \text{ м/с}$ коэффициент $\eta = 2,1$,
молярная масса толуола ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) $M = 92 \text{ кг/кмоль}$.

Давление насыщенного пара толуола определяем по уравнению Антуана. В качестве температуры жидкости $t_{ж}$ принимаем среднюю температуру между температурой воздуха в помещении и температурой жидкости в аппарате

$$t_{ж} = (25 + 40) / 2 = 32,5 \text{ °С.}$$

$$P_s = 10^{\left(6,0507 - \frac{1328,17}{217,713 + 32,5}\right)} = 5,53 \text{ кПа.}$$

Тогда интенсивность испарения будет равна

$$W_{ИСП} = 10^{-6} \cdot 2,1 \cdot \sqrt{92} \cdot 5,53 = 111,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с.}$$

4. Определяем массу жидкости, испарившейся с поверхности разлива $m_{ИСП ЖИДК}$.

Расчетное время испарения принимаем

$$\tau_{РАСЧ} = 3600 \text{ с. Тогда}$$

$$m_{ИСП ЖИДК} = 111,4 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 37 = 14,8 \text{ кг.}$$

5. Избыточное давление при взрыве паров толуола определяем по формуле (6.3).

Для расчета нам известны следующие величины:

$$P_{МАХ} = 634 \text{ кПа;}$$

$$P_0 = 101 \text{ кПа;}$$

$$m = 14,8 \text{ кг};$$

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

$$K_H = 3.$$

Остальные величины V_{CB} , ρ_G , $C_{СТЕХ}$ необходимо рассчитать.

6. Определим свободный объем помещения V_{CB}

$$V_{CB} = 18 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 0,8 = 1036,8 \text{ м}^3.$$

7. Определим плотность паров толуола в помещении ρ_G .

Температура воздуха в помещении $t_{РАСЧ} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поскольку атмосферное давление в помещении принимаем равным нормальному атмосферному давлению P_0 , плотность паров можно рассчитать по формуле (6.5)

$$\rho_G = \frac{92}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 25)} = 3,76 \text{ кг/м}^3.$$

8. Определим стехиометрическую концентрацию паров толуола $C_{СТЕХ}$

$$C_{СТЕХ} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta} \text{ } \%$$

Уравнение реакции горения толуола



Коэффициент β можно рассчитать и по формуле (6.7)

$$\beta = 7 + 8 / 4 = 9.$$

Тогда $C_{СТЕХ} = 100 / (1 + 4,76 \cdot 9) = 1,86 \text{ } \%$.

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

$$\Delta P = (634 - 101) \cdot \frac{14,8 \cdot 0,3}{1036,8 \cdot 3,76} \cdot \frac{100}{1,86} \cdot \frac{1}{3} = 10,9 \text{ кПа}.$$

6.3. Расчет тротилового эквивалента взрыва

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

$$W_T = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{Q_H}{Q_T} \cdot z \cdot m \text{ кг}, \quad (6.8)$$

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;

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

Q_T – удельная теплота взрыва ТНТ ($q_T = 4240$ 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. 6.1.

Пример 6.3. В производственном помещении находится аппарат с бензолом C_6H_6 . 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

$M(C_6H_6) = 78$ кг/кмоль.

$$Q_H = \frac{3169,4 \cdot 1000}{78} = 40633 \text{ кДж/кг.}$$

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

3. Рассчитаем тротиловый эквивалент взрыва

$$W_T = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{40633}{4240} \cdot 0,3 \cdot 20 = 25,6 \text{ кг.}$$

6.4. Расчет радиуса зон разрушений

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 ΔP и соответственно

безразмерным коэффициентом K . Классификация зон разрушения приводится в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Классификация зон разрушения

Класс зоны разрушения	K	ΔP , кПа
1	3,8	≥ 100
2	5,6	70
3	9,6	28
4	28,0	14
5	56,0	$\leq 2,0$

Радиус зоны разрушения (м) в общем виде определяется выражением

$$R = K \cdot \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}}, \quad (6.9)$$

где K – безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект.

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

$$R = K \cdot \sqrt[3]{W_T}. \quad (6.10)$$

Пример 6.4. Определить радиус зон разрушений в помещении, где произошло разрушение аппарата с толуолом. Условие примера 6.2.

Решение.

1. Определим низшую теплоту сгорания толуола

$$M(C_6H_5CH_3) = 92 \text{ кг/кмоль},$$

$$\Delta H^{сгор} = -3771,9 \text{ кДж/моль},$$

$$Q_H = \frac{3771,9 \cdot 1000}{92} = 40999 \text{ кДж/кг}.$$

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

3. Рассчитаем тротильный эквивалент взрыва

$$W_T = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{40999}{4240} \cdot 0,3 \cdot 37 = 47,7 \text{ кг}.$$

4. В соответствии с расчетом в примере 6.2.

$$\Delta P = 10,9 \text{ кПа}.$$

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

5. Радиус зоны разрушений составит

$$R = 28 \cdot \frac{\sqrt[3]{47,7}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{47,7}\right)^2\right]^{1/6}} = 24,9 \text{ м.}$$

6.5. Задание для самостоятельной проработки

Задача 6.1. Вычислить максимальное давление взрыва смеси вещества с воздухом, если начальное давление $P = 101,3$ кПа, начальная температура 273 К, температура взрыва T , К. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3

Задание к задаче 6.1

№ вар	Вещество	Температура взрыва, К
1	Циклопентан C_5H_{10}	1950
2	Этилацетат $C_4H_8O_2$	2230
3	Ацетон C_3H_6O	1835
4	Этиленгликоль $C_2H_4O_2$	2384
5	Пентан C_5H_{12}	1988
6	Буганол C_4H_9OH	2036
7	Метанол CH_3OH	1739
8	Пропилбензол C_9H_{12}	2433
9	Гептан C_7H_{16}	1845
10	Бензол C_6H_6	1932
11	Ацетальдегид C_2H_4O	2084
12	Этилбензол C_8H_{10}	2112
13	Октан C_8H_{20}	2303
14	Пропанол C_3H_7OH	2353
15	Толуол C_7H_8	1831
16	Этанол C_2H_5OH	1989
17	Циклогексан C_6H_{12}	2103
18	Циклогексен C_6H_{10}	2209
19	Циклопентан C_5H_{10}	1798
20	Ксилол C_8H_{10}	2202

Задача 6.2. 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 Q_n , кДж/моль. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4

Задание к задаче 6.2

№ вар	Вещество	Масса, кг	Теплота сгорания, кДж/моль
1	Амилацетат $C_7H_{14}O_2$	10	3889,9
2	Амиловый спирт $C_5H_{12}O$	11	3383,6
3	Ацетальдегид C_2H_4O	12	1192,48
4	Ацетон C_3H_6O	13	1821,38
5	Бутилацетат $C_6H_{12}O_2$	14	3285
6	Бутиловый спирт $C_4H_{10}O$	15	2728
7	Гексан C_4H_{14}	16	3887
8	Гексиловый спирт $C_6H_{14}O$	17	4044,6
9	Гептан C_7H_{16}	18	4501
10	Декан $C_{10}H_{22}$	19	6346
11	Диэтиламин $C_4H_{11}N$	20	2550,8
12	Изопентан C_5H_{12}	21	3264
13	Метилпропилкетон C_4H_8O	22	2918
14	Нонан C_9H_{20}	23	5731
15	Октан C_8H_{18}	24	5116
16	Пентан C_5H_{12}	25	3272
17	Пиридин C_5H_5N	26	2822
18	Стирол C_8H_8	27	4438,8
19	Толуол C_7H_8	28	3771,88
20	Этилацетат $C_4H_8O_2$	29	2078

Задача 6.3. Вычислить избыточное давление взрыва в помещении, где обращается заданное вещество.

Данные для расчета

1. Характеристика горючего вещества: температура вспышки $t_{всп}$, °С; нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР; константы уравнения Антуана; плотность жидкости $\rho_{ж}$; максимальное давление взрыва паров вещества P_{max} .

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

3. Характеристика оборудования и параметры технологического процесса: объем аппарата $V_{ап}$, м³; степень заполнения аппарата жидкостью ε , температура жидкости в аппарате $T_{жс}$, °С.

В результате аварийной ситуации аппарат полностью разрушен, вся жидкость поступила в помещение. Испарение жидкости проходило в течение τ , ч. Исходные данные по вариантам приведены в таблице 6.5

Таблица 6.5

Задание к задаче 6.3

№ вар	Вещество	$t_{\text{всп}},$ °C	НКП P, %	Константы уравнения Антуана			$\rho_{\text{ж}},$ кг/м ³	$P_{\text{max}},$ кПа	Размеры помещения			$T_{\text{в}},$ °C	U, м/с	$V_{\text{ап}},$ м ³	ε	$T_{\text{ж}},$ °C	$\tau,$ ч
				A	B	C			l, м	b, м	h, м						
1	Амилацетат C ₇ H ₁₄ O ₂	+ 43	1,08	6,29350	1579,510	221,365	875,6	735	25	25	5	15	0,1	0,03	0,78	38	1,5
2	Амилен C ₅ H ₁₀	- 18	1,49	5,91048	1014,294	229,783	637	780	10	12	4	16	0,2	0,04	0,66	37	1,0
3	н-Амиловый спирт C ₅ H ₁₂ O	+ 48	1,46	6,3073	1287,625	161,330	811	737	18	15	3	17	0,3	0,05	0,91	36	0,9
4	Ацетальдегид C ₂ H ₄ O	- 40	4,12	6,31653	1093,537	233,413	783,4	648	22	17	4	18	0,1	0,06	0,83	35	1,0
5	Ацетон C ₃ H ₆ O	- 18	2,7	6,37551	1281,721	237,088	790,8	572	30	20	5	19	0,2	0,07	0,76	34	0,5
6	Бензол C ₆ H ₆	- 11	1,43	5,61391	902,275	178,009	873,68	882	28	16	6	20	0,3	0,08	0,93	33	0,7
7	Бутилацетат C ₆ H ₁₂ O ₂	+ 29	1,35	6,25205	1430,418	210,745	882,5	755	25	15	5	21	0,1	0,03	0,78	34	1,2
8	Бутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	+ 35	1,8	8,72232	266,684	279,638	805,5	716	28	20	4	22	0,2	0,04	0,68	35	1,5
9	Гексан C ₆ H ₁₄	- 23	1,24	5,99517	1166,274	223,661	654,81	848	32	24	5	23	0,3	0,05	0,54	35	1,3
10	Гептан C ₇ H ₁₆	- 4	1,07	6,07647	1295,405	219,819	683,76	843	40	20	6	24	0,1	0,06	0,62	37	1,0
11	N,N-диметилформамид C ₃ H ₇ ON	+ 53	2,35	6,15939	1482,985	204,342	950	618	38	24	3	25	0,2	0,07	0,73	38	1,1
12	1,4-диоксан C ₄ H ₈ O ₂	+ 11	2,0	6,64091	1632,425	250,725	1033	820	25	25	4	26	0,3	0,08	0,81	39	0,8
13	1,2-дихлорэтан C ₂ H ₄ Cl ₂	+ 9	6,2	6,78615	1640,179	259,715	1253	647	30	20	5	27	0,1	0,03	0,77	40	0,5
14	Диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	- 41	1,7	6,12270	1098,945	232,372	713,5	720	24	18	6	28	0,2	0,04	0,62	41	0,7
15	Изобутиловый спирт C ₄ H ₁₀ O	+ 28	1,8	7,83005	2058,392	245,642	803,6	744,8	28	14	3	29	0,3	0,05	0,68	42	1,0
16	Изопропиловый спирт C ₃ H ₈ O	+ 14	2,23	7,51055	1733,00	232,380	784,4	634	35	25	4	30	0,1	0,06	0,73	43	1,2

Окончание таблицы 6.5

17	Метиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$	+ 6	6,98	7,3527	1660,454	245,818	786,9	620	22	12	5	20	0,2	0,07	0,78	38	1,3
18	Пентан C_5H_{12}	- 44	1,47	5,97208	1062,555	231,805	621,4	848	36	32	6	21	0,3	0,08	0,82	39	1,5
19	Пиридин $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	+ 20	1,8	5,91684	1217,730	196,342	978	950	42	36	5	22	0,1	0,05	0,66	40	1,0
20	Стирол C_8H_8	+ 30	1,1	7,06542	2113,057	272,986	901,7	647	30	20	4	23	0,2	0,06	0,73	41	1,2

Задача 6.4. Определить радиус зон разрушений в помещении, где произошло разрушение аппарата с заданным веществом (см. условие задачи 6.2). Исходные данные по вариантам приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6

Задание к задаче 6.4

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta H^{\text{гор}}$, 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
$\Delta H^{\text{гор}}$, кДж/моль	1284	2323	1076	2531	2723,4	2051,4	763,8	3272	2822	4438,8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СМЕСИ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

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 2650 °С, если взрыв произошел в замкнутом пространстве, и 1850 °С, 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).

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 (C_K) можно определить по треугольнику взрываемости (рис. 7.1).

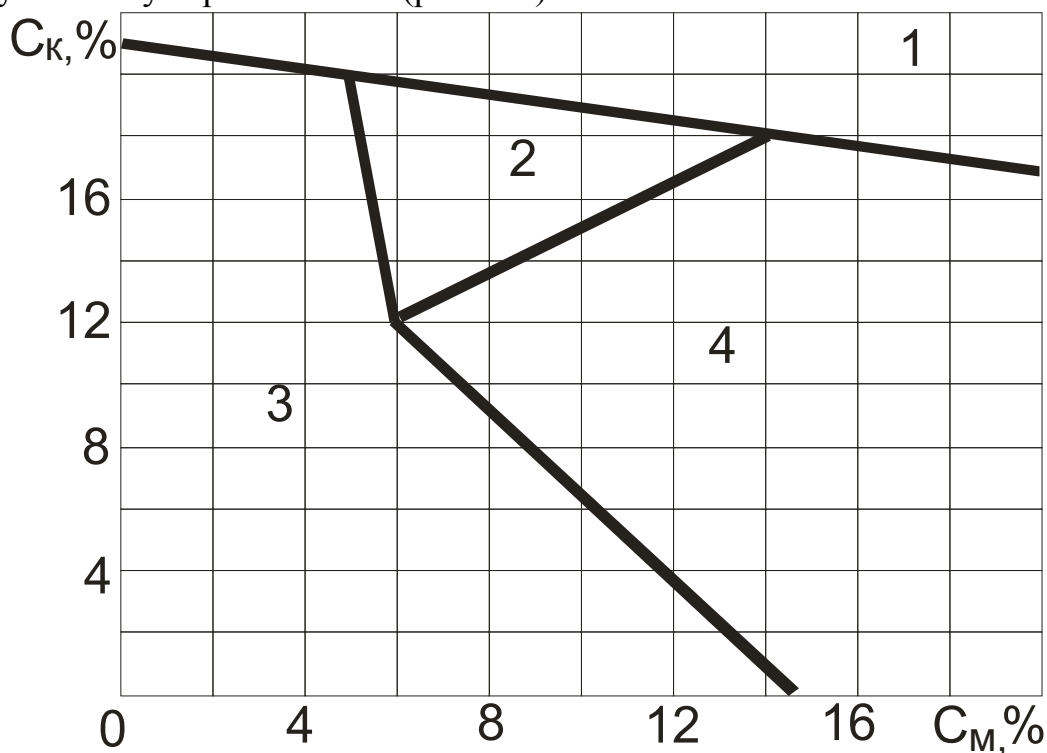


Рис. 7.1. Объемные пределы взрываемости метано-воздушных смесей:
 1 – несуществующая смесь; 2 – взрывчатая смесь; 3 – невзрывчатая смесь;
 4 – смесь, способная стать взрывчатой при добавлении воздуха

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:

$$\tilde{O} = \frac{100}{\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i}}. \quad (7.1)$$

где n_1, n_2, \dots, n_i – объемное содержание каждого горючего компонента в смеси горючих газов, %;

N_1, N_2, \dots, N_i – нижние концентрационные пределы взрываемости каждого из этих компонентов, %.

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

$$n_i = \frac{100C_i}{\sum_1^n C_i}, \quad (7.2)$$

где C_i – 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, применимость 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

$$C_2 = C_M + C_O + C_B, \quad (7.3)$$

где C_M, C_O, C_B – концентрация соответственно метана, оксида углерода и водорода, %.

Затем рассчитывают долю каждого горючего газа в смеси по выражениям:

$$P_M = C_M/C_2; \quad P_O = C_O/C_2; \quad P_B = C_B/C_2. \quad (7.4)$$

Правильность расчета проверяется по соотношению

$$P_M + P_O + P_B = 1. \quad (7.5)$$

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 (C_K) 15 %, оксида углерода (C_O) 0 %, метана (C_M) 2,1 % и водорода (C_B) 1,4 %.

Затем по формуле (7.3) подсчитываем, что концентрация суммы горючих газов (C_T) равна 3,5 %. Доля оксида углерода в смеси горючих газов (P_O) равна 0, а доля метана (P_M) 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 **X**, соответствующую состоянию атмосферы пожарного участка.

Из графика видно, что точка **X** 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 **X** 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 **X** с точкой **A**, 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 **X** по линии, соединяющей ее с точкой **B**, 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.

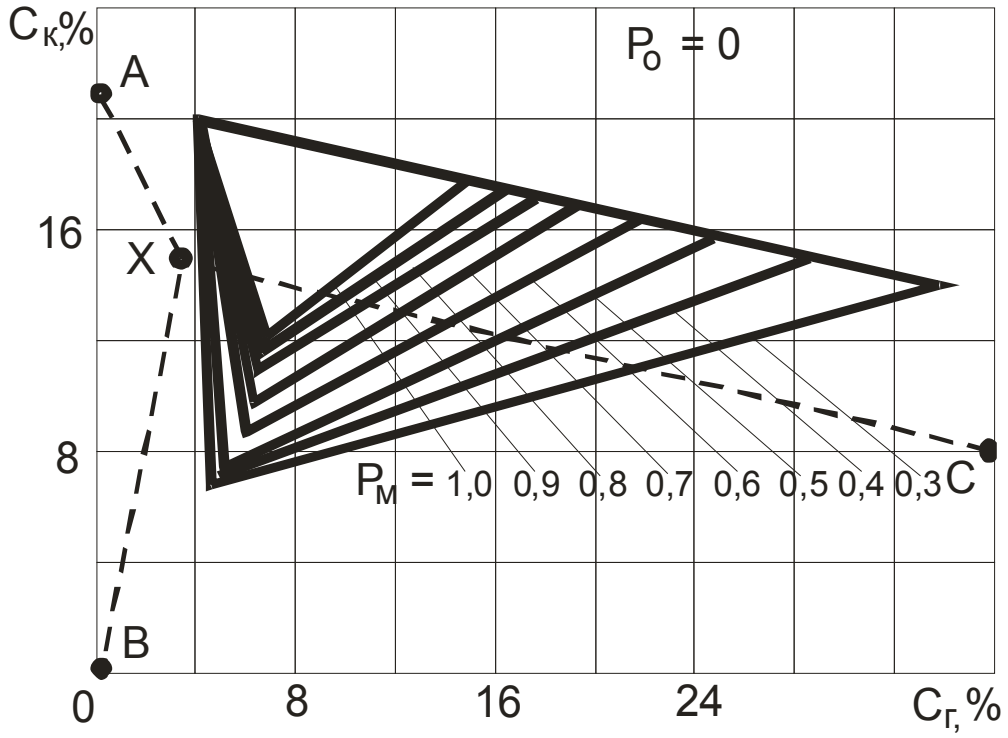


Рис. 7.2. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при отсутствии оксида углерода ($P_0 = 0$)

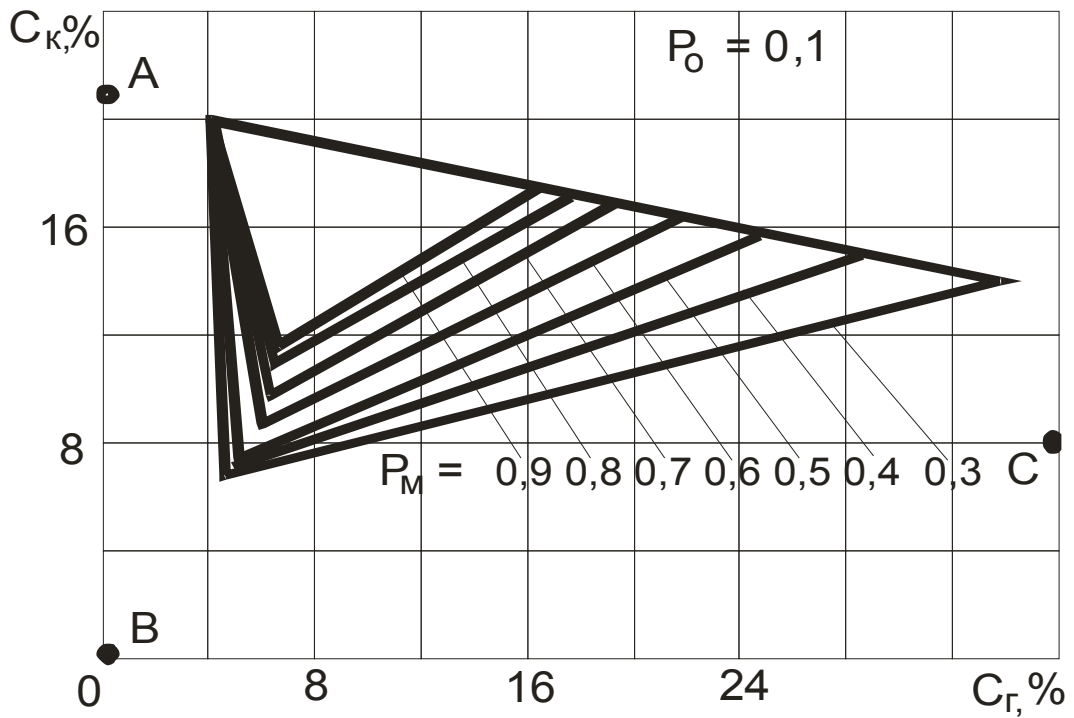


Рис. 7.3. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,1

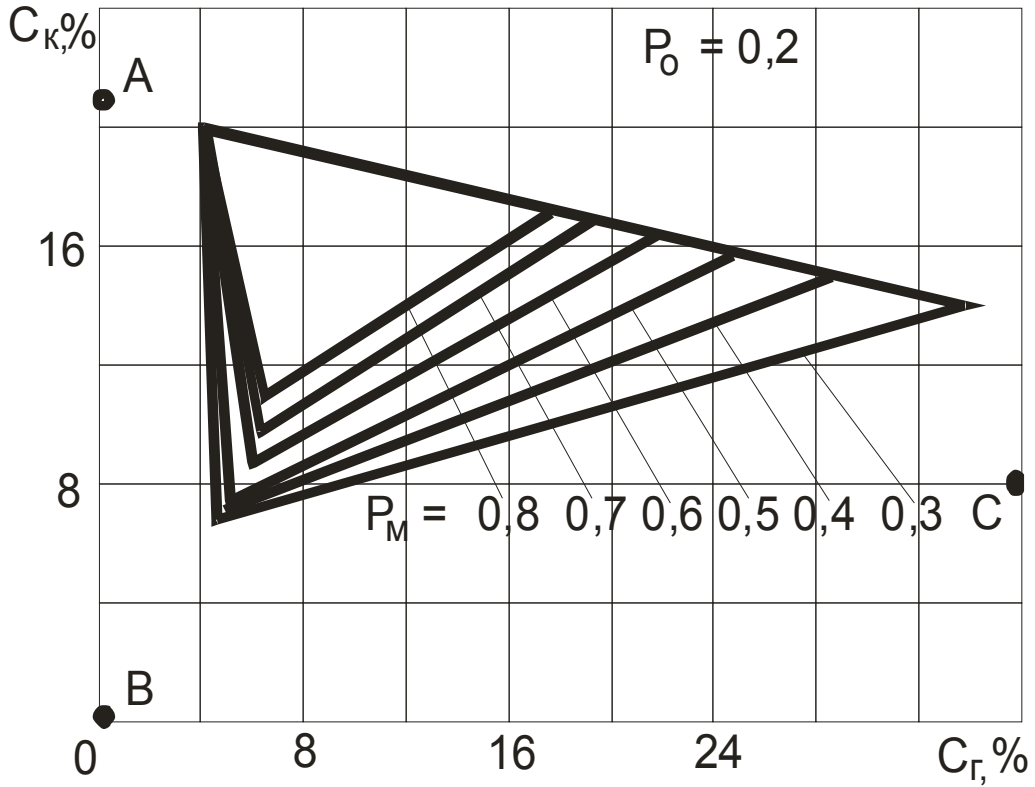


Рис. 7.4. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,2

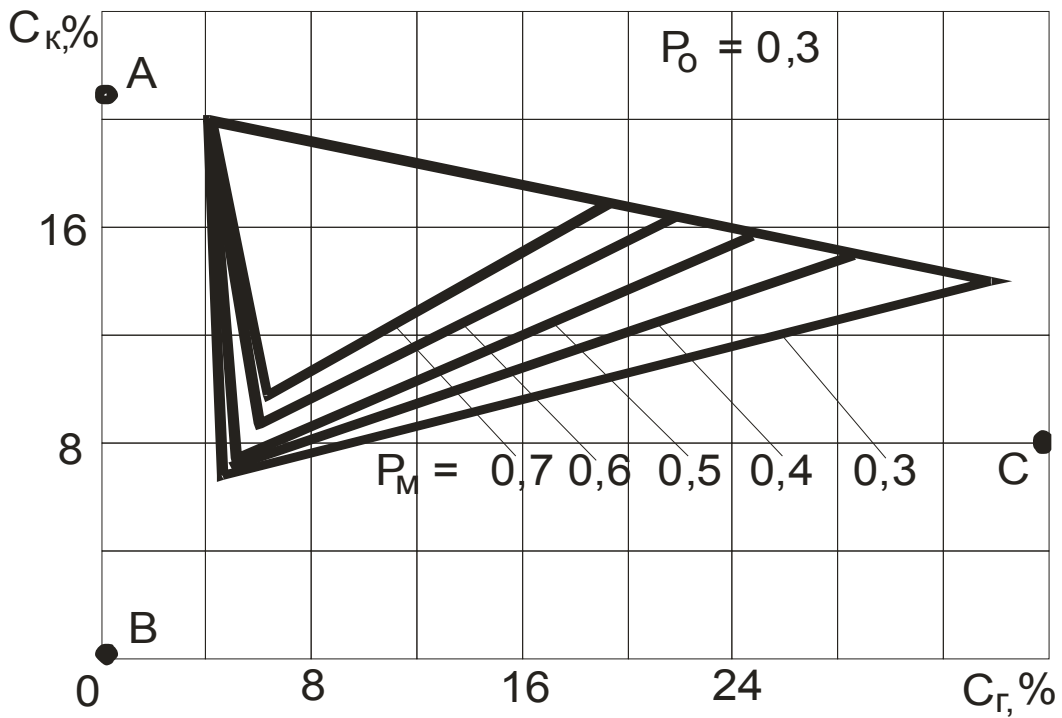


Рис. 7.5. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,3

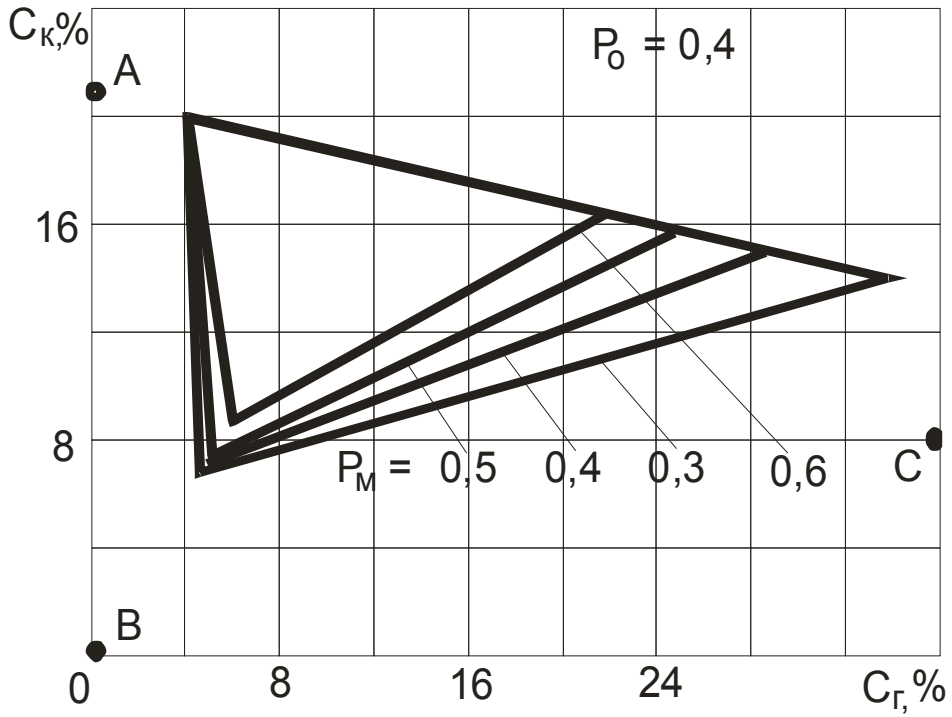


Рис. 7.6. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4

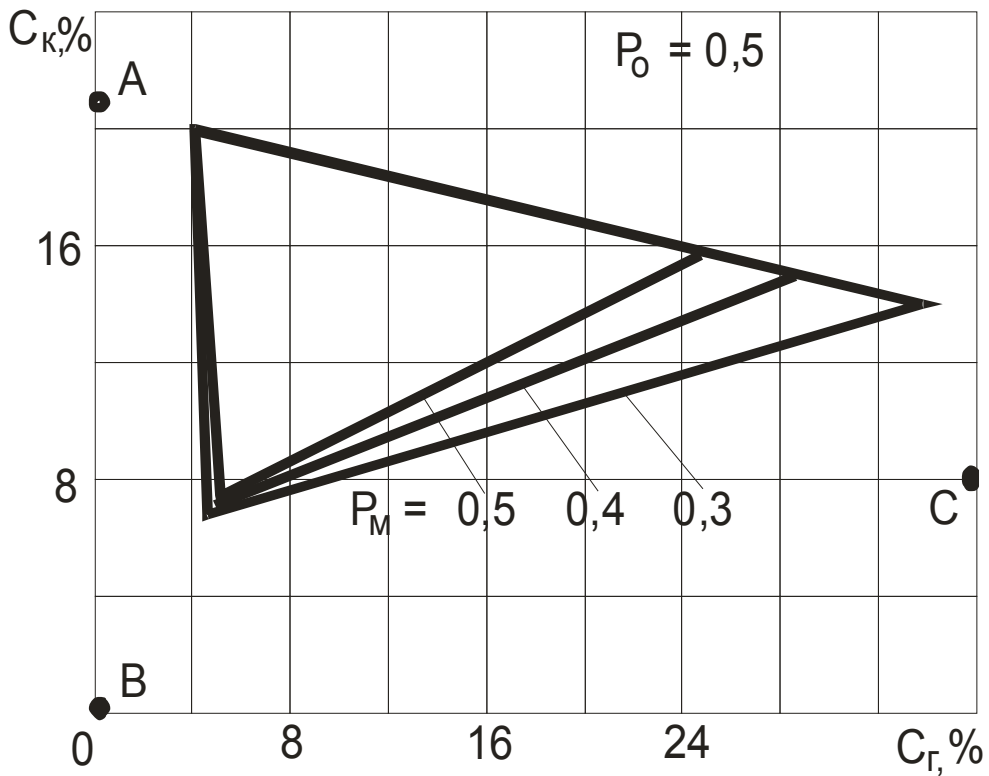


Рис. 7.7. Треугольники взрываемости смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,5

В случае дополнительного выделения горючих газов, приводящего к увеличению их концентрации в смеси, точка **X**, отображающая состояние смеси газов, начнет перемещаться к точке **C**. 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.

7.1. Задание для самостоятельной проработки

Задача 7.1

1. Из предложенных в таблице 7.1 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.

Таблица 7.1

*Исходные данные для оценки взрываемости смеси горючих газов
при пожаре в шахте*

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
26	11	8	10	2
27	9	8	8	0
28	14	5	1	2
29	7	7	3	4
30	12	4	4	3

Приложение 1

Стандартные энтальпии образования и энтропии
некоторых веществ при 298 К

№ п/п	Вещество	ΔH° обр., кДж/моль	S° , Дж/моль·К
1	Углекислый газ CO ₂ (г)	- 393,5	213,7
2	Вода H ₂ O (г)	- 241,8	188,7
3	Азот N ₂ (г)	0	191,5
4	O ₂ (г)	0	205,0
5	Бутан C ₄ H ₁₀ (г)	- 126,2	310,1
6	Пентан C ₅ H ₁₂ (г)	- 146,4	348,9
7	Гексан C ₆ H ₁₄ (ж)	- 198,8	295,9
8	Гептан C ₇ H ₁₆ (ж)	- 224,4	328,5
9	Октан C ₈ H ₁₈ (ж)	- 208,5	466,7
10	Циклопентан C ₅ H ₁₀ (г)	- 77,2	292,9
11	Циклогексан C ₆ H ₁₂ (г)	- 123,1	298,2
12	Ацетилен C ₂ H ₂ (г)	226,8	200,8
13	Этилен C ₂ H ₄ (г)	52,3	219,4
14	Пропен C ₃ H ₆ (г)	20,4	266,9
15	Бутен-1 C ₄ H ₈ (г)	- 0,13	305,6
16	Бутадиен-1,3 C ₄ H ₆ (г)	110,2	278,7
17	Бензол C ₆ H ₆ (ж)	49,1	173,2
18	Толуол C ₇ H ₈ (ж)	12,0	219,6
19	о- Ксилол C ₈ H ₁₀ (ж)	19,0	352,8
20	м-Ксилол C ₈ H ₁₀ (ж)	17,2	357,7
21	Метиловый спирт CH ₃ OH (ж)	- 238,7	126,7
22	Этиловый спирт C ₂ H ₅ OH (ж)	- 277,6	160,7
23	Пропиловый спирт C ₃ H ₇ OH (ж)	- 306,9	192,9
24	Изопропиловый спирт C ₃ H ₈ O(ж)	- 320,3	179,9
25	Метаналь HCOH (г)	- 115,9	220,1
26	Этаналь CH ₃ COH (г)	- 166,4	265,7
27	Муравьиная кислота HCOOH (ж)	- 409,2	128,9
28	Уксусная кислота CH ₃ COOH (ж)	- 487,0	159,8
29	Ацетон CH ₃ COCH ₃ (ж)	- 248,3	155,4
30	Этилацетат CH ₃ COOC ₂ H ₅ (ж)	- 463,2	259,0
31	Глицерин C ₃ H ₈ O ₃ (ж)	- 659,4	207,9
32	Диметиламин (CH ₃) ₂ NH	- 27,6	273,2
33	Анилин C ₆ H ₅ NH ₂	35,3	191,6
34	Нитробензол C ₆ H ₅ NO ₂	15,9	244,3

Низшая теплота сгорания некоторых сложных веществ

Вещество	Q _н , кДж/кг	Вещество	Q _н , кДж/кг
Антрацит	31425	Киноплёнка	
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

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, t°С	Теплосодержание, кДж/кмоль					
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
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

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, t ⁰ C	Теплосодержание, кДж/м ³					
	O ₂	N ₂	воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
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

Физико-химические константы некоторых веществ

№	Вещество	Константы уравнения Антуана	Диэлектр. прониц.	$t_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{образ.}}$ кДж/моль	$\Delta H_{\text{исп.}}$ кДж/моль
1.	Амиловый спирт $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	$\lg p = 6,3073 - 1287,625/(161,330 + t)$	14,4	138	- 36,39	46,05
2	Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	$\lg p = 6,37551 - 1281,721/(237,088 + t)$	20,7	56,5	- 248,28	32,29
3	Ацетальдегид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	$\lg p = 6,31653 - 1093,537/(233,413 + t)$	21,1	20,2	- 166,36	27,00
4	Бензол C_6H_6	$\lg p = 5,61391 - 902,275/(178,099 + t)$	2,02	80,1	+ 82,9	48,14
5	Гексан C_6H_{14}	$\lg p = 5,99517 - 1166,274/(223,661 + t)$	1,890	68,74	- 167,2	28,88
6	Гептан C_7H_{16}	$\lg p = 6,07647 - 1295,405/(219,819 + t)$	1,974	98,43	- 187,7	
7	Диэтиловый эфир $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	$\lg p = 6,9979 - 1098,945/(232,372 + t)$	4,22	34,5	- 252,2	26,71
8	м-Ксилол C_8H_{10}	$\lg p = 6,58807 - 1906,796/(234,917 + t)$	2,374	139	- 28,4	36,84
9	п-Ксилол C_8H_{10}	$\lg p = 6,25485 - 1537,082/(223,608 + t)$	2,270	138,3	- 24,4	36,56
10	о-Ксилол C_8H_{10}	$\lg p = 6,28893 - 1575,114/(223,579 + t)$	2,568	144,4	- 24,4	36,71
11	Метанол CH_3OH	$\lg p = 7,3527 - 1660,454/(245,818 + t)$	32,63	64,9	- 203,1	35,28
12	Этилбензол C_8H_{10}	$\lg p = 6,35879 - 1590,660/(229,581 + t)$	2,4	136,2	+ 29,9	36,31
13	Этиленгликоль $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\lg p = 8,13754 - 2753,183/(252,099 + t)$	37,7	197	- 453,8	56,93
14	Бутанол $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	$\lg p = 8,72232 - 2664,684/(279,638 + t)$	17,7	117	- 274,6	43,83
15	Октан C_8H_{20}	$\lg p = 6,09396 - 1379,556/(211,896 + t)$	1,948	125,66	- 208	34,62
16	Пентан C_5H_{12}	$\lg p = 5,97208 - 1062,555/(231,805 + t)$	1,844	36	- 146,4	52,12
17	Пропанол $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	$\lg p = 7,44201 - 1751,981/(225,125 + t)$	19,7	97,8	- 257,7	46,15
18	Пропанол-2 $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	$\lg p = 7,51055 - 1733,00/(232,380 + t)$	18,3	83,2	- 272,4	40,19
19	Пропилбензол C_9H_{12}	$\lg p = 6,29713 - 1627,827/(220,499 + t)$	2,284	159	+ 7,9	38,47
20	Толуол C_7H_8	$\lg p = 6,0507 - 1328,171/(217,713 + t)$	2,379	110,6	+ 50,17	33,53
21	Уксусная кислота $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\lg p = 7,10337 - 1906,53/(255,973 + t)$	6,15	118,1	- 437,3	27,2
22	Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$\lg p = 7,81158 - 1918,508/(252,125 + t)$	25,2	78,5	- 234,9	38,59
23	Этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	$\lg p = 6,22672 - 1244,951/(217,881 + t)$	6,02	77	- 442,9	
24	2,2-Диметилбутан C_6H_{14}	$\lg p = 5,87976 - 1081,176/(229,343 + t)$	2,02	49,7	- 185,6	

Окончание прил. 5

25	Диметиловый эфир C ₂ H ₆ O	$\lg p = 6,34963 - 1004,099/(254,831 + t)$	3,50	- 24,8	- 184	
26	Дипропиловый эфир C ₆ H ₁₄ O	$\lg p = 6,2408 - 1397,34/(240,177 + t)$	3,88	89,5	- 293,4	
27	2-Метилбутан C ₅ H ₁₂	$\lg p = 5,91799 - 1022,511/(233,493 + t)$	1,9	27,9	- 154,5	
28	Муравьиная кислота CH ₂ O ₂	$\lg p = 4,99272 - 765,889/(154,546 + t)$	57,9	100,8	- 378,6	46,3
29	Циклогексан C ₆ H ₁₂	$\lg p = 5,96991 - 1203,526/(222,863 + t)$	2,02	80,7	- 123,13	30,73
30	Циклогексанон C ₆ H ₁₀ O	$\lg p = 6,33089 - 1670,009/(230,312 + t)$	18,3	155,6	- 226	
31	Циклогексен C ₆ H ₁₀	$\lg p = 6,0111 - 1229,973/(224,104 + t)$	2,220	82,9	- 5,36	
32	Циклопентан C ₅ H ₁₀	$\lg p = 6,00291 - 1119,208/(230,738 + t)$	1,965	49,3	- 77,2	
33	2-Метилгексан C ₇ H ₁₆	$\lg p = 5,99812 - 1236,026/(219,545 + t)$	1,9	90	- 194,9	
34	Пентанон-2 C ₅ H ₁₀ O	$\lg p = 6,98913 - 1870,4/(273,2 + t)$	14,0	103,3	- 258,6	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин В.Р. Теория горения и взрыва / Малинин В.Р., Климкин В.И., Аникеев С.В., Коробейников Е.Г. и др./ Учебник для вузов МЧС России по специальности 280104.65 – пожарная безопасность /Под. ред. проф. В.С. Артамонова/. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2007. – 293 с.
2. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. – Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. – Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
4. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ./Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П и др.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
5. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ. / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П и др.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – 384 с.
6. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. – М.: Мир, 1973. – 352 с.
7. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986. – 216 с.
8. Зельдович Я.Б., Баренблат Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 2000. – 476 с.
9. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 2001. – 615 с.
10. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М.: Из-во МГУ, 1987. – 442 с (М.: ИНФРА-М, 2007. – 428 с.)
11. Абдурагимов И.М. и др. Процессы горения. М.:ВИПТШ МВД СССР, 1984.
12. Власов Д.А. Взрыв и его последствия – СПб.: Технологический институт, 2002 г.
13. Голотин Г.И. Теория горения и взрыва. Челябинск. Изд.ЮурГУ, 1999.
14. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975.
15. Ксандопуло Г.И. Химия пламени. М.:1980.
16. Кутуев Р.Х., Малинин В.Р. и др. Теоретические основы процессов горения. С-Пб: 1996.

17. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977.
18. Симаков В.А. Топливо и основы теории горения. Уфа. УГНТУ, 1998.
19. Терминологический словарь по пожарной безопасности / Сост. М.С.Васильев, Н.В.Бородина. – М.; ФГУ ВНИИПО, 2001.
20. Фристром Р.М., Вестенберг А.А. Структура пламени. М.: Металлургия, 1969.
21. Хацринов А.И., Батурова Г.С., Валеев Н.Х. Пламя. Казань, КГТУ, 1999.
22. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М.: МГУ, 1957.
23. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / Под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974.
24. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. К.Г. Бомштейна; Под. ред. Ю.А. Кошмаров, В.Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990.
25. ГОСТ 12.1.004-91* Пожарная безопасность. Общие требования.
26. ГОСТ 12.1.044-89* Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
27. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. (Справочное издание в двух книгах) / Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. – М.: Химия, 1990.
28. Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Изд. «Пожнаука», 2000.

Учебное издание

ПОРТОЛА Вячеслав Алексеевич
ЛУГОВЦОВА Наталья Юрьевна
ТОРОСЯН Елена Самвеловна

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Учебное пособие


Научный редактор *доктор технических наук,*
профессор В.А. Портола
Редактор *Л.А. Холопова*
Компьютерная верстка *Н.Ю. Луговцова,*
Е.С. Торосян
Дизайн обложки *О.А. Аршинова*

Подписано к печати 28.10.12. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 6,28. Уч.-изд.л. 5,68
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru