

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

С.А. Карауш

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Учебное пособие

Томск
Издательство ТГАСУ
2015

УДК 536.46:614.841(075.8)

ББК 65.9(2)248я7

Карауш, С.А. Расчет параметров процессов горения
К 21 [Текст] : учебное пособие / С.А. Карауш. – Томск : Изд-во
Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 120 с.
ISBN 978-5-93057-644-3

В учебном пособии рассматриваются процессы горения горючих веществ и методики расчета параметров этих процессов. Приводятся краткие справочные данные по параметрам горючих веществ. Приведены поясняющие примеры и тестирующие задания.

Пособие написано для практических занятий, самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теория горения и взрыва», для подготовки бакалавров по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность». Оно будет полезно читателям, занимающимся вопросами горения различных материалов и веществ.

УДК 536.46:614.841(075.8)

ББК 65.9(2)248я7

Рецензенты:

Логинов В.С., докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники Национального исследовательского Томского политехнического университета;

Семухин Б.С., докт. техн. наук, профессор кафедры «Охрана труда и окружающей среды» ТГАСУ.

ISBN 978-5-93057-644-3

© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2015

© Карауш С.А., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Памятка студенту	7
1. Общие сведения о процессах горения и взрыва	8
1.1. Основные термины процессов горения и взрыва	8
1.2. Уравнения реакций горения	10
1.3. Показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов	14
1.4. Состав и свойства горючих веществ	16
2. Химические основы процессов горения	23
2.1. Кинетика и классификация химических реакций	23
2.2. Закон действующих масс	24
2.3. Зависимость скорости реакции от температуры и давления	26
2.4. Закон Гесса	32
3. Физические основы процессов горения	39
3.1. Горение веществ и материалов	39
3.2. Характеристика пламени и скорость его распространения	40
3.3. Нормальное (ламинарное) горение газа на примере бунзеновской горелки	42
3.4. Тепловая теория самовоспламенения Н.Н. Семенова	46
4. Горение топлива в топочном устройстве	59
4.1. Топочные устройства	59
4.2. Материальный баланс процесса горения	61
4.3. Расчет горения капли жидкого топлива	70
4.4. Методы сжигания газа, классификация горелок	77
4.5. Общие положения расчета газовых горелок	82
4.6. Расчет дутьевых диффузионных горелок	86
4.7. Расчет инжекционной газовой горелки	94
Список рекомендуемой литературы	106
Приложение 1. Расчетные характеристики некоторых видов жидкого топлива	108
Приложение 2. Расчетные характеристики твердого топлива	109
Приложение 3. Расчетные характеристики природных газов	111
Приложение 4. Теплота образования, испарения и сгорания некоторых веществ при стандартных условиях	112
Приложение 5. Нормальная скорость распространения пламени при горении некоторых газов в газозудушной смеси	114

Приложение 6. Максимальная нормальная скорость распространения пламени при горении некоторых газов в газозодушнoй смеси	115
Приложение 7. Пределы воспламенения газов в воздушных смесях при атмосферном давлении и температуре 20 °С	116
Приложение 8. Теплота сгорания и плотность углеводородов в жидком состоянии при температуре 20 °С	117
Приложение 9. Теплофизические свойства некоторых веществ	119

ПРИНЯТЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

d, l – диаметр и длина;

E – энергия активации;

H, h – полная и удельная энтальпии;

k – коэффициент теплопередачи;

λ – коэффициент теплопроводности;

M, G – масса и массовый расход;

μ – молекулярная масса;

n – число молей;

U – скорость горения;

V, v – полный и удельный объем;

W, w, w_G – скорость реакции, линейная и массовая скорости;

C – концентрация вещества;

C_p, C_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме;

Q – теплота химической реакции;

Q_H, Q_B – низшая и высшая теплота сгорания;

q – плотность теплового потока;

P – давление;

T, t – абсолютная температура и температура по шкале Цельсия;

t_B, t_{B3}, t_{CB} – температура вспышки, воспламенения и самовоспламенения;

R – универсальная газовая постоянная;

ρ – плотность;

τ – время;

r – объемная или мольная доля газа в газовой смеси.

ВВЕДЕНИЕ

Пожары и взрывы в сфере материального производства всегда причиняют значительный материальный и социальный ущерб экономике любой страны, а в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. Вот почему так необходима подготовка специалистов по направлению «Техносферная безопасность», которые занимаются решением вопросов предотвращения пожаров и взрывов, обеспечением безопасности технологических процессов и производств.

Учебное пособие по дисциплине «Теория горения и взрыва» для проведения практических занятий написано в строгом соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Основная цель пособия – научить студента пользоваться нормативными методиками, проводить расчеты по оценке параметров процессов горения и анализировать потенциальную пожароопасность различных горючих веществ.

В результате освоения данного раздела дисциплины студент должен уметь рассчитывать параметры процессов горения, определять область воспламенения газо- и паровоздушных смесей и скорости распространения пламени. Для возможности работать самостоятельно с учебным пособием в нем приводятся поясняющие примеры.

Представленный в пособии материал будет полезен для студентов других специальностей при изучении дисциплин, связанных с процессами горения.

Автор выражает искреннюю благодарность рецензентам за ценные указания и пожелания, которые помогли улучшить данное пособие.

ПАМЯТКА СТУДЕНТУ

При работе с данным учебным пособием студент должен придерживаться следующих требований:

1. Перед решением каждой задачи необходимо ознакомиться с краткими теоретическими пояснениями по изучаемой теме, понять смысл процессов, происходящих при горении. При необходимости студент может изучить более подробно данный вид горения по учебной литературе [1–3].

2. Перед началом выполнения самостоятельного индивидуального задания обязательно должно быть записано полностью условие задачи и исходные данные к ней в соответствии с вариантом студента.

3. Каждая задача должна по ходу решения сопровождаться краткими пояснениями с указанием параметров, которые находятся, и их размерностью. При решении задачи обязательно использовать систему СИ.

4. Пояснения должны быть краткими и сделаны грамотным, четким техническим языком, с выполнением правил русского языка.

5. При использовании какого-либо метода расчета формулы приводятся в буквенном выражении, а затем в цифровом. Результаты вычислений указываются с размерностями полученных величин.

6. При необходимости по ходу текста следует приводить иллюстрации (эскизы, схемы, графики), поясняющие ход решения задания.

7. После выполнения индивидуального самостоятельного задания обязательно необходимо сделать выводы по полученным результатам расчета.

8. Выполненное индивидуальное задание должно быть сдано преподавателю на проверку. Если преподаватель обнаружил ошибки или неточности, их необходимо исправить.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВАХ

1.1. Основные термины процессов горения и взрыва

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

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

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

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

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

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

Самовозгорание – явление резкого увеличения скорости экзотермических реакций в системе от внесенного источника зажигания, приводящее к горению вещества и продолжающееся в его отсутствии. Температура, при которой начался процесс

увеличения скорости реакции, называется *температурой самовозгорания* $t_{\text{ВЗ}}$.

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

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

Температура самовоспламенения $t_{\text{СВ}}$ всегда выше температуры самовозгорания $t_{\text{ВЗ}}$, а их разность представляет собой температурный интервал саморазогрева системы, предшествующий самовоспламенению.

Взрыв – быстрое неуправляемое физическое или химическое превращение вещества, сопровождающееся образованием большого количества сжатых газов, под давлением которых могут происходить разрушения различных объектов.

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

Химический взрыв характеризуется быстрым химическим взаимодействием горючего и окислителя.

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

Взрывному горению газо- и пылевоздушных смесей всегда предшествует период *дефлаграционного горения*, т. е. горения со сравнительно невысокой (до нескольких метров в секунду) переменной (ускоряющейся) скоростью, которая существенно

зависит от многих факторов (внешнего давления, температуры, концентраций и др.).

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

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

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

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

Более подробно с основными параметрами и терминологией процессов горения и взрыва можно познакомиться в нормативной и учебной литературе [1–5].

1.2. Уравнения реакций горения

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



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

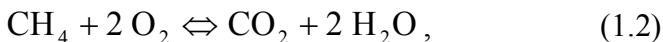
Под стехиометрическими понимают уравнения реакций, в которых отношение количеств исходных веществ строго соответствует условию получения конечных продуктов.

Протекание реакции (1.1) в двух противоположных направлениях называется *химической обратимостью*. Стрелка $\rightleftharpoons$ указывает на образование из исходных веществ конечных продуктов M и N и на протекание реакции в сторону образования исходных веществ A и B .

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

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

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



где стехиометрические коэффициенты, в соответствии с уравнением (1.1), равны: $\alpha = 1$; $\beta = 2$; $\gamma = 1$; $\delta = 2$.

В уравнении (1.2) число атомов элементов веществ уравнено в правой и левой частях уравнения. При сгорании метана продуктами полного горения являются газы CO_2 и H_2O .

Согласно уравнению (1.2), для сгорания 1 кмоль газа CH_4 требуется 2 кмоль O_2 , при этом образуется 1 кмоль газа CO_2 и 2 кмоль газа H_2O . Так как молекулярная масса O_2 составляет 31,998 кг/кмоль, то масса 2 кмоль составит 63,996 кг. Следовательно, для сгорания 1 кмоль метана требуется 63,996 кг кислорода. Атомные массы элементов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Атомные массы некоторых химических элементов

Химический элемент	Название	Атомная масса, кг/кмоль
O	Кислород	15,999
N	Азот	14,006
S	Сера	32,066
Cl	Хлор	35,452
C	Углерод	12,011
H	Водород	1,008
Si	Кремний	28,086

Масса 1 кмоль CH_4 составляет 16,043 кг, на его сжигание требуется 2 кмоль O_2 . Составим пропорцию в виде:

для сжигания 16,043 кг $\text{CH}_4 \rightarrow$ требуется 2 кмоль O_2 ,

для сжигания 1 кг $\text{CH}_4 \rightarrow$ требуется x кмоль O_2 .

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

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

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

Задание 1 для самостоятельной работы

Записать уравнение сгорания горючего вещества в кислороде воздуха. Определить молекулярную массу горючего вещества. Сколько потребуется кг и киломолей кислорода для сжигания m кг горючего вещества. Сколько будет образовано продуктов полного горения в кг и кмоль?

Данные для решения задачи взять из табл. 1.2 в соответствии со своим вариантом.

Таблица 1.2

Исходные данные для задания 1

№ варианта	Название горючего вещества	Химическая формула	Масса горючего вещества m , кг
1	Уксусная кислота	C_2H_4O	1,5
2	Этан	C_2H_6	2
3	Пропан	C_3H_8	3
4	Бутан	C_4H_{10}	4
5	Пентан	C_5H_{12}	5
6	Ацетилен	C_2H_2	6
7	Оксид углерода	CO	7

№ варианта	Название горючего вещества	Химическая формула	Масса горючего вещества m , кг
8	Метилциклопентан	C_6H_{12}	8
9	2-Метилпентан	C_6H_{14}	9
10	Этилен	C_2H_4	10
11	<i>n</i> -Гептан	C_7H_{16}	11
12	Пропилен	C_3H_6	12
13	1-Бутен	C_4H_8	13
14	<i>n</i> -Октан	C_8H_{18}	14
15	Циклопентан	C_5H_{10}	15
16	<i>n</i> -Декан	$C_{10}H_{22}$	16
17	Изопентан	C_5H_{12}	17
18	Ацетон	C_3H_6O	18
19	Этилциклогексан	C_8H_{16}	19
20	Циклогексан	C_6H_{12}	20
21	Изобутан	C_4H_{10}	21
22	Гексан	C_6H_{14}	22
23	<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	23
24	Этиловый спирт	C_2H_6O	24
25	Бензол	C_6H_6	25

1.3. Показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов

Пожаровзрывоопасность — сравнительная вероятность зажигания и горения веществ в равных условиях. Она определяется следующими основными свойствами вещества [4]:

— склонностью к возгоранию;

- температурами воспламенения, вспышки, самовоспламенения;
- концентрационными пределами воспламенения;
- минимальной энергией зажигания;
- дисперсностью и др.

По возгораемости все материалы делят на три большие группы:

1) *несгораемые*, которые под воздействием открытого источника зажигания не воспламеняются, не горят, не тлеют и не обугливаются;

2) *трудносгораемые*, которые воспламеняются, тлеют и обугливаются при наличии источника зажигания, но после его удаления самостоятельно гореть не могут;

3) *сгораемые*, которые могут самостоятельно гореть или тлеть после удаления от них источника зажигания.

Для перевода материалов из группы сгораемых в группу трудносгораемых часто используют их пропитку антипиренами. Под *антипиренами* понимают вещества, предохраняющие материалы органического происхождения от воспламенения и самостоятельного горения. Например, пропитывают древесину, ткани и др. материалы, делая их трудносгораемыми.

В отдельную группу по пожаровзрывоопасности выделяют пыль, которая в воздухе является взрывоопасной. Под пылью понимают диспергированные твердые вещества и материалы с размером частиц менее 850 мкм.

Пыль делят на четыре класса [4]:

I – наиболее взрывоопасные пыли, с нижним пределом воспламенения до 15 г/м^3 (пыли крахмала, пшеничной муки, серы, торфа и др.);

II – взрывоопасные пыли, с нижним пределом воспламенения от 16 до 65 г/м^3 (пыли алюминия, древесной муки, каменного угля, сахара, сена, сланца и др.);

III – пожароопасные пыли, с нижним пределом воспламенения выше 65 г/м^3 и температурой самовоспламенения $t_{\text{СВ}}$ соответственно до $250 \text{ }^\circ\text{C}$;

IV – пожароопасные пыли, с нижним пределом воспламенения выше 65 г/м^3 и температурой самовоспламенения $t_{\text{СВ}}$ более $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для начала процесса горения вещества в самоподдерживающемся режиме к нему необходимо подвести определенное количество энергии, которое называют *минимальной энергией воспламенения*.

1.4. Состав и свойства горючих веществ

По фазовому составу горючие вещества могут быть жидкими, твердыми и газообразными.

Горючая жидкость гореть не может. Гореть могут только ее пары. На поверхности жидкости всегда происходит испарение и создается определенный слой паровоздушной смеси. Самая низкая температура горючей жидкости – температура, при которой пары и газы способны вспыхнуть от источника зажигания (открытого пламени). Но при этом скорость образования паров и газов еще недостаточна для последующего горения, называется *температурой вспышки* $t_{\text{В}}$. В зависимости от температуры вспышки, жидкости подразделяются на виды [4]:

– легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ), когда $t_{\text{В}} < 61 \text{ }^\circ\text{C}$ в закрытом тигле и $t_{\text{В}} < 66 \text{ }^\circ\text{C}$ в открытом (например ацетон – $t_{\text{В}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$; бензин – $t_{\text{В}} = -36 \dots -7 \text{ }^\circ\text{C}$, в зависимости от марки; метиловый спирт – $t_{\text{В}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$; керосин – $t_{\text{В}} = 15\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$ и др.);

– горючие жидкости (ГЖ), к которым относят все пожароопасные жидкости с большей температурой вспышки $t_{\text{в}}$: дизельное топливо, мазут, смазочные масла и т. п.

Состав горючих веществ весьма разнообразен, как показано на рис. 1. Вещества содержат в своем составе наряду с горючими элементами и негорючие компоненты – *балласт*.

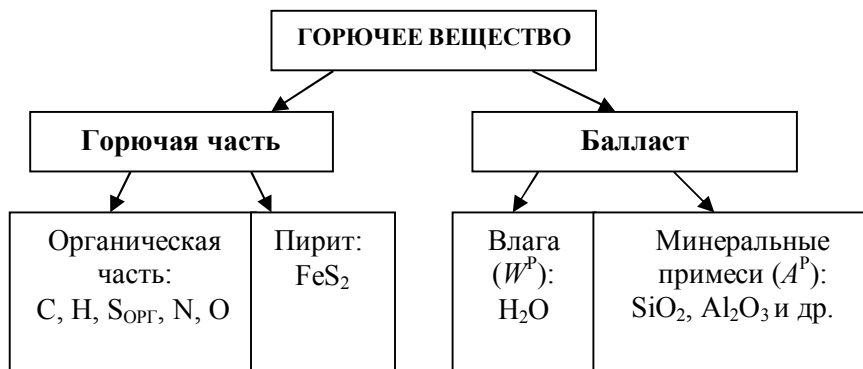


Рис. 1. Состав горючего вещества в твердом или жидком состоянии

Органические вещества (уголь, древесина и др.) являются термически нестойкими, и при повышении температуры начинают разлагаться с выходом из них горючих (водород, углеводороды, оксид углерода и др.) и негорючих (диоксид углерода, водяной пар и др.) газов. Эти газы называют *летучими веществами*. Оценка горючего вещества по выходу летучих веществ V^{Γ} определяют путем нагрева 1 г измельченного воздушно-сухого вещества без доступа воздуха при температуре 850 °С в течение 7 мин. Оставшееся после нагрева твердое (нелетучее) вещество называют *коксовым остатком*.

После полного окисления горючих компонентов в веществе остаются минеральные негорючие примеси, называемые *золой* и *шлаком*.

При горении органического вещества или горючего газа выделяется теплота, называемая теплотой сгорания. Она определяет энергетическую ценность вещества.

Теплота сгорания – количество тепловой энергии, выделившейся при окислении горючих компонентов единицы вещества (1 кг для твердого и жидкого или 1 нм³ для газообразного топлива) газообразным кислородом. Здесь 1 нм³ представляет собой 1 м³ газового топлива, взятый при *нормальных физических условиях*: давление равно 0,1013 МПа, температура – 0 °С.

Низшая теплота сгорания вещества Q_H – выделившаяся при горении тепловая энергия, когда в продуктах сгорания H_2O находится в виде пара.

Высшая теплота сгорания вещества Q_B – теплота, включающая в себя теплоту конденсации водяного пара Q_{H_2O} , входящего в состав продуктов сгорания, т. е. в продуктах сгорания H_2O находится в виде влаги. Теплота конденсации водяного пара при расчетах обычно принимается: $Q_{H_2O} = 2514$ кДж/кг.

Низшая и высшая теплота сгорания связаны между собой соотношением

$$Q_H = Q_B - Q_{H_2O}. \quad (1.3)$$

При сжигании 1 кг органического вещества теплота конденсации водяного пара, кДж/кг, может быть определена по формуле:

$$Q_{H_2O} = 25(W + 9H), \quad (1.4)$$

где W и H – процентное содержание влаги и водорода в веществе по массе, соответственно.

При анализе характеристик твердого и жидкого органического вещества, а это относится и к органическому топливу (уголь, мазут, газ), его состав обычно указывают в процентах. Для твердого и жидкого топлива состав указывается на *рабочую массу* (вверху индекс Р), когда топливо находится в том состоянии, в каком оно поступает потребителю (C^P , H^P , O^P , N^P , S^P , W^P , A^P – составляющие химические элементы в топливе).

Природный газ, поступающий потребителю, обычно практически сухой, поэтому его состав указывают на *сухую массу* (вверху индекс С). При этом для газовой смеси берется вся совокупность всех составляющих газов без учета влаги (CH_4^C , $C_2H_6^C$, $C_3H_8^C$, $C_4H_{10}^C$, $C_5H_{12}^C$, H_2^C , O_2^C , N_2^C , H_2S^C , CO^C , CO_2^C).

Значения теплоты сгорания горючих веществ обычно приводят в справочной литературе. Вместе с тем достаточно часто при расчетах теплоты сгорания твердых и жидких веществ, кДж/кг, широко используется формула Д.И. Менделеева [6]:

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P, \quad (1.5)$$

где C^P , H^P , O^P , S^P , W^P – значения содержания углерода, водорода, кислорода, серы и влаги по массе в веществе, %.

Низшая теплота сгорания для индивидуальных горючих химических соединений и их смесей может быть рассчитана также с использованием закона Гесса (см. п. 2.4).

Для удобства расчетов топливно-энергетических балансов топочных устройств часто используют понятие «условное топливо». Под *условным топливом* понимают некое фиктивное топливо, при сжигании 1 кг которого выделяется 7000 ккал, или 29308 кДж теплоты. С учетом этого вводится понятие «тепловой эквивалент Э» для любого вида топлива, когда его теплота сгорания Q_H^P выражена в кДж/кг:

$$\Xi = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{29308}. \quad (1.6)$$

Для некоторых твердых и жидких веществ, а также природных газов, свойства приведены в прил. 1–3.

Пример. Определить состав угля Бикинского месторождения, а также его основные характеристики: низшую и высшую теплоту сгорания, выход летучих веществ. Рассчитать низшую теплоту сгорания топлива по формуле Д.И. Менделеева и сравнить ее с табличной (прил. 2).

Решение. Для определения расчетных характеристик твердого топлива воспользуемся данными прил. 2. Из таблицы выписываем состав и характеристики угля Бикинского месторождения. Процентный элементарный состав на рабочую массу составит: $C^{\text{P}} = 26,8 \%$; $H^{\text{P}} = 2,3 \%$; $S^{\text{P}} = 0,3 \%$; $N^{\text{P}} = 0,7 \%$; $O^{\text{P}} = 10,8 \%$; влаги в топливе $W^{\text{P}} = 44,5 \%$; золы $A^{\text{P}} = 22,1 \%$.

Выход летучих веществ из угля составит: $V^{\Gamma} = 56 \%$.

Низшая теплота сгорания угля $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 7830$ кДж/кг.

С использованием формулы (1.3) рассчитаем высшую теплоту сгорания топлива, кДж/кг:

$$Q_{\text{B}}^{\text{P}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} = 7830 + 2514 = 10344.$$

Определим низшую теплоту сгорания угля, кДж/кг, по уравнению Д.И. Менделеева (1.5):

$$\begin{aligned} Q_{\text{H}}^{\text{P}} &= 339C^{\text{P}} + 1030H^{\text{P}} - 109(O^{\text{P}} - S^{\text{P}}) - 25W^{\text{P}} = \\ &= 339 \cdot 26,8 + 1030 \cdot 2,3 - 109(10,8 - 0,3) - 25 \cdot 44,5 = 10178. \end{aligned}$$

Сравнивая низшую теплоту сгорания угля, найденную по прил. 2, с рассчитанной по формуле Д.И. Менделеева, видно, что расхождение составляет значительную величину:

$$10178 - 7830 = 2348 \text{ кДж/кг}; \quad \delta = \frac{2348}{10178} 100 \% = 23,1 \% .$$

Такое расхождение обусловлено большим количеством влаги в топливе.

Задание 2 для самостоятельной работы

Определить состав твердого, жидкого и газообразного топлива (по прил. 1–3) и его основные характеристики: состав, низшую и высшую теплоту сгорания, плотность, температуру вспышки, выход летучих веществ.

Для твердого и жидкого топлива рассчитать низшую теплоту сгорания по формуле Д.И. Менделеева. Полученные данные сравнить с табличными значениями для соответствующего топлива.

Данные для решения задачи взять из табл. 1.3 в соответствии со своим вариантом.

Сделать выводы по задаче.

Таблица 1.3

Исходные данные для задания 2

№ варианта	Месторождение угля, тип топлива	Жидкое топливо	Газопровод
1	Подмосковное	мазут малосернистый М-40	Брянск–Москва
2	Бабаевское	мазут малосернистый М-100	Бухара–Урал

Окончание табл. 1.3

№ варианта	Месторождение угля, тип топлива	Жидкое топливо	Газопровод
3	Барандатское	мазут сернистый М-40	Газли–Коган
4	Воркутинское	мазут сернистый М-100	Газли–Ташкент
5	Интинское	мазут высокосернистый М-40	Гоголево–Полтава
6	Челябинское	мазут высокосернистый М-100	Дашава–Киев
7	Назаровское	дизельное топливо	Джаркак–Ташкент
8	Березовское	соляровое масло	Карабулак–Грозный
9	Боготольское	моторное топливо	Карадаг–Ереван
10	Интинское	керосин	Коробки–Волгоград
11	Итатское	бензин	Коробки–Камышин
12	Барандатское	мазут малосернистый М-40	Кумертау–Магнитогорск
13	Черногорское	мазут малосернистый М-100	Лижво–Вольск
14	Норильское	мазут сернистый М-40	Оренбург–Совхозное
15	Абаканское	мазут сернистый М-100	Первомайск–Сторожевка
16	Харанорское	мазут высокосернистый М-40	Промысловка–Астрахань
17	Бикинское	мазут высокосернистый М-100	Коробки–Волгоград
18	Древесина	дизельное топливо	Саратов–Горький
19	Торф фрезерный	соляровое масло	Газли–Ташкент
20	Торф кусковой	моторное топливо	Рудки–Минск
21	Бабаевское	керосин	Бухара–Урал
22	Назаровское	бензин	Дашава–Киев
23	Итатское	мазут малосернистый М-40	Карадаг–Ереван
24	Абаканское	мазут сернистый М-100	Брянск–Москва
25	Бикинское	дизельное топливо	Коробки–Волгоград

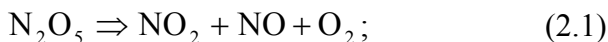
2. ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

2.1. Кинетика и классификация химических реакций

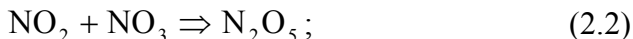
Химическими процессами (реакциями) называются процессы, в результате которых образуются новые вещества, отличающиеся по своим физическим и химическим свойствам от исходных веществ. Протекание химической реакции может быть записано стехиометрическим уравнением типа (1.1).

Необратимые химические реакции, в зависимости от количества атомов и молекул исходного вещества, классифицируются на:

– *мономолекулярные реакции* (реакции первого порядка), в которых реагирует один род молекул, давая при этом одну или несколько новых молекул, например,



– *бимолекулярные реакции* (реакции второго порядка), в которых взаимно реагируют две однородные или различные молекулы, давая одну или несколько новых молекул, например,



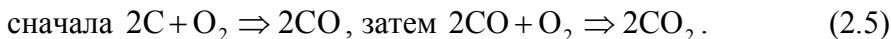
– *тримолекулярные реакции* (реакции третьего порядка), в которых взаимно реагируют три однородные или различные молекулы, давая одну или несколько новых молекул, например,



Реакцию, протекающую в одно действие, называют *простой* (элементарной). Например, реакция сгорания водорода:



Реакцию, протекающую в две и более стадий, называют *сложной*. Например, сгорание углерода обычно происходит в две стадии:



Химическая реакция, протекающая в объеме, когда исходные вещества находятся в газовой фазе или жидкой фазе, называется *гомогенной*.

Реакция, протекающая на поверхности раздела фаз (твердая фаза – жидкая фаза, твердая фаза – газовая фаза), называется *гетерогенной*.

Реакции, протекающие с выделением теплоты, называются *экзотермическими*, а реакции, сопровождающиеся поглощением теплоты, – *эндотермическими*.

2.2. Закон действующих масс

Закон действующих масс устанавливает количественную связь между скоростью реакции и изменением масс веществ. Формулировка закона: *«В однородной среде при постоянной температуре скорость реакции пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ»*.

Скорость прямой реакции W_1 и скорость обратной W_2 при постоянной температуре определяются соотношениями:

$$W_1 = k_1 C_A^a C_B^b; \quad (2.6)$$

$$W_2 = k_2 C_M^{\gamma} C_N^{\delta}, \quad (2.7)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от температуры и химической природы реагирующих веществ, называемые константами скорости прямой и обратной реакций; C_A, C_B, C_M, C_N – концентрации соответствующих химических элементов в реакции; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – стехиометрические коэффициенты в формуле (1.1).

Для условий химического равновесия имеем:

$$W_1 = W_2, \quad k_1 C_A^\alpha C_B^\beta = k_2 C_M^\gamma C_N^\delta, \quad \frac{C_A^\alpha C_B^\beta}{C_M^\gamma C_N^\delta} = \frac{k_2}{k_1} = K_C, \quad (2.8)$$

где K_C – константа равновесия через концентрации.

Уравнения (2.6)–(2.8) представляют собой математическое выражение закона действующих масс.

При постоянной температуре парциальные давления газов в смеси пропорциональны их концентрациям, поэтому константу равновесия через давления можно с использованием уравнения состояния для идеальных газов выразить в виде следующего соотношения:

$$K_P = \frac{P_A^\alpha P_B^\beta}{P_M^\gamma P_N^\delta}, \quad (2.9)$$

где P_A, P_B, P_M, P_N – парциальные давления соответствующих газов в смеси.

Из уравнения состояния для каждого i газа, входящего в газовую смесь при протекании реакции, будем иметь:

$$P_i = \frac{n_i}{V} RT = C_i RT, \quad (2.10)$$

где C_i – молярная концентрация i компонента газа в газовой смеси, моль/м³; P_i – парциальное давление i газа в смеси, Па; V – общий объем газовой смеси, м³; n_i – число молей рассматриваемого i газа в общем объеме газовой смеси V ; R – универсальная газовая постоянная, для идеальных газов $R = 8314$ Дж/(кмоль·К).

Связь между константами равновесия можно записать в виде

$$K_C = K_P (RT)^{\Delta n}, \quad (2.11)$$

где $\Delta n = \gamma + \delta - \alpha - \beta$ – изменение числа молей исходных и образующихся газов в результате реакции (1.1).

2.3. Зависимость скорости реакции от температуры и давления

С ростом температуры скорость реакций горения очень быстро возрастает и при конкретной температуре характеризуется константой скорости реакции K . Для идеальных газов эта зависимость в экспоненциальной форме носит вид:

$$K = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2.12)$$

где E, k_0 – эмпирические константы.

Сильный рост скорости реагирования с повышением температуры в реакциях горения объясняется наличием активных центров. *Активные центры* – молекулы, атомы, радикалы и гид-

роксильные группы, находящиеся в данный момент в особом (богатом энергией) состоянии.

Процесс, при котором изменяется энергия молекул без химического превращения, называется *активацией*, а теплота, поглощаемая при образовании активных молекул, называется *теплотой активации*.

Уравнение температурной зависимости константы скорости реакции K в виде

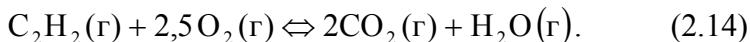
$$\frac{d \ln K}{d T} = \frac{E}{RT^2} \quad (2.13)$$

представляет собой математическую запись закона Аррениуса:

Логарифм скорости реакции как функция от $\frac{1}{T}$ изображается прямой линией, а угол наклона этой прямой определяет энергию активации E .

Пример. В закрытом сосуде вместимостью $0,172 \text{ м}^3$ находится 8 моль ацетилена (C_2H_2) и 3 моль кислорода. В результате реакции сгорания установилось химическое равновесие. Общее давление в равновесном состоянии системы составляет 0,15 МПа. Вычислить равновесные концентрации всех реагентов газовой смеси при температуре 298 К. Система подчиняется законам идеального газа. Определить константы равновесия по давлениям и концентрациям. Чему равны парциальные давления газов в равновесной смеси?

Решение. Запишем уравнение реакции с учетом фазового состояния каждого вещества в виде:

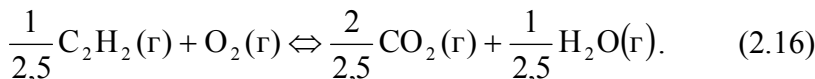


Для данного уравнения приведем количество молей веществ в начальный момент времени, когда реакция не началась:

$$8 + 3 \Leftrightarrow 0 + 0. \quad (2.15)$$

Анализ уравнения (2.14) показывает, что для сжигания 1 моль C_2H_2 требуется 2,5 моль кислорода O_2 . В результате образуется 2 моль CO_2 и 1 моль H_2O .

Перед кислородом в формуле (2.14) стоит множитель 2,5. Если теперь разделить правую и левую часть уравнения (2.14) на 2,5, то получим следующее уравнение:



Из уравнения (2.16) следует, что на 1 моль кислорода будет израсходовано $\frac{1}{2,5}$ моль ацетилена, при этом образуется

$\frac{2}{2,5}$ моль диоксида углерода и $\frac{1}{2,5}$ моль водяного пара.

У нас имеется 3 моль кислорода, следовательно, для его использования требуется $3 \cdot \frac{1}{2,5} = 1,2$ моль ацетилена. Получается, что в реакции на 1,2 моль ацетилена будет полностью израсходован кислород в количестве 3 моль. После окончания реакции в газовой смеси останется еще $8 - 1,2 = 6,8$ моль ацетилена.

Аналогично рассуждая, можно показать, что кроме ацетилена в газовой смеси после протекания реакции будет также диоксид углерода в количестве $2 \frac{3}{2,5}$ моль и водяной пар в количестве $\frac{3}{2,5}$ моль.

Следовательно, количество газов, моль, в газовой смеси в конечный момент времени, когда реакция закончилась, будет:

$$\left(8 - \frac{3}{2,5}\right) + 0 \Leftrightarrow 2\frac{3}{2,5} + \frac{3}{2,5}, \quad (2.17)$$

т. е. $\sum n = 6,8 + 2,4 + 1,2 = 10,4$ моль.

Газовая смесь после установления равновесия реакции будет иметь в своем объеме 6,8 моль ацетилена, 2,4 моль диоксида углерода и 1,2 моль водяного пара.

Концентрацию i вещества C_i для условий равновесного состояния найдем по формуле:

$$C_i = \frac{n_i}{V}, \quad (2.18)$$

где n_i – количество i вещества, моль; V – объем газовой смеси, м³.

Равновесные концентрации веществ в газовой смеси, моль/м³, составят:

$$C_{\text{C}_2\text{H}_2} = \frac{6,8}{0,172} = 39,5;$$

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{2,4}{0,172} = 13,9;$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,2}{0,172} = 6,98.$$

Парциальные давления газов в смеси, Па, найдем с использованием закона Дальтона:

$$P_i = P \frac{n_i}{\sum n}; \quad (2.19)$$

$$P_{\text{C}_2\text{H}_2} = 0,15 \cdot 10^6 \frac{6,8}{10,4} = 98000;$$

$$P_{\text{CO}_2} = 0,15 \cdot 10^6 \frac{2,4}{10,4} = 34600;$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,15 \cdot 10^6 \frac{1,2}{10,4} = 17300.$$

Константа равновесия по давлениям, Па^{-2} , в соответствии с уравнением (2.9), составит:

$$K_P = \frac{P_{\text{C}_2\text{H}_2}}{P_{\text{CO}_2}^2 \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{98000}{34600^2 \cdot 17300} = 4,73 \cdot 10^{-9}. \quad (2.20)$$

Константа равновесия по концентрациям, $\text{м}^6 \text{моль}^{-2}$, в соответствии с уравнением (2.8), составит:

$$K_C = \frac{C_{\text{C}_2\text{H}_2}}{C_{\text{CO}_2}^2 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{45,1}{0,934^2 \cdot 0,465} = 111,2. \quad (2.21)$$

Задание 3 для самостоятельной работы

Углеводородное соединение в газовой фазе в количестве n_{Γ} , находящееся в сосуде объемом V , реагирует с кислородом (сгорает). В начальный момент в сосуде находится n_{K} моль кислорода. В результате реакции горения в сосуде образуются га-

зообразные продукты сгорания с общим давлением P и температурой T .

Требуется:

- записать уравнение химической реакции;
- определить константы равновесия K_p и K_c через равновесное количество образовавшихся продуктов сгорания;
- рассчитать давление системы P и молярные концентрации компонентов C_i равновесной смеси при температуре $T = 298 \text{ K}$, если объем смеси составляет $V = 0,4 \text{ м}^3$.

Данные для решения задачи взять по своему варианту из табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные для задания 3

№ варианта	Исходное горючее вещество в газовой фазе	Химическая формула	Количество горючего n_{Γ} , моль	Количество кислорода n_{K} , моль
1	Ацетилен	C_2H_2	1	25
2	1,3-Бутадиен	C_4H_6	2	24
3	<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	3	23
4	1-Бутен	C_4H_8	4	22
5	Гептан	C_7H_{16}	5	21
6	Декан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	6	20
7	Дивиниловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$	7	19
8	Изобутан	C_4H_{10}	8	18
9	Изобутилен	C_4H_8	9	17
10	Метан	CH_4	10	16
11	<i>n</i> -Метилацетилен	C_3H_4	11	15
12	Оксид этилена	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	12	14
13	Пентан	C_5H_{12}	13	13
14	Пропан	C_3H_8	14	12

№ варианта	Исходное горючее вещество в газовой фазе	Химическая формула	Количество горючего n_{Γ} , моль	Количество кислорода $n_{\text{К}}$, моль
15	Пропилен	C_3H_6	15	11
16	Сероводород	H_2S	16	10
17	Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	17	9
18	Формальдегид	CH_2O	18	8
19	Этан	C_2H_6	19	7
20	Этилен	C_2H_4	20	6
21	Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	21	5
22	Метилциклопентан	C_6H_{12}	22	4
23	2-Метилпентан	C_6H_{14}	23	3
24	<i>n</i> -Октан	C_8H_{18}	24	2
25	Циклопентан	C_5H_{10}	25	1

2.4. Закон Гесса

Многие химические реакции идут с поглощением или выделением теплоты. К самой реагирующей системе может также подводиться теплота или от нее отводиться. При тепловых расчетах таких реакций обычно используется первый закон термодинамики, который формулируется следующим образом: «Подведенная к системе теплота Q расходуется на изменение ее внутренней энергии ΔU и на совершение работы L ». Математическая запись закона будет иметь вид:

$$Q = \Delta U + L. \quad (2.22)$$

Внутренняя энергия тела обычно связана с другой термодинамической функцией – энтальпией H :

$$H = U + PV . \quad (2.23)$$

В процессах, идущих при постоянном давлении, получаемая или поглощаемая теплота будет соответствовать изменению энтальпии:

$$Q_P = H_2 - H_1 \equiv \Delta H , \quad (2.24)$$

где ΔH называют *тепловым эффектом* химической реакции при постоянном давлении P и температуре T .

Тогда, с учетом выражения (2.24), уравнение (1.1) может быть переписано как термохимическое уравнение:

$$\alpha A + \beta B \Leftrightarrow \gamma M + \delta N + \Delta H . \quad (2.25)$$

Согласно закону русского ученого Г.И. Гесса, тепловой эффект химической реакции не зависит от пути, по которому идет реакция. Этот закон формулируется следующим образом: *«Тепловой эффект реакции ΔH определяется только начальным и конечным состояниями системы и не зависит от пути перехода системы из одного состояния в другое»*.

Из закона Гесса следуют два вывода:

1. Тепловой эффект реакции $\Delta H_{\text{РЕАКЦ}}$ равен разности между суммой энтальпий образования продуктов реакции и суммой энтальпий образования исходных реагентов:

$$\Delta H_{\text{РЕАКЦ}} = \sum \Delta H_{\text{ПРОД}} - \sum \Delta H_{\text{ИСХ}} . \quad (2.26)$$

2. Тепловой эффект реакции равен сумме теплоты сгорания исходных веществ минус сумма теплоты сгорания продуктов реакции:

$$\Delta H_{\text{РЕАКЦ}} = \sum \Delta H_{\text{СГ.ИСХ}} - \sum \Delta H_{\text{СГ.ПРОД}} . \quad (2.27)$$

Следует отметить, что тепловые эффекты химических реакций изменяются с изменением температуры.

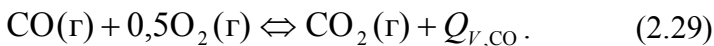
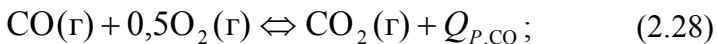
Значения тепловых эффектов обычно приводятся в справочной литературе [6–7] при стандартных условиях: $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па; $T = 293$ К. Для некоторых веществ они приведены в прил. 4.

При нахождении тепловых эффектов химических реакций необходимо знать состояние веществ, которые в них участвуют, поэтому они всегда обозначаются в виде: газообразное и парообразное состояние – Г; жидкое – Ж; твердое – Т.

Теплота образования вещества в жидком $\Delta H(\text{ж})$ и газообразном $\Delta H(\text{г})$ состоянии связаны с теплотой испарения $\Delta H_{\text{исп}}$ соотношением: $\Delta H(\text{ж}) = \Delta H(\text{г}) + \Delta H_{\text{исп}}$.

Пример 1. Определить теплоту сгорания 1 кг газа СО при постоянном давлении 0,1013 МПа и температуре 25 °С, если известно, что тепловой эффект реакции сгорания СО при постоянном объеме и той же температуре равен: $Q_{V,\text{CO}} = 281,9$ кДж/моль.

Решение. Запишем уравнения реакции сгорания СО при постоянном давлении P и постоянном объеме V :



В первом уравнении (2.28) теплота сгорания оксида углерода $Q_{P,\text{CO}}$ при постоянном давлении P соответствует тепловому эффекту реакции ΔH и равна количеству теплоты, выде-

лившейся при полном сгорании единицы массы (1 кг) СО при нормальных условиях ($P = 101300$ Па, $T = 273,15$ К).

Во втором уравнении (2.29), когда сгорание СО происходит при постоянном объеме V , теплота сгорания $Q_{V,CO}$ соответствует тепловому эффекту реакции и равна изменению внутренней энергии ΔU .

Для нахождения $Q_{P,CO}$ воспользуемся уравнением (2.28) и уравнением состояния для идеального газа:

$$P \cdot \Delta V = R \cdot \Delta n \cdot T, \quad (2.30)$$

где обозначено: $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; Δn – изменение числа моль газов при протекании реакции (2.28). Тогда из уравнения (2.22), с учетом уравнений (2.23) и (2.30), можно получить следующее соотношение:

$$Q_P = Q_V - R \Delta n T. \quad (2.31)$$

Горение газа СО происходит при постоянном давлении согласно формуле (2.28), поэтому число молей газов составит: $n_{CO} = 1$ моль, $n_{O_2} = 0,5$ моль и $n_{CO_2} = 1$ моль. Изменение числа молей в реакции будет равно:

$$\Delta n = n_{CO_2} - (n_{CO} + n_{O_2}) = 1 - (1 + 0,5) = -0,5.$$

Направляя полученное значение Δn в уравнение (2.31), получим:

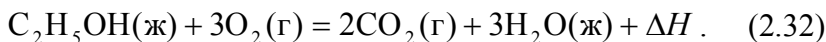
$$Q_{P,CO} = 281,9 - 8,314 \cdot (-0,5) \cdot 298 \cdot 10^{-3} = 283,2 \text{ кДж/моль}.$$

Теплота сгорания газа CO при постоянном давлении, кДж/кг, составит:

$$Q_p = \frac{Q_{p,\text{CO}}}{\mu_{\text{CO}}} = \frac{283,2}{28,01} = 10,1.$$

Пример 2. Определить теплоту сгорания этилового спирта (этанолa) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{ж})$ при стандартных условиях.

Решение. Запишем уравнение термохимической реакции сгорания этилового спирта в виде:



Теплоту образования этилового спирта определим по прил. 4:

$$\Delta H_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{ж})} = -234,8 \text{ кДж/моль}.$$

Из прил. 4 также выпишем теплоту образования диоксида углерода $\text{CO}_2(\text{г})$ и воды $\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$:

$$\Delta H_{\text{CO}_2(\text{г})} = -394,6 \text{ кДж/моль}; \quad \Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{ж})} = -285,8 \text{ кДж/моль}.$$

Заменяя в уравнении (2.30) формулу каждого химического элемента на тепловой эффект его образования, получим:

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{ж})} + 3\Delta H_{\text{O}_2} &= 2\Delta H_{\text{CO}_2(\text{г})} + 3\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{ж})} + \Delta H; \\ -234,8 + 3 \cdot 0 &= 2(-394,6) + 3(-285,8) + \Delta H. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения получим теплоту сгорания этилового спирта: $\Delta H = 1411,8 \text{ кДж/моль}$.

Вывод. При решении задач с использованием закона Гесса студенту следует помнить, что теплота сгорания может быть высшей или низшей, и учитывать это в своих расчетах при сравнении полученных результатов с табличными данными.

Задание 4 для самостоятельной работы

Задача 1. Используя закон Гесса, определить тепловой эффект химической реакции, указанной в табл. 2.2, при стандартных условиях, если известна только стандартная теплота образования веществ (прил. 4). Назовите вещества, которые участвуют в реакции.

Данные для решения задачи взять по своему варианту из табл. 2.2. Сделайте вывод по задаче.

Задача 2. Используя закон Гесса и стандартную теплоту образования веществ (прил. 4), определить теплоту сгорания первого химического элемента в реакции, которая приведена в табл. 2.2. Определить высшую и низшую теплоту сгорания данного вещества. Сравнить полученный результат с теплотой сгорания вещества, приведенной в прил. 4.

Данные для решения задачи взять по своему варианту из табл. 2.2. Сделайте вывод по задаче.

Таблица 2.2

Исходные данные для задания 4

№ варианта	Химическое уравнение реакции
1	$C_4H_{10}O(г) + H_2O(г) = C_4H_8O_2(ж) + 2H_2(г)$
2	$C_4H_8O(ж) + CO_2(г) = 2CO(г) + H_2O(г) + 3C(т) + 3H_2(г)$
3	$C_3H_4(ж) + C_4H_6(ж) = C_6H_6(г) + C(т) + 2H_2(г)$
4	$C_4H_6(ж) + 2H_2O(г) = C_4H_8O_2(г) + H_2(г)$

Окончание табл. 2.2

№ варианта	Химическое уравнение реакции
5	$C_7H_{16}(г) + CO(г) = 2C_4H_6(г) + H_2O(ж) + H_2(г)$
6	$C_6H_6O(ж) + H_2O(г) = C_4H_8O(г) + CO(г) + C(т)$
7	$C_2H_6O(г) + CO_2(г) = C_3H_6O(ж) + O_2(г)$
8	$C_3H_8O(ж) + C(т) = C_4H_6(г) + H_2(г)$
9	$C_2H_6O(ж) + 2CO(г) = 4C(т) + 3H_2O(ж)$
10	$C_3H_6O(г) + H_2(г) + CO(г) = C_4H_8O_2(г)$
11	$2CH_4O(ж) + H_2O(г) = C_2H_6O(г) + O_2(г) + 2H_2(г)$
12	$C_7H_{16}(г) + 2H_2O(г) = 2C_3H_6O(ж) + 4H_2(г) + C(т)$
13	$C_6H_{14}(ж) + C(т) + H_2O(г) = 2C_3H_4(г) + CO(г) + 4H_2(г)$
14	$C_4H_6(г) + CO_2(г) + 3O_2(г) = 5CO(г) + 3H_2O(ж)$
15	$C_5H_{10}O_2(ж) + 5H_2(г) + CO(г) = C_6H_{14}(г) + 3H_2O(г)$
16	$C_4H_{10}O(г) + CO(г) = C_5H_{10}O_2(ж)$
17	$C_6H_6(ж) + 3H_2O(г) = C_4H_8O(г) + 2CO(г) + 2H_2(г)$
18	$C_3H_6O(г) + 2H_2(г) + CO(г) = C_4H_6(ж) + 2H_2O(г)$
19	$C_2H_4O(ж) + 4C(т) + H_2(г) = C_6H_6(г)$
20	$C_4H_8O(г) + 8H_2(г) + 3CO(г) = C_7H_{16}(ж) + 4H_2O(г)$
21	$C_4H_8O_2(ж) + C_6H_6(ж) = C_5H_{10}O_2(ж) + 5C(т) + 2H_2(г)$
22	$C_2H_6O_2(г) + CO(г) = C_3H_6O(ж) + O_2(г)$
23	$C_4H_{10}O(г) + C(т) + H_2O(г) = C_5H_{10}O_2(ж) + H_2(г)$
24	$C_4H_6(г) + CO(г) + 6O_2(г) = 5CO_2(г) + 3H_2O(ж)$
25	$C_3H_4(ж) + C_4H_6(ж) + O_2(г) = C_5H_{10}O_2(ж) + 2C(т)$

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

3.1. Горение веществ и материалов

Основой процесса горения веществ и материалов являются химические реакции горючих элементов с окислителем. Процесс является нестационарным по интенсивности, кинетике и динамике протекания химических и физических процессов.

Горение, как правило, происходит в газовой фазе. При *гомогенном горении* компоненты горючей смеси находятся в газообразном или парообразном состоянии.

Если компоненты перемешаны, то происходит горение предварительно перемешанной смеси, которое иногда называют *кинетическим горением* (поскольку скорость горения в этом случае зависит только от кинетики химических превращений).

Если газообразные компоненты не перемешаны, то происходит *диффузионное горение* (например, при горении струи газа в воздухе).

Гетерогенное горение характеризуется всегда наличием раздела фаз: твердое вещество – газовый окислитель.

Горение различается по скорости распространения пламени, и в зависимости от этого фактора может быть:

- *дефлаграционным* (скорость пламени – в пределах до нескольких м/с);

- *взрывным* (часто его тоже относят к дефлаграционному, когда скорость пламени – до сотен м/с, но ниже скорости звука);

- *детонационным* (скорость пламени – порядка тысяч м/с).

Процессы *дефлаграционного горения* протекают сравнительно медленно и с переменной скоростью. *Детонационное горение* представляет собой такой вид, при котором ударная волна распространяется с максимально возможной и постоянной для данного вещества (смеси) и данных условий скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе.

3.2. Характеристика пламени и скорость его распространения

Напомним, что пламенем называется газообразная среда, в которой интенсивная химическая реакция приводит к свечению, выделению теплоты и ее саморазогреву. Узкая зона, в которой происходит интенсивный подогрев сгорающего газа и протекает химическая реакция, называется *фронтом пламени* (рис. 3.1).

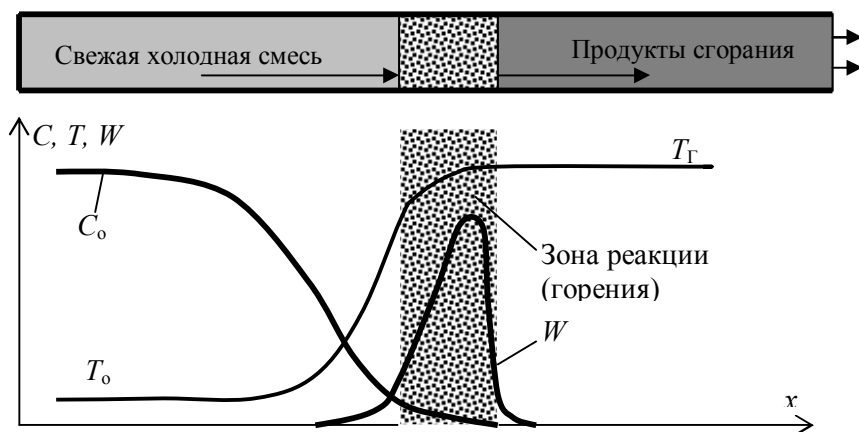


Рис. 3.1. Характер горения газовой смеси в трубе: C – концентрация горючего газа в смеси; T – изменение температуры; W – скорость реакции

Нормальное горение – распространение пламени в неподвижных газах или в ламинарном потоке. При отсутствии внешних воздействий на область горения скорость распространения пламени по нормали к точке фронта горения называют *нормальной скоростью горения* U_H . Для некоторых газов она приведена в прил. 5. Данная скорость необходима, когда рассчитывают режим проскока пламени.

Нормальная скорость распространения пламени U_H и линейная скорость горения в трубке w связаны соотношением

$$U_H = w \frac{\pi R^2}{S}, \quad (3.1)$$

где R – внутренний радиус трубки, м; S – площадь поверхности искривленного фронта пламени, м^2 .

Для расчета устойчивого горения газовой смеси в горелках необходимо знать *максимальную нормальную скорость распространения пламени* $U_{H,\max}$. Она необходима, когда рассчитывают режим отрыва пламени.

Для смеси сложного газа (например, природного) с воздухом максимальная нормальная скорость распространения пламени, м/с, может быть определена по формуле:

$$U_{H,\max} = \frac{r_1 U_{1H,\max} + r_2 U_{2H,\max} + \dots + r_n U_{nH,\max}}{r_1 + r_2 + \dots + r_n}, \quad (3.2)$$

где $U_{1H,\max}, U_{2H,\max}, \dots, U_{nH,\max}$ – максимальные нормальные скорости распространения пламени компонентов сложного газа в смеси с воздухом, м/с; $r_1, r_2, \dots, r_n$ – содержание отдельных компонентов в сложном газе по объему, %.

Значения максимальной нормальной скорости распространения пламени для газов $U_{H,\max}$ приводятся в литературе [2, 6, 7], для некоторых газов они приведены в прил. 6.

3.3. Нормальное (ламинарное) горение газа на примере бунзеновской горелки

Механизм стационарного горения газовой смеси в бунзеновской горелке показан на рис. 3.2.

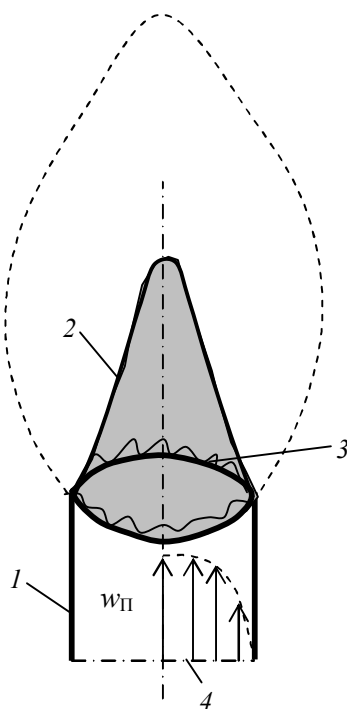


Рис. 3.2. Фронт горения газовой смеси при ламинарном режиме движения: 1 — горелка; 2 — внутренний конус; 3 — огневая кромка канала горелки; 4 — поток газовой смеси

При ламинарном течении газа в подводящей трубе горелки распределение скоростей по сечению дается согласно параболическому закону Пуазейля:

$$w(r) = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (3.3)$$

где $w(r)$ – скорость потока газа на расстоянии r от его оси в трубе; R – внутренний радиус трубы горелки; w_0 – максимальная скорость движения газа в трубе на оси, при $r = 0$.

Для приближенных в практике расчетов усредненная нормальная скорость распространения пламени $\overline{U}_H$, м/с, определяется по формуле:

$$\overline{U}_H = \frac{V_{\text{CM}}}{S}, \quad (3.4)$$

где V_{CM} – объем проходящей через горелку газозвоздушной смеси, м³/с; S – общая площадь поверхности конусного фронта пламени, м².

При инженерных расчетах для упрощения конусный фронт пламени часто принимают правильной геометрической формы, как показано на рис. 3.3.

Объемный расход газозвоздушной смеси, м³/с, проходящей через горелку с диаметром в устье $2R$, можно записать в следующем виде:

$$V_{\text{CM}} = \pi R^2 \overline{w}_n, \quad (3.5)$$

где $\overline{w}_n$ – средняя скорость потока газозвоздушной смеси в устье горелки, м/с; R – радиус устья горелки (основания конусного фронта пламени), м.

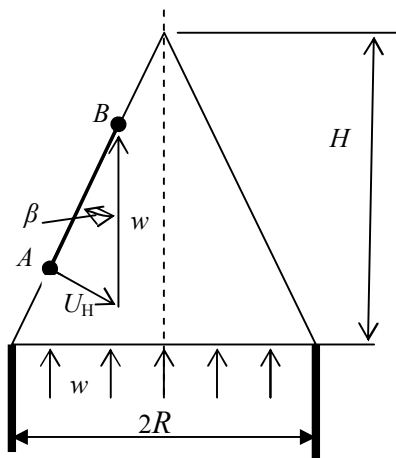


Рис. 3.3. Фронт пламени газовой горелки

Поступивший в горелку газ сгорает в конусном факеле с площадью поверхности фронта пламени, м^2 ,

$$S = \pi R \sqrt{H^2 + R^2}, \quad (3.6)$$

где H – высота конусного фронта пламени, м.

Задание 5 для самостоятельной работы

Смесь сложного газа с воздухом сгорает в бунзеновской горелке. Внутренний диаметр устья горелки d . Определить максимальную скорость потока газозвоздушной смеси в устье горелки, чтобы не произошло отрыва пламени (когда пламя отрывается от устья горелки). Рассчитать максимальный объемный расход газозвоздушной смеси через горелку. Определить минималь-

ную скорость потока газозвоздушной смеси в устье горелки, чтобы не произошло проскока пламени (когда пламя заходит в устье горелки). Рассчитать минимальный объемный расход газозвоздушной смеси через горелку. Данные для расчетов взять по своему варианту из табл. 3.1.

Считается, что газозвоздушная смесь содержит кислород в количестве, необходимом для создания максимальных и минимальных скоростей горения. При расчетах принять, что факел при максимальном расходе газовой смеси имеет геометрически правильную форму конуса, а его длина равна двум диаметрам устья горелки. Изобразить в масштабе устье горелки и форму пламени с соответствующими пояснениями.

Таблица 3.1

Исходные данные для задания 5

№ варианта	Состав сложного газа			Объемное содержание газов в сложном газе, %			Диаметр устья горелки d , мм
	1	2	3	1	2	3	
1	Метан	Водород	Бутилен	10	30	60	20
2	Этан	Ацетилен	Пропилен	40	10	50	30
3	Пропан	Этилен	<i>n</i> -Бутан	20	50	30	40
4	Бутилен	Метан	Этилен	60	30	10	50
5	Водород	<i>n</i> -Бутан	Пропилен	50	20	30	60
6	Ацетилен	Этан	Бутилен	30	30	40	70
7	<i>n</i> -Бутан	Пропилен	Метан	70	15	15	80
8	Этан	Этилен	Пропан	80	10	10	90
9	Бутилен	Ацетилен	Водород	20	40	40	100
10	Метан	Этилен	<i>n</i> -Бутан	60	10	30	110
11	Пропан	Этан	Бутилен	50	25	25	120
12	<i>n</i> -Бутан	Водород	Этилен	30	40	30	130
13	Этан	Этилен	Метан	70	10	20	140
14	Этилен	Ацетилен	Водород	80	5	15	150
15	Бутилен	Этан	<i>n</i> -Бутан	20	30	50	160
16	Пропан	Метан	Пропилен	10	40	50	80

№ вари- анта	Состав сложного газа			Объемное со- держание газов в сложном газе, %			Диаметр устья горелки d , мм
	1	2	3	1	2	3	
17	Ацетилен	Этилен	Бутилен	40	20	40	90
18	Этан	<i>n</i> -Бутан	Водород	60	20	20	100
19	Метан	Пропилен	Пропан	50	30	20	110
20	Ацетилен	Бутилен	Этан	30	30	40	120
21	Этилен	Метан	Водород	10	60	30	20
22	Пропан	Этан	<i>n</i> -Бутан	30	50	20	30
23	Бутилен	Ацетилен	Пропан	40	30	30	40
24	Пропилен	Водород	Этилен	15	70	15	50
25	Метан	Бутилен	Этан	10	80	10	60

3.4. Тепловая теория самовоспламенения Н.Н. Семенова

При нагреве смеси горючего газа с воздухом в ней начинают протекать экзотермические химические процессы, приводящие к повышению ее температуры и самовоспламенению. Эти процессы объясняет тепловая теория самовоспламенения русского ученого Н.Н. Семенова. Он первым объяснил поведение газозвушной смеси при ее нагреве. Тепловую теорию самовоспламенения газозвушной смеси удобно проиллюстрировать на рис. 3.4.

При умеренном внешнем нагреве до температуры t_1 газозвушной смеси (линия 1 – кривая нагрева), находящейся в закрытом сосуде, в ней не происходит химических реакций и изменений, которые были бы заметны наблюдателю. При отключении внешнего нагрева сосуда газовая смесь начинает охлаждаться и ее температура падает.

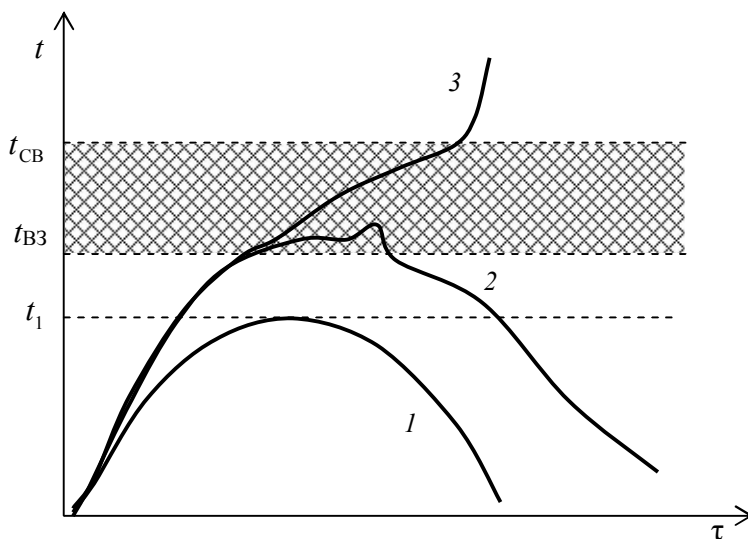


Рис. 3.4. Схема начала процесса горения вещества во времени

При более сильном внешнем нагреве сосуда с газозвдушной смесью до температуры самовозгорания t_{B3} в этой смеси начинаются химические экзотермические превращения, т. е. начинает выделяться теплота химической реакции. Если теперь прекратить внешний нагрев газовой смеси, то дальнейшее развитие процесса может пойти по одному из двух направлений:

1. Если выделяющейся в газозвдушной смеси теплоты химической реакции будет недостаточно для покрытия тепловых потерь от сосуда в окружающую среду, то химическая реакция прекратится (линия 2), и в дальнейшем произойдет охлаждение газовой смеси и понижение температуры.

2. Если выделяющейся в газозвдушной смеси теплоты химической реакции будет достаточно для покрытия тепловых потерь от сосуда в окружающую среду, то химическая реакция

будет продолжена с выделением большого количества теплоты. Это приведет к разогреву газовой смеси до температуры самовоспламенения t_{CB} . Произойдет воспламенение смеси (линия 3), и реакция будет носить взрывной характер.

Выделяющаяся внутри сосуда в смеси газов теплота $Q_{\text{ТВ}}$ может быть описана выражением:

$$Q_{\text{ТВ}} = W \cdot Q \cdot V, \quad (3.7)$$

где Q – тепловой эффект химической реакции; V – объем сосуда; W – скорость химической реакции, определяемая по закону Аррениуса, описывается уравнением вида:

$$W = C^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (3.8)$$

Здесь обозначено: C – концентрация вещества; n – порядок реакции; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа.

Тепловой поток от газовой смеси к внутренним стенкам сосуда и далее в окружающую среду описывается законом конвективного теплообмена Ньютона – Рихмана:

$$Q_{\text{от}} = \alpha F (T - T_0), \quad (3.9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от газовой реагирующей смеси к стенкам сосуда; F – площадь поверхности внутренних стенок сосуда, через которые происходит теплообмен от газов в окружающую среду; T_0 – температура окружающей среды.

Как видно по рис. 3.4, в точке, где кривая 3 достигает температуры самовоспламенения t_{CB} , наблюдается равенство теп-

лопоступлений от химической реакции и тепловых потерь от газовой смеси к стенкам сосуда (или окружающую среду), т. е. имеется равенство

$$Q_{\text{ТВ}} = Q_{\text{ОТ}} \cdot \quad (3.10)$$

Направляя выражения (3.7) и (3.9) в уравнение (3.10), получим:

$$\alpha \frac{F}{V} (T_{\text{CB}} - T_o) = Q \cdot W(T_{\text{CB}}), \quad (3.11)$$

где абсолютные температуры самовоспламенения и окружающей среды связаны соотношениями:

$$T_{\text{CB}} = t_{\text{CB}} + 273,15; \quad (3.12)$$

$$T_o = t_o + 273,15. \quad (3.13)$$

Уравнение (3.11) характеризует предельные (критические) условия воспламенения газовой смеси, поэтому их называют *критическими условиями самовоспламенения*.

Установлено, что существует критический диаметр трубки с газовоздушной смесью, при котором горение прекращается, т. к. становятся слишком большими удельные тепловые потери в окружающую среду от поверхности трубки.

Приближенное значение критического диаметра трубки $d_{\text{кр}}$, м, при котором распространение пламени в ней становится невозможным, может быть определено по формуле

$$d_{\text{кр}} = 46 \frac{a_{\text{CM}}}{U_{\text{H}}}, \quad (3.14)$$

где $a_{\text{см}}$ – коэффициент температуропроводности газовой смеси, $\text{м}^2/\text{с}$; $U_{\text{н}}$ – нормальная скорость распространения пламени по газозвоздушной смеси, $\text{м}/\text{с}$.

Определяющее влияние на процесс горения оказывает содержание горючего газа в окислителе. В связи с этим в такой смеси имеется область воспламенения, ограниченная нижним и верхним концентрационными пределами. Схематично эта область показана на рис. 3.5.

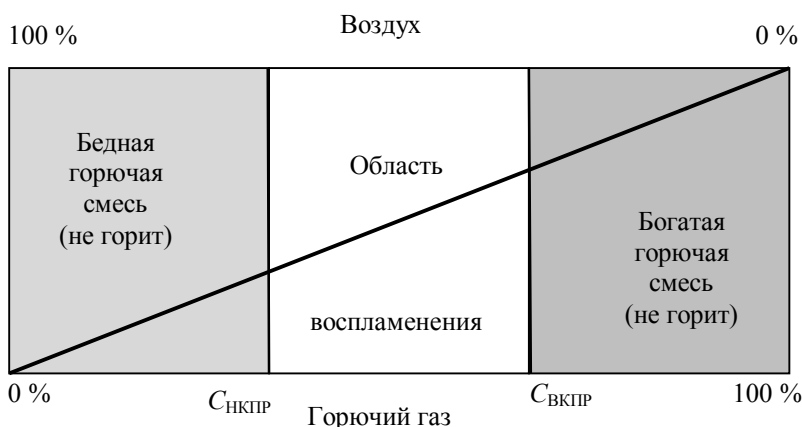


Рис. 3.5. Схема расположения концентрационных пределов воспламенения

Под *нижним концентрационным пределом воспламенения* (НКПР) понимают минимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, свыше которого возможно воспламенение и распространение пламени по газозвоздушной смеси на любое расстояние от источника зажигания.

Под *верхним концентрационным пределом воспламенения* (ВКПР) понимают максимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, свыше которого

распространение пламени по смеси от источника зажигания невозможно.

Значения пределов воспламенения некоторых горючих газов и паров легковоспламеняющихся жидкостей в смеси с воздухом приведены в прил. 8.

Пределы воспламенения технических газов, состоящих из смеси различных горючих компонентов и не содержащих балластных примесей, можно определить по правилу ученого Ле Шателье [1,6]:

– для нижнего концентрационного предела воспламенения

$$C_H = \frac{100}{\frac{r_1}{C_{1.H}} + \frac{r_2}{C_{2.H}} + \dots + \frac{r_n}{C_{n.H}}} ; \quad (3.15)$$

– для верхнего концентрационного предела воспламенения

$$C_B = \frac{100}{\frac{r_1}{C_{1.B}} + \frac{r_2}{C_{2.B}} + \dots + \frac{r_n}{C_{n.B}}} , \quad (3.16)$$

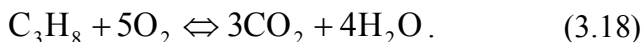
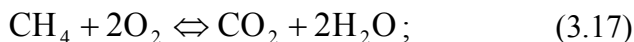
где C_H и C_B – нижний или верхний концентрационные пределы воспламенения газовой смеси, состоящей из n горючих компонентов, %; $r_1, r_2, \dots, r_n$ – содержание горючих компонентов в газовой смеси, %; $C_{1.H}, C_{2.H}, \dots, C_{n.H}, C_{1.B}, C_{2.B}, \dots, C_{n.B}$ – нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения 1, 2, ..., n газов, которые могут быть взяты из прил. 7.

Пример 1. Смесь двухкомпонентного газа с воздухом со стехиометрическим составом находится в трубке диаметром $d = 0,1$ м. Состав газа по объему: $\text{CH}_4 = 40\%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 60\%$. Определить нормальную скорость распространения пламени.

Найти критический диаметр трубки, при котором горение не будет поддерживаться, если температура горения 1000 °С.

Рассчитать среднюю нормальную скорость распространения пламени. Сколько смеси по объему сгорает за 1 с?

Решение. Запишем реакцию взаимодействия газов с кислородом воздуха в виде:



В соответствии с законом Дальтона, каждый газ в смеси ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси. Поэтому определим нормальную скорость распространения пламени в трубке, м/с, по формуле (3.2):

$$U_{\text{н}} = \frac{r_{\text{CH}_4} U_{\text{CH}_4} + r_{\text{C}_3\text{H}_8} U_{\text{C}_3\text{H}_8}}{r_{\text{CH}_4} + r_{\text{C}_3\text{H}_8}} = \frac{40 \cdot 0,38 + 60 \cdot 0,31}{40 + 60} = 0,338. \quad (3.19)$$

Для того чтобы определить критический диаметр трубки по формуле (3.14), когда горение внутри нее невозможно, необходимо знать коэффициент температуропроводности газовой смеси $a_{\text{см}}$. Этот коэффициент для некоторых газов приводится в справочной литературе в зависимости от температуры. Поскольку имеем смесь газов, то для упрощения решения примем этот коэффициент как для сухого воздуха при температуре газовой смеси 1000 °С. Коэффициент температуропроводности возьмем из справочных данных: $a_{\text{см}} = 245,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Рассчитаем критический диаметр трубки, м, при котором пламя не сможет распространяться вдоль нее, по формуле (3.14):

$$d_{\text{кр}} = \frac{46 a_{\text{CM}}}{U_{\text{H}}} = \frac{46 \cdot 245,9 \cdot 10^{-6}}{0,338} = 0,0335. \quad (3.20)$$

Если предположить, что при горении газозвушной смеси в трубке форма пламени будет плоской (реально фронт пламени будет искривлен), то средняя скорость фронта пламени будет соответствовать нормальной скорости распространения пламени, т. е.

$$w_{\text{П}} = U_{\text{H}} \equiv 0,338 \text{ м/с.}$$

Тогда по формуле (3.5) можно определить, какой объем газозвушной смеси сгорит за 1 секунду, м³:

$$V_{\text{CM}} = 3,14 \cdot 0,05^2 \cdot 0,338 = 3,05 \cdot 10^{-3}.$$

Пример 2. Метан с воздухом в стехиометрическом составе находятся в закрытом сферическом сосуде радиусом $R = 0,3$ м. Коэффициент теплоотдачи от стенок сосуда в окружающую среду $\alpha = 25$ Вт/(м²К). Температура окружающей среды составляет 20 °С. Определить, при каком тепловыделении в реакции наступят критические условия самовоспламенения.

Решение. По прил. 6 найдем температуру самовоспламенения метана: $T_{\text{CB}} = 810$ К.

Определим по формуле (3.9), сколько теплоты $Q_{\text{от}}$, Вт, будет теряться от стенок сосуда за 1 с в окружающую среду:

$$Q_{\text{от}} = \alpha F (T_{\text{CB}} - T_0) = 25 \cdot 0,283 (810 - 293) = 3660, \quad (3.21)$$

где площадь поверхности шара

$$F = 4 \pi R^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,15^2 = 0,283 \text{ м}^2,$$

а температуры $T_{\text{св}}$ и T_0 взяты в градусах К.

Следовательно, для воспламенения метана внутри сосуда при температуре 537°C при заданных условиях внешнего теплообмена в окружающую среду, необходимо, чтобы при протекании химической реакции был достигнут уровень тепловыделения в 3660 Вт , т. е. когда $Q_{\text{от}} = Q_{\text{тв}}$.

Пример 3. Из-за разгерметизации оборудования в цех покраски размерами $20 \times 8 \times 4 \text{ м}^3$ вылилось 5 кг толуола (C_7H_8), который быстро испарился. Температура в помещении составляет 20°C , давление 750 мм рт. ст.

Определить концентрацию паров толуола в воздухе помещения, если считать, что пар равномерно распределился по всему его объему. Взрывоопасной ли получилась смесь?

Решение. Определим свободный объем помещения, м^3 , незанятый оборудованием и мебелью, по формуле:

$$V_{\text{п}} = 0,8 V_{\text{геом}} = 0,8 \cdot 20 \cdot 8 \cdot 4 = 512, \quad (3.22)$$

где $V_{\text{геом}}$ – геометрический объем помещения, м^3 ; $0,8$ – коэффициент, учитывающий, что часть объема помещения занята оборудованием.

Вычислим по уравнению состояния для идеальных газов приведенный объем в помещении, м^3 , который занял испарившийся толуол:

$$V_{\text{т}} = \frac{m_{\text{т}} R T}{\mu_{\text{т}} P} = \frac{5 \cdot 8314 \cdot 293}{92,14 \cdot 10^5} = 1,32, \quad (3.23)$$

где $m_{\text{т}}$ – масса толуола, кг ; $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная; T и P – абсолютные давление

и температура газовой смеси в К и Па, соответственно; μ_T – молекулярная масса толуола; $\mu_T = 92,14$ кг/кмоль.

Объемные доли газов, %, в помещении составят:

– для толуола

$$r_T = \frac{V_T}{V_{\Pi}} 100 = \frac{1,32}{512} 100 = 0,26 ;$$

– для воздуха

$$r_B = 100 - r_T = 100 - 0,26 = 99,74 .$$

Концентрация толуола в воздухе помещения будет $C_T = r_T = 0,26$ %. Концентрационные пределы воспламенения толуола по прил. 7 составляют: нижний – $C_{\text{НКПР}} = 1,3$ %, верхний – $C_{\text{ВКПР}} = 6,0$ %. Следовательно, т. к. $C_T < C_{\text{НКПР}}$, то образовалась бедная горючая смесь, которая поддерживать горение не будет.

Задание 6 для самостоятельной работы

Задача 1. Горючий газ с воздухом в стехиометрическом составе находятся в закрытом сферическом сосуде радиусом R . Коэффициент теплоотдачи от стенок сосуда в окружающую среду α . Температура окружающей среды составляет T_0 К. Тепловыделение в реакции, когда наступают критические условия самовоспламенения, составляет 10 кВт. Чему равен радиус R сосуда с газозвушной смесью?

Данные для решения задачи взять из табл. 3.2 по своему варианту. Сделать выводы по задаче.

Задача 2. В результате разгерметизации оборудования и аварийного выброса горючий газ попадает в помещение цеха и образует с воздухом взрывоопасную газовую смесь. Объем помещения: A – длина, B – ширина, H – высота помещения. Масса поступившего в помещение газа составляет m кг. Температура воздуха в помещении t_p , давление $P_0 = 101,3$ кПа.

Определить концентрацию горючего газа в воздухе помещения, если считать, что газ равномерно распределился по всему объему помещения.

Сравнить полученное значение концентрации газа в воздухе с нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения газозооушной смеси. Сделать выводы по задаче.

При каких массах поступившего в помещение газа будут достигнуты нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения?

Данные для решения задачи взять из табл. 3.3 по своему варианту.

Задача 3. В помещение, где находится горючий газ с воздухом, в соответствии с данными из предыдущей задачи 2, поступает еще и газ этилен в количестве 30 кг.

Определить концентрацию горючих газов в воздухе помещения, если считать, что газы равномерно распределились по всему его объему.

Рассчитать нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения образовавшейся газозооушной смеси.

Сделать выводы по задаче.

Таблица 3.2

Исходные данные для задания 6 (задача 1)

№ варианта	Горючий газ	Коэффициент теплоотдачи от стенок сосуда в окружающую среду α , Вт/(м ² К)	Температура воздуха в помещении T_o , К
1	Ацетилен	10	303
2	n-Бутан	15	298
3	Водород	20	293
4	Метан	25	287
5	Оксид углерода	30	283
6	Пропан	35	278
7	Бутилен	40	273
8	Этан	45	268
9	Этилен	50	263
10	Пропилен	55	258
11	Ацетилен	60	253
12	n-Бутан	65	303
13	Водород	70	298
14	Метан	75	293
15	Оксид углерода	80	287
16	Пропан	85	283
17	Бутилен	90	278
18	Этан	95	273
19	Этилен	20	268
20	Пропилен	30	263
21	Ацетилен	40	258
22	n-Бутан	50	253
23	Водород	60	303
24	Метан	70	298
25	Оксид углерода	80	293

Таблица 3.3

Исходные данные для задания 6 (задачи 2 и 3)

№ варианта	Горючий газ	Масса газа m , поступившего в помещение, кг	Температура воздуха в помещении t_p , °C	Размеры помещения, м		
				A	B	H
1	Ацетилен	50	22	20	8	5
2	Бутан	100	14	100	20	8
3	Водород	90	30	150	24	12
4	Метан	20	15	40	10	6
5	Оксид углерода	40	26	80	24	8
6	Пропан	30	18	120	24	10
7	Сероводород	70	12	90	36	12
8	Этан	60	29	60	24	8
9	Ацетилен	30	19	50	24	10
10	Бутан	20	11	80	36	16
11	Водород	130	21	110	36	10
12	Метан	120	13	70	24	8
13	Оксид углерода	60	24	80	36	12
14	Пропан	40	16	60	18	8
15	Сероводород	50	9	100	36	16
16	Этан	70	22	90	24	12
17	Ацетилен	120	13	140	36	16
18	Бутан	30	19	50	24	12
19	Водород	50	26	80	36	16
20	Метан	20	8	70	24	12
21	Оксид углерода	100	10	90	20	6
22	Пропан	90	16	60	18	5
23	Сероводород	110	21	50	14	8
24	Этан	70	24	100	28	10
25	Ацетилен	80	12	80	24	7

4. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА В ТОПОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Организация наиболее эффективного процесса сжигания топлива в топочном устройстве невозможна без обоснования параметров этого процесса.

Характерной особенностью процессов горения является большая скорость протекания химических реакций, что отличает их от большинства других процессов, существенных для химических технологий. Большинство твердых и жидких горючих компонентов среды до сгорания предварительно либо испаряются, либо разлагаются с частичным превращением в летучие вещества, сгорающие затем гомогенно. Лишь нелетучие горючие, например кокс, твердые продукты пиролиза угля, металлы, сгорают гетерогенно. Сам процесс горения горючих веществ в топочных устройствах всегда связан с их подготовкой перед сжиганием.

4.1. Топочные устройства

В настоящее время на производстве и в быту используются сотни различных топочных устройств. Для простоты мы рассмотрим из них только два типа:

- 1) устройства, работающие под разрежением в топочном пространстве;
- 2) устройства, работающие под давлением в топочном пространстве.

Топочные устройства, работающие под разрежением в топочном пространстве, получили наиболее широкое применение, например работа печи в деревенском доме. Принцип работы такого промышленного устройства рассмотрим на схеме, показанной на рис. 4.1.

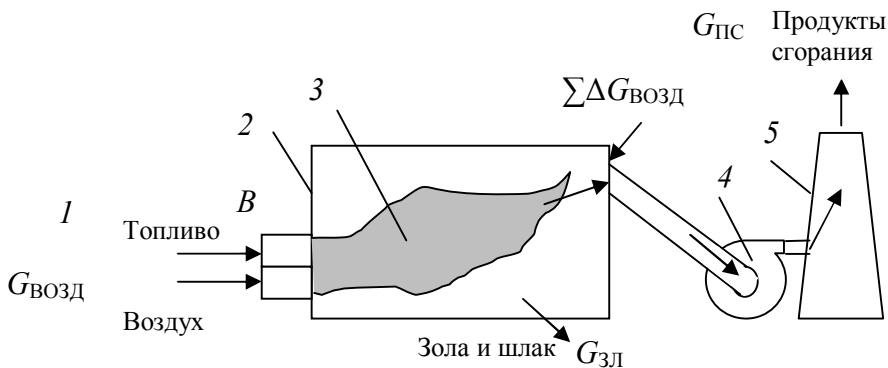


Рис. 4.1. Принципиальная схема топочного устройства, работающего под разрежением: 1 – подача топлива и воздуха на горение; 2 – топочная камера; 3 – факел; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба

Топливо в количестве B и воздух в количестве $G_{\text{возд}}$ подаются в топочную камеру 2 для горения. При горении они образуют факел 3. Образовавшиеся продукты сгорания через канал в верхней части топочной камеры отсасываются дымососом 4 и подаются в дымовую трубу 5. Из дымовой трубы продукты сгорания в количестве $G_{\text{пс}}$ выбрасываются в атмосферу. Зола и шлак в количестве $G_{\text{зл}}$ удаляются из топочной камеры снизу, а летучая зола, уносимая продуктами сгорания в дымовую трубу, выбрасывается в атмосферу. При такой конструкции топочного устройства топочная камера и газозадушный тракт до дымососа 4 находятся под разрежением, т. е. в них давление ниже атмосферного. Это позволяет не допустить выброс продуктов сгорания в помещение, что обеспечивает в последнем высокие гигиенические параметры воздуха. Вместе с этим, при пониженном давлении в топочной камере и газовом тракте, через имеющиеся в них неплотности, будет происходить подсос наружного

воздуха $\Delta G_{\text{возд}}$, что ухудшает эффективность работы топочного устройства и снижает коэффициент полезного действия.

Схема второго типа топочного устройства, работающего под давлением в топочном пространстве, аналогична схеме на рис. 4.1. При этом в схеме отсутствует дымосос 4, а воздух на горение в топочную камеру подается под давлением вентилятором, из-за чего возникает повышенное давление внутри топочной камеры по отношению к атмосферному давлению. В качестве недостатка работы такой схемы можно отметить тот факт, что при наличии неплотностей в топочной камере и газовом тракте часть продуктов сгорания будет вытеснена в помещение, что будет отрицательно сказываться на работе персонала.

4.2. Материальный баланс процесса горения

При горении топлива расходуется кислород воздуха и образуются продукты сгорания и зола. Материальный баланс процесса горения обычно проводят при тепловых расчетах топочных устройств с целью уточнения их технико-экономических характеристик. При этом баланс процесса горения в топочном устройстве составляется для газовоздушного тракта с учетом расходов воздуха $G_{\text{возд}}$ и топлива B , идущих на горение. При расчете учитываются присосы воздуха в газовоздушном тракте $\sum \Delta G_{\text{возд}}$, количество образующихся продуктов сгорания $G_{\text{пс}}$, твердого шлака и золы $\sum G_{\text{зл}}$. Расчет расходов веществ ведут обычно на единицу времени.

Для топочного устройства, работающего под разрежением и показанного на рис. 4.1, материальный баланс по газовоздушному тракту можно записать в виде:

$$B + G_{\text{возд}} + \sum \Delta G_{\text{возд}} = G_{\text{пс}} + \sum G_{\text{зл}} . \quad (4.1)$$

В случае, когда процесс горения в топочном устройстве идет под избыточным давлением, материальный баланс по газозвоздушному тракту можно записать в виде:

$$B + G_{\text{возд}} - \sum \Delta G_{\text{возд}} = G_{\text{пс}} + \sum G_{\text{зл}} , \quad (4.2)$$

где $\sum \Delta G_{\text{возд}}$ – количество воздуха, вытесненного из топочной камеры и газозвоздушного тракта через неплотности за счет избыточного давления.

Расчет материального баланса обычно проводят на единицу используемого топлива, т. е. на 1 кг твердого или жидкого топлива, или 1 нм³ газообразного топлива (1 м³ газообразного топлива, взятый при нормальных физических условиях: $t = 0$ °С; $P = 101300$ Па). С учетом этого выражение (4.1) для материального баланса топочного устройства будет выглядеть следующим образом:

$$1 + \frac{G_{\text{возд}}}{B} + \frac{\sum \Delta G_{\text{возд}}}{B} = \frac{G_{\text{пс}}}{B} + \frac{\sum G_{\text{зл}}}{B} . \quad (4.3)$$

Для осуществления процесса горения в топочном устройстве требуется кислород, которого в атмосферном воздухе содержится около 21 % по объему. Если предположить, что на горение единицы топлива (1 кг или 1 нм³) для его полного окисления требуется определенное количество кислорода, который содержится в объеме воздуха V^o , то его называют *теоретически необходимым объемом воздуха для горения*. При сжигании твердого или жидкого топлива этот объем воздуха, м³/кг, может быть найден на рабочую массу (верхний индекс Р) топлива по формуле:

$$V^o = 0,0889(C^P + 0,375S_{\text{ор}}^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P. \quad (4.4)$$

Природный газ, подаваемый потребителю, обычно содержит очень мало влаги. Поэтому при его сжигании расчет ведется на сухую массу, $\text{м}^3/\text{нм}^3$, по формуле:

$$V^o = 0,0476[0,5 (CO + H) + 1,5 H_2S + \Sigma (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O], \quad (4.5)$$

где $C, S, H, O, CO, H_2S, C_m H_n$ – процентное содержание (по массе для твердого и жидкого топлива и по объему для газообразного топлива) в топливе соответствующих элементов и газов: углерода, серы, водорода, кислорода, оксида углерода, сероводорода, углеводородов; m, n – число атомов углерода и водорода в углеводородном соединении.

Если подавать на горение только теоретически необходимый объем воздуха V^o , то топливо в топочном устройстве из-за несовершенства процесса горения сжечь полностью не удастся. Поэтому для полного сгорания топлива в топочном устройстве воздуха всегда подают больше теоретического. Количество действительно поданного в топочное устройство воздуха $V_{\text{возд}}$, отнесенное к теоретически необходимому V^o , называют коэффициентом избытка воздуха в топке:

$$\alpha_T = \frac{V_{\text{возд}}}{V^o}. \quad (4.6)$$

Чем более совершенно горелочное устройство и сама топка, чем меньше размеры частиц топлива и более правильно организован процесс сжигания топлива, тем меньше нужно подавать избыточного воздуха на горение. В современных топочных

устройствах коэффициент избытка воздуха α_T обычно не превышает значений 1,05–1,1 для газообразного и жидкого топлива и 1,1–1,6 – для твердого топлива.

Если топочное устройство и газовый тракт для продуктов сгорания работают под разрежением, то будут наблюдаться присосы воздуха $\Delta V_{\text{прис}}$ за счет созданного в них разрежения. Величина присосов воздуха определяется как доля по отношению к V^o :

$$\sum \Delta \alpha = \frac{\sum \Delta V_{\text{прис}}}{V^o}. \quad (4.7)$$

Значения присосов воздуха для различных элементов газохода при тепловом расчете могут быть приняты по справочной литературе.

По мере движения продуктов сгорания по газовому тракту, их количество может возрасти на величину присосов $\sum \Delta \alpha$, а на выходе из теплового агрегата коэффициент избытка воздуха для уходящих дымовых газов становится равным α_{yx} :

$$\alpha_{yx} = \alpha_T + \sum \Delta \alpha. \quad (4.8)$$

При расчетах топочных устройств требуется знать количество и состав образующихся при горении дымовых газов. Это нужно для правильного расчета теплопереноса к поверхностям нагрева, правильного подбора размеров газоходов и скорости движения газов, выбора тягодутьевых устройств и т. п. Расчеты количества продуктов сгорания также ведутся на единицу сжигаемого топлива (1 кг или 1 м³), исходя из уравнения материального баланса процесса горения (4.3).

Теоретические объемы азота V_N^0 , водяных паров $V_{H_2O}^0$, трехатомных газов V_{RO_2} и продуктов сгорания V_Γ^0 при $\alpha = 1$ рассчитывают по формулам:

– для твердого и жидкого топлива на рабочую массу, $\text{м}^3/\text{кг}$,

$$V_N^0 = 0,79 V^0 + 0,008 N^P; \quad (4.9)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 H^P + 0,0124 W^P + 0,0161 V^0; \quad (4.10)$$

$$V_{RO_2} = 0,01866(C^P + 0,375 S_{OP+K}^P); \quad (4.11)$$

$$V_\Gamma^0 = V_N^0 + V_{H_2O}^0 + V_{RO_2}; \quad (4.12)$$

– для газообразного топлива на сухую массу, $\text{м}^3/\text{нм}^3$,

$$V_N^0 = 0,79 V^0 + 0,01 N; \quad (4.13)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 (0,5 \Sigma n C_m H_n + H + H_2S + 0,124 d + 1,61 V^0); \quad (4.14)$$

$$V_{RO_2} = 0,01 (\Sigma m C_m H_n + CO_2 + CO + H_2S); \quad (4.15)$$

$$V_\Gamma^0 = V_N^0 + V_{H_2O}^0 + V_{RO_2}, \quad (4.16)$$

где S_{OP+K}^P – содержание органической и колчеданной серы в твердом и жидком топливе, %; d – влагосодержание газообразного топлива, отнесенное к 1 м^3 сухого газа, $\text{г}/\text{м}^3$: при расчетах принимают: $d = 10 \text{ г}/\text{м}^3$.

При $\alpha > 1$ объем продуктов сгорания будет больше на величину количества избыточного воздуха $(\alpha - 1)V^0$ и на долю заключенных в нем водяных паров $0,016(\alpha - 1)V^0$, т. е.

$$V_\Gamma = V_\Gamma^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0. \quad (4.17)$$

Концентрацию золы $\mu_{\text{зл}}$ в продуктах сгорания, г/м^3 , при сжигании твердого или жидкого топлива можно определить по формуле

$$\mu_{\text{зл}} = 10 \frac{A^{\text{P}} a_{\text{уН}}}{V_{\Gamma}}, \quad (4.18)$$

где $a_{\text{уН}}$ – доля уноса золы топлива с дымовыми газами, принимаемая по справочной литературе в зависимости от типа топки и вида топлива; A^{P} – содержание шлака и золы в топливе на рабочую массу, %.

Пример 1. Рассчитать необходимое количество воздуха на горение кускового торфа в топочном устройстве. Расход торфа составляет 2 кг/с, коэффициент избытка воздуха, подаваемого в топку, равен 1,4, КПД топочного устройства – 70 %, очистных сооружений нет. Какая тепловая полезная мощность топочного устройства? Какой объем дымовых газов образуется за 1 с? Сколько образуется шлака и золы?

Решение. По прил. 2 выпишем характеристики нашего топлива – кускового торфа: $W^{\text{P}} = 48,0 \%$; $A^{\text{P}} = 7,0 \%$; $S^{\text{P}} = 0,1 \%$; $C^{\text{P}} = 25,2 \%$; $H^{\text{P}} = 2,4 \%$; $N^{\text{P}} = 1,1 \%$; $O^{\text{P}} = 16,2 \%$; $V^{\Gamma} = 70,0 \%$; $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 9250 \text{ кДж/кг}$.

По формуле (4.4) определим теоретически необходимое количество воздуха на горение 1 кг торфа, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$\begin{aligned} V^{\circ} &= 0,0889(C^{\text{P}} + 0,375S_{\text{ор}}^{\text{P}}) + 0,265H^{\text{P}} - 0,0333O^{\text{P}} = \\ &= 0,0889(25,2 + 0,375 \cdot 0,1) + 0,265 \cdot 2,4 - 0,0333 \cdot 16,2 = 2,34. \end{aligned}$$

С учетом избытка воздуха, подаваемого в топочное устройство на горение, объемный расход воздуха на горение составит, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\text{возд}} = \alpha_{\text{T}} V^{\circ} B = 1,4 \cdot 2,34 \cdot 2 = 6,55,$$

где B – расход топлива, кг/с.

Полезная тепловая мощность топочного устройства Q_{TV} , кВт, может быть найдена по формуле:

$$Q_{\text{TV}} = B Q_{\text{H}}^{\text{P}} \eta_{\text{TV}} = 2 \cdot 9250 \cdot 0,7 = 12950, \quad (4.19)$$

где η_{TV} – КПД топочного устройства.

Определим по формулам (4.9)–(4.12) объемы газов, $\text{м}^3/\text{кг}$, образующихся при горении торфа:

$$V_{\text{N}}^{\circ} = 0,79V^{\circ} + 0,008N^{\text{P}} = 0,79 \cdot 2,34 + 0,008 \cdot 1,1 = 1,84;$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} &= 0,111H^{\text{P}} + 0,0124W^{\text{P}} + 0,0161V^{\circ} = \\ &= 0,111 \cdot 2,4 + 0,0124 \cdot 48,0 + 0,016 \cdot 2,34 = 0,899; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2} &= 0,01866(C^{\text{P}} + 0,375S_{\text{OP+K}}^{\text{P}}) = \\ &= 0,01866(25,2 + 0,375 \cdot 0,1) = 0,471; \end{aligned}$$

$$V_{\Gamma}^{\circ} = V_{\text{N}}^{\circ} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} + V_{\text{RO}_2} = 1,84 + 0,899 + 0,471 = 3,21.$$

С учетом избытков подаваемого на горение воздуха, количество образующихся продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$, будет равно:

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^{\circ} + 1,0161(\alpha - 1)V^{\circ} = 3,21 + 1,0161(1,4 - 1)2,34 = 4,16.$$

Рассчитаем количество образующихся за 1 секунду продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\Gamma, \text{B}} = B V_{\Gamma} = 2 \cdot 4,15 = 8,3.$$

Количество образующейся золы в продуктах сгорания, г/с, при сжигании торфа, когда продукты сгорания без очистки выбрасываются в окружающую среду, можно определить по формуле (4.18):

$$G_{\text{зл}} = 10A^p B = 10 \cdot 7,0 \cdot 2 = 140.$$

Задание 7 для самостоятельной работы

Задача 1. Определить теоретически необходимое количество воздуха на горение твердого топлива (прил. 2), а также количество образовавшихся продуктов сгорания: теоретический объем азота V_{N}° , объем водяных паров $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ}$ и трехатомных газов V_{RO_2} , объем продуктов сгорания $V_{\text{Г}}^{\circ}$ при $\alpha = 1$. Какое количество шлака и золы будет образовываться, если принять степень уноса $a_{\text{уН}} = 0,05$?

Решение задачи выполнить для своего варианта.

Задача 2. Определить теоретически необходимое количество воздуха на горение жидкого топлива (прил. 1), а также количество образовавшихся продуктов сгорания: теоретический объем азота V_{N}° , объем водяных паров $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ}$ и трехатомных газов V_{RO_2} , объем продуктов сгорания $V_{\text{Г}}^{\circ}$ при $\alpha = 1$. Какое количество шлака и золы будет образовываться, если принять степень уноса $a_{\text{уН}} = 0,05$?

Решение задачи выполнить для своего варианта.

Задача 3. Определить теоретически необходимое количество воздуха на горение газообразного топлива (прил. 3), а также количество образовавшихся продуктов сгорания: теоретиче-

ский объем азота V_N^o , объем водяных паров $V_{H_2O}^o$ и трехатомных газов V_{RO_2} , объем продуктов сгорания V_{Γ}^o при $\alpha = 1$.

Решение задачи выполнить для своего варианта.

Таблица 4.1

Исходные данные для задания 6

№ варианта	Месторождение угля	Жидкое топливо	Газопровод
1	Итатское	мазут малосернистый М-40	Коробки–Камышин
2	Барандатское	дизельное топливо	Кумертау–Магнитогорск
3	Черногорское	мазут сернистый М-100	Лижво–Вольск
4	Норильское	соляровое масло	Оренбург–Совхозное
5	Абаканское	мазут высокосернистый М-100	Первомайск–Сторожевка
6	Харанорское	моторное топливо	Промысловка–Астрахань
7	Бикинское	мазут малосернистый М-40	Брянск–Москва
8	Подмосковное	керосин	Бухара–Урал
9	Бабаевское	мазут сернистый М-100	Газли–Коган
10	Барандатское	бензин	Газли–Ташкент
11	Воркутинское	мазут высокосернистый М-40	Гоголево–Полтава
12	Интинское	дизельное топливо	Дашава–Киев
13	Челябинское	мазут малосернистый М-40	Джаркак–Ташкент
14	Назаровское	соляровое масло	Карабулак–Грозный
15	Березовское	мазут сернистый М-100	Карадаг–Ереван

№ варианта	Месторождение угля	Жидкое топливо	Газопровод
16	Боготольское	моторное топливо	Коробки–Волгоград
17	Челябинское	мазут высокосернистый М-100	Рудки–Минск
18	Назаровское	керосин	Саратов–Горький
19	Березовское	мазут малосернистый М-40	Оренбург–Совхозное
20	Боготольское	бензин	Лижво–Вольск
21	Интинское	мазут сернистый М-100	Оренбург–Совхозное
22	Итатское	дизельное топливо	Газли–Ташкент
23	Барандатское	мазут высокосернистый М-40	Карабулак–Грозный
24	Харанорское	соляровое масло	Промысловка–Астрахань
25	Бикинское	керосин	Кумертау–Магнитогорск

4.3. Расчет горения капли жидкого топлива

Факельное сжигание газообразного, жидкого и твердого пылевидного топлива осуществляют в различных камерных топочных устройствах: топках котлов, обжиговых печах и др. Распыл жидкого топлива, для получения факела, производят с помощью форсунок, в которых происходит подготовка и выброс из них жидкого топлива в виде мелких капель (примером может служить головка бытового распылителя). Капли, перемешиваясь с воздухом, создают факел горения.

Для сжигания жидкого топлива в виде мелких дисперсных капель используются различные типы форсунок, в основу которых положены характерные принципы распыла: механические

центробежные; паровые; воздушные и др.

Распыление позволяет создать большое количество мелких капель, за счет чего резко увеличивается площадь поверхности горения. Это ускоряет прогрев капли и интенсивность испарения, а также нагрев паров жидкости до температуры воспламенения, улучшает перемешивание топлива с воздухом, интенсифицирует сам процесс горения. Углеводороды жидкого топлива теплоустойчивы, поэтому при его нагреве с недостатком окислителя они разлагаются на легкие и тяжелые углеводороды. Такая среда создается при горении внутри крупных капель, и тогда кислороду воздуха трудно попасть внутрь капли.

Тонкость распыления жидкого топлива определяется скоростью подаваемого распылительного агента, которым обычно служат горячий воздух или пар, т. е. кинетической энергией, сообщаемой топливу от распылительного агента. Сама тонкость распыления должна быть обоснована расчетами. Это делается для оптимизации процесса горения. Капля жидкого топлива, вылетевшая из форсунки, должна во время полета испариться и сгореть, не достигнув задней стенки топочной камеры.

Особенность горения горючих жидкостей состоит в том, что сама жидкость гореть не может, а горит только ее пар при смешении с воздухом. Скорость испарения и количество пара над жидкостью зависит от природы жидкости и ее температуры. Пар, образовавшийся над поверхностью жидкости, называют насыщенным. Поэтому перед сжиганием жидкое топливо обычно подогревают для уменьшения его вязкости и лучшего дальнейшего испарения, и в топочной камере через форсунку производят распыл, т. е. дробление на мелкие капли для увеличения площади поверхности горения.

Схему горения капли жидкого топлива в топочной камере можно условно показать на рис. 4.2.

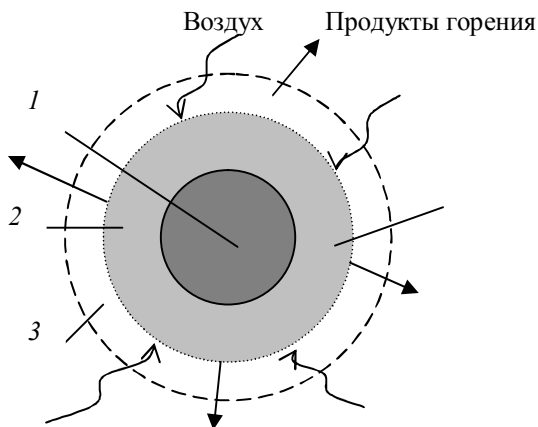


Рис. 4.2. Горение капли жидкого топлива: 1 – жидкость; 2 – паровая область; 3 – область горения

Капля горючей жидкости 1, попадая в топочную камеру, имеет температуру ниже температуры кипения, и гореть сразу не может. Поэтому сначала происходит нагрев поверхностных слоев капли до температуры кипения, и с ее поверхности начинается интенсивное испарение. Вокруг капли создается фронт парогазовой среды 2, который расширяется с ее дальнейшим прогревом. Пар за счет диффузии перемешивается с кислородом воздуха и воспламеняется, создается область горения 3. Капля интенсивно прогревается, и начинается пиролиз (при температуре 500–600 °С) сложных углеводородов на простейшие.

В процессе горения диаметр зоны 3 получается в 1–5 раз больше диаметра капли. При этом кислород воздуха поступает к фронту горения, а продукты сгорания отводятся от нее. Скорость горения лимитируется наиболее медленным процессом – процессом испарения капли. В самой области горения соблюдается тепловой баланс между теплотой, подводимой к поверхности испарения из окружающей среды с максимальной темпера-

турой $T_{\max}$, теплотой, выделяющейся при горении, и теплотой, пошедшей на нагрев капли до температуры кипения, а затем на испарение жидкости. Этот тепловой баланс можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} (T_{\text{кип}} - T_o) dV + Q_{\text{исп}} w_{\text{исп}} = \\ = \frac{\lambda}{\delta_{\text{тзг}}} (T_{\max} - T_{\text{кип}}) F + Q_{\text{н}}^p w_{\text{гор}}, \end{aligned} \quad (4.20)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $c_{\text{ж}}$ – плотность, кг/м^3 , и теплоемкость жидкости, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $T_{\text{кип}}$, T_o – температура кипения жидкости и ее начальная температура, при которой она поступает в топочное устройство, К ; dV – изменение объема капли в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{исп}}$ – теплота парообразования жидкости, $\text{Дж}/\text{кг}$; $w_{\text{исп}}$ – массовая скорость испарения жидкости на поверхности капли, $\text{кг}/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности паровоздушной среды, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\delta_{\text{тзг}}$ – толщина тёмной (мёртвой) зоны горения, м ; $T_{\max}$ – температура продуктов сгорания в топочном объеме, К ; F – площадь поверхности капли, м^2 ; $w_{\text{гор}}$ – массовая скорость выгорания жидкости на поверхности капли, $\text{кг}/\text{с}$, которая может быть принята равной скорости испарения $w_{\text{исп}}$.

Так как скорость горения капли жидкого горючего определяется наиболее медленной стадией процесса – скоростью испарения жидкости, то время её выгорания можно рассчитать на основе уравнения теплового баланса для поверхности капли. Этот баланс складывается из теплового потока, падающего излучением на поверхность капли, и теплового потока идущего на нагрев и испарение капли:

$$q_{\text{изл}} F d\tau = -\rho_{\text{ж}} [c_{\text{ж}} (T_{\text{кип}} - T_0) + Q_{\text{исп}}] dV, \quad (4.21)$$

где $q_{\text{изл}}$ – плотность теплового потока излучением от факела на поверхность капли, Вт/м²; F – площадь поверхности капли в рассматриваемый момент времени, м²; τ – время, с; V – объем капли, м³.

Если предположить, что теплофизические свойства жидкости капли $\rho_{\text{ж}}$, $c_{\text{ж}}$, $Q_{\text{исп}}$ слабо зависят от температуры, то, с учетом соотношений площади поверхности капли $F = 4\pi R^2$ и ее объема $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, из последнего уравнения (4.21) после интегрирования получим соотношение для нахождения времени полного выгорания капли радиусом R , с:

$$\tau = \frac{\rho_{\text{ж}}}{q_{\text{изл}}} [c_{\text{ж}} (T_{\text{кип}} - T_0) + Q_{\text{исп}}] R. \quad (4.22)$$

Как видно из уравнения (4.22), продолжительность выгорания капли при подводе к ее поверхности теплоты излучением от факела и стен топки пропорциональна её первоначальному радиусу.

Интенсивность испарения жидкости увеличивается с ростом поверхности контакта с воздухом, т. к. при этом будет больше подводиться теплоты к поверхности капли. Следовательно, скорость горения будет определяться тонкостью распыла горючей жидкости (диаметром капли). Представленная выше модель сгорания капли горючей жидкости является наиболее упрощенной, но она позволяет представить и оценить протекающие при этом основные процессы.

Пример. Определить время выгорания капли этилового спирта радиусом 0,2 мм в топочной камере. Плотность теплового потока излучением $q_{\text{изл}} = 80 \text{ кВт/м}^2$. Начальная температура спирта 20 °С. На каком расстоянии от форсунки капля выгорит полностью, если средняя скорость полета капли $w = 6 \text{ м/с}$?

Сделать выводы по задаче.

Решение. Для этилового спирта из прил. 9 выпишем ее теплофизические свойства: $T_{\text{кип}} = 351,5 \text{ К}$; $Q_{\text{исп}} = 840 \text{ кДж/кг}$; $c_{\text{ж}} = 2,428 \text{ кДж/(кг·К)}$; $\rho_{\text{ж}} = 789,3 \text{ кг/м}^3$.

Найдем по формуле (4.21) время полного выгорания капли, с, учитывая при этом требуемую размерность каждой величины:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\rho_{\text{ж}}}{q_{\text{изл}}} [c_{\text{ж}} (T_{\text{кип}} - T_0) + Q_{\text{исп}}] R = \\ &= \frac{789,3}{80} [2,428(351,5 - 293) + 840] 0,2 \cdot 10^{-3} = 1,94. \end{aligned}$$

Длина полета капли, м, при ее полном сгорании составит:

$$l = w \cdot \tau = 6 \cdot 1,94 = 11,6.$$

Вывод. Для заданных условий сгорания топлива в топочной камере время полета каждой капли этилового спирта, при условии их полного сгорания, составит около 2 с. Длина полета капли при этом будет составлять 11,6 м.

При проектировании длина топочной камеры должна немного превышать 11,6 м. Это делается для того, чтобы все капли успели сгореть в топочной камере раньше, чем они долетят до задней стенки топки. В противном случае горящее топливо может привести к прожогу задней стенки топки.

Задание 8 для самостоятельной работы

Определить максимальный диаметр капли жидкого топлива, которое сжигают в топочной камере при атмосферном давлении путем распыла. Топливо и его начальную температуру t_o , длину топочной камеры l и среднюю скорость полета капли w принять по своему варианту из табл. 4.2.

Тепловой поток излучением на поверхность капли принять равным $q_{\text{изл}} = 600 \text{ кВт/м}^2$.

Сделать выводы по задаче.

Таблица 4.2

Исходные данные для задания 8

№ варианта	Топливо	Начальная температура топлива t_o , °C	Длина топочной камеры l , м	Средняя скорость полета капли w , м/с
1	Ацетальдегид	0	10	10
2	Ацетон	10	11	12
3	Бензол	20	12	14
4	Гексан	15	13	16
5	Гептан	25	14	18
6	Диэтилэфир	5	15	20
7	Изопентан	0	9	11
8	Изопропилбензол	25	8	13
9	Метиловый спирт	10	7	15
10	<i>n</i> -Пентан	0	10	17
11	<i>n</i> -Пропиловый спирт	15	11	19
12	Толуол	25	12	21
13	Уксусная кислота	30	13	23
14	Хлорбензол	20	9	10
15	Циклогексан	10	8	12
16	Этиловый спирт	15	7	14

№ варианта	Топливо	Начальная температура топлива t_o , °C	Длина топочной камеры l , м	Средняя скорость полета капли W , м/с
17	Ацетон	5	10	16
18	Бензол	10	12	18
19	Гексан	5	9	11
20	Гептан	20	8	13
21	Диэтилэфир	0	7	15
22	Изопентан	5	11	17
23	Изопропилбензол	15	15	19
24	Метиловый спирт	20	16	21
25	Ацетальдегид	5	17	23

4.4. Методы сжигания газа, классификация горелок

Основными функциями газовых горелок являются:

- подача газа и воздуха в область их смешения;
- смесеобразование газа и воздуха для получения гомогенного состава;
- воспламенение газозооушной смеси;
- стабилизация фронта горения (факела) и исключение нештатных ситуаций при горении;
- обеспечение требуемой интенсивности (заданной тепловой мощности горелки) и процесса горения газа.

При проектировании огнетехнических и теплосиловых агрегатов необходимые газовые горелки подбирают по справочникам, отраслевым нормам и каталогам с учетом их тепловой мощности и пределов регулирования, располагаемых давлений газа и окислителя и т. п. Вместе с тем иногда типовые горелки не могут быть применены из-за существенного отличия необхо-

димых параметров от справочных: несоответствие тепловой мощности: недостаточный диапазон регулирования горелки; невозможность установить горелку в топочную камеру из-за ее габаритных размеров; сильное отличие параметров сжигаемого газа от рекомендуемых для типовой горелки и др. Кроме того, в некоторых специфических случаях при организации сжигания газа в промышленных условиях применение типовых горелок становится затруднительным. Например, при местном скоростном нагреве металла, керамики, различных заготовок, термической обработке изделий и т. п. В этих случаях приходится проектировать и использовать другие горелки или реконструировать типовые под условия их работы.

При проектировании горелок стараются обеспечить:

- полноту сгорания газа;
- устойчивость горения газа при различных режимах подачи газа;
- надежность эксплуатации горелки;
- компактность;
- удобство обслуживания и др.

Для повышения устойчивости процесса горения газа в горелках используют различные огнеупорные насадки, которые устанавливают на выходе газа из горелки. При сжигании газа эти насадки раскаляются и служат зажигательными элементами, если случайно произойдет погасание пламени. Сжигание газа в топочных камерах обычно идет с образованием малосветящегося факела. Это позволяет в современных конструкциях газовых горелок значительно повысить эффективность использования газа. Малая светимость факела при сжигании газа методом беспламенного горения может быть компенсирована излучением от раскаленных огнеупорных материалов.

Газовоздушная смесь для горения, образующаяся в горелке, должна приготавливаться с небольшим избытком воздуха по отношению к теоретически необходимому для горения. Эта

смесь поступает в раскаленные огнеупорные каналы горелки, где интенсивно нагревается и сгорает.

При работе горелки обычно наблюдается два режима горения газозвдушной смеси: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме обычно наблюдается спокойный режим сжигания (например, горение газа в бытовой печи), при турбулентном – хаотическое интенсивное сжигание подготовленной газозвдушной смеси (например, горение газа в топке котла).

Устойчивый ламинарный режим горения газозвдушной смеси может быть осуществлен только в определенном диапазоне скорости потока газа на выходе из горелки. Эти два предельных режима горения газа в горелке (рис. 4.3), которые обычно справедливы для атмосферных горелок, определяются следующим образом.

Если скорость потока газозвдушной смеси w_{Π} на выходе из горелки, т. е. в устье горелки в зоне зажигающего кольца, окажется меньше нормальной скорости распространения пламени $w_{\Pi} \leq U_{\Pi}$, то пламя зайдет внутрь горелки. Такой предельный режим горения газовой смеси внутри горелки называют *проскоком пламени*.

Предел по минимальной скорости потока газа в горелке, ниже которой происходит проскок пламени, называется *нижним пределом устойчивости горения по скорости*.

Если скорость потока газозвдушной смеси w_{Π} на выходе из горелки окажется выше максимальной нормальной скорости распространения пламени $w_{\Pi} \geq U_{\Pi, \max}$, то может оказаться, что газовым потоком оторвет пламя от устья горелки, и пламя может погаснуть. Такой предельный режим горения в горелке называют *отрывом пламени*.

Предел по максимальной скорости потока газа в горелке, выше которой происходит отрыв пламени, называют *верхним пределом устойчивости горения по скорости*.

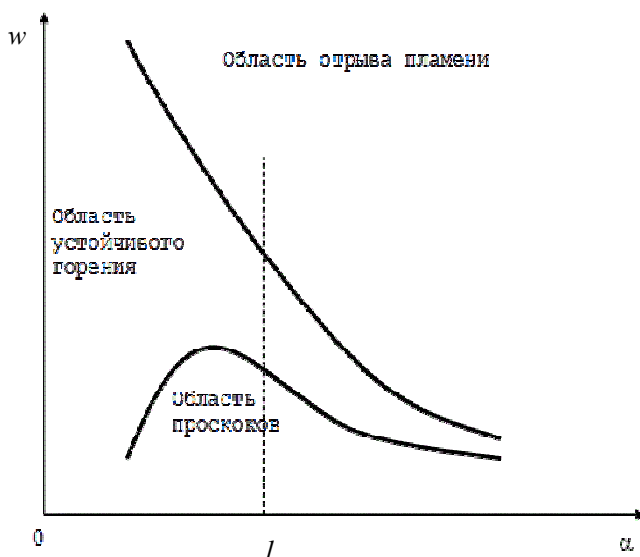


Рис. 4.3. Пределы устойчивого горения в горелках атмосферного типа: W – скорость истечения струи газовойздушной смеси; α – коэффициент избытка воздуха для газовойздушной смеси

Проскок пламени внутрь горелки или его отрыв от устья горелки нарушают ее нормальную работу и могут привести к нештатной ситуации или аварии. Эти же явления ограничивают производительность горелки по минимальному и максимальному пределу устойчивости ее горения. Поэтому необходимо, чтобы горелка все время работала в области устойчивого режима горения, как показано на рис. 4.3. Для расчета этих предельных режимов горения используют табличные значения нормальной и максимальной нормальной скорости распространения пламени по газовойздушной среде, которые приводятся в справочной литературе. Для некоторых газов эти скорости приведены в прил. 5 и 6.

Сжигание газа в горелках может быть осуществлено тремя методами, как показано на рис. 4.4.

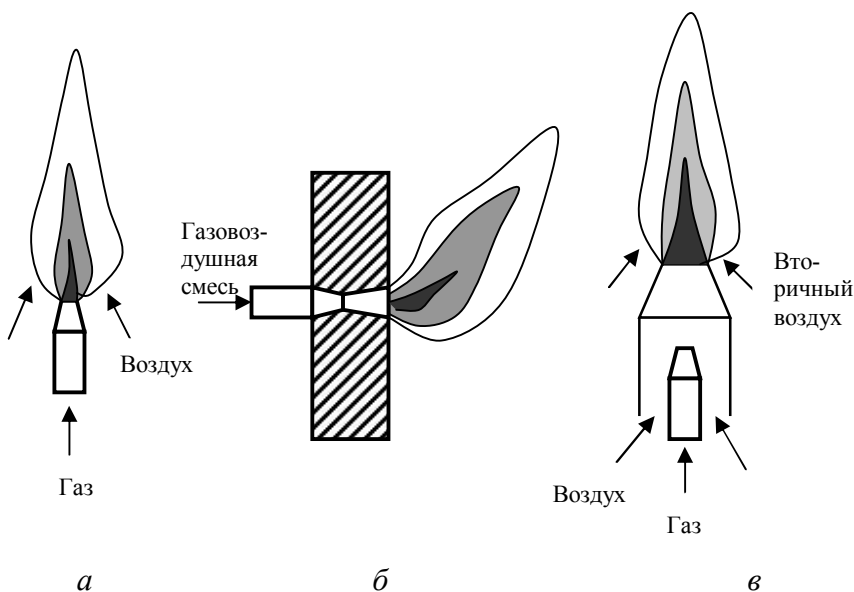


Рис. 4.4. Методы сжигания газа: *a* – диффузионное горение (сжигание без предварительного смешения газа с воздухом); *б* – кинетическое горение (сжигание при полном предварительном смешении газа с воздухом); *в* – диффузионно-кинетическое горение (сжигание газовой смеси с незавершенным предварительным смешением газа с воздухом)

В зависимости от метода сжигания газа горелки подразделяются на следующие типы:

- без предварительного смешения газа с воздухом – диффузионные;
- с полным предварительным смешением газа с воздухом – кинетические;

– с неполным предварительным смешением газа с воздухом – диффузионно-кинетические.

Газовые горелки можно классифицировать по разным признакам: по методу сжигания газа; тепловой мощности; способу подачи воздуха на горение; по давлению газа, идущего на горение; типу смешения газа с воздухом и др.

Широко распространена классификация горелок по способу подачи воздуха. По этому признаку все горелки подразделяются на:

– *бездутьевые*, у которых воздух на горение поступает за счет разрежения в горелке (обычно эти горелки используются в горелочных устройствах небольшой мощности, в быту, в жилищно-коммунальном хозяйстве и т. п.);

– *инжекционные*, у которых воздух на горение засасывается в горелку за счет энергии струи газа (эти горелки по сравнению с предыдущим типом имеют большую тепловую мощность и используются в жилищно-коммунальном хозяйстве, в небольших промышленных топочных устройствах);

– *дутьевые*, у которых воздух на горение подается в горелку с помощью дутьевого устройства, например вентилятора (обычно эти горелки используются в промышленных топочных устройствах, где необходимо получить большую тепловую мощность, – топки котлов, печей и т. п.).

4.5. Общие положения расчета газовых горелок

Теоретический расчет газовых горелок является весьма сложным и трудоемким, так как связан с комплексными расчетами процессов смешения, горения и теплоотдачи, которые должны обеспечивать не только высокую эффективность сжигания газового топлива, но и минимально возможную концентрацию вредных компонентов в продуктах сгорания. Поэтому такие

расчеты ведутся в специализированных организациях. На производстве при необходимости расчета небольшой горелки из-за сложности расчетов приходится пользоваться рядом приближенных данных, полученных из практики или отдельных экспериментов. Ниже будут приведены наиболее упрощенные и вместе с тем оправдавшие себя на практике методики расчета двух газовых горелок первых двух типов, как наиболее распространенных.

На малые и средние промышленные предприятия газовое топливо (обычно это природный газ) подают из газопроводов при низком давлении. При этом обычно используют для сжигающих устройств газовые диффузионные горелки. При более высоком давлении газа (низком или среднем) могут быть применены инжекционные газовые горелки.

Инженерный расчет газовых горелок может быть двух типов: поверочный или конструктивный.

При поверочном расчете конкретной горелки, когда конструкция и размеры горелки уже известны, уточняют ее тепловую мощность и пределы регулирования по заданным значениям давления, составу газа и др. известным параметрам. Поверочные расчеты обычно проводятся при существенном отклонении характеристик горелки и давления газа от паспортных данных горелки. Методики расчета горелок приводятся в справочной литературе.

При конструктивном расчете, когда неизвестны основные конструктивные параметры горелки, по заданной тепловой мощности и требуемым пределам ее регулирования определяют необходимое номинальное давление газа перед горелкой и размеры проточной части горелки. А дальше проводят проектирование горелки и определяют ее основные конструктивные размеры.

Важнейшей характеристикой любой газовой горелки является ее тепловая мощность Q_{Γ} , кВт (не путать с полезной тепловой мощностью топочного устройства):

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{H}}^{\text{C}} \cdot V_{\Gamma}, \quad (4.23)$$

где Q_{H}^{C} – низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/нм³; V_{Γ} – объемный расход газа через горелку, нм³/с.

Различают максимальную, минимальную и номинальную тепловые мощности газовых горелок.

Максимальная тепловая мощность достигается при длительной работе горелки с наибольшим расходом газа, при этом не должно происходить отрыва пламени от устья горелки.

Минимальная тепловая мощность возникает при устойчивой работе горелки при наименьших расходах газа, при этом не должно быть прерывания пламени внутри горелки.

Номинальная тепловая мощность горелки соответствует режиму работы топочного устройства с расчетным расходом газа, т. е. расходом, обеспечивающим максимальный КПД при наиболее полном сжигании газа. В паспортах горелок обычно указывают ее номинальную тепловую мощность.

Важной характеристикой горелки является также предел регулирования n ее тепловой мощности, т. е. отношение максимальной тепловой мощности $Q_{\Gamma.\text{max}}$ к минимальной $Q_{\Gamma.\text{min}}$:

$$n = \frac{Q_{\Gamma.\text{max}}}{Q_{\Gamma.\text{min}}}. \quad (4.24)$$

Для большинства горелок значение предела регулирования n лежит в пределах от 2 до 5.

При расчете горелок расход газа и его плотность могут определяться при нормальных физических условиях ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,1013 \cdot 10^6\text{ Па}$). Объясняется это тем, что давление газа, подаваемого в горелку, мало отличается от атмосферного, а его температура для зимнего расчетного периода близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. При тех же условиях с допустимой для практики точностью могут определяться теоретический расход воздуха и его плотность. Если температура подаваемого на горение воздуха другая, то плотность воздуха, кг/м^3 , может быть рассчитана по следующему соотношению:

$$\rho_{\text{в}} = 1,293 \frac{273}{t_{\text{в}} + 273}, \quad (4.25)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура подаваемого в горелку воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

При расчете горелок можно также не учитывать содержание в газе и воздухе водяных паров, так как оно очень мало влияет на объем и плотность, а также теплоту сгорания газа.

Расход газа, идущего на горение в горелку $V_{\text{Г}}$, $\text{м}^3/\text{с}$, можно определить по формуле:

$$V_{\text{Г}} = \frac{Q_{\text{ОУ}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{с}} \cdot N \cdot \eta}, \quad (4.26)$$

где $Q_{\text{ОУ}}$ – номинальная тепловая мощность топливосжигающей установки, кВт; $Q_{\text{Н}}^{\text{с}}$ – низшая теплота сгорания газа, кДж/м^3 ; N – число принимаемых к установке однотипных горелок с одинаковым расходом газа; η – КПД установки.

Теоретический расчет газовых горелок, как было отмечено выше, является весьма сложным по многим причинам. Поэтому инженерный расчет обычно проводится с использованием ряда

приближенных данных, полученных из практики, или с использованием данных экспериментов.

4.6. Расчет дутьевых диффузионных горелок

При низком давлении газа, поставляемого потребителю, достаточно часто используют дутьевые (с принудительной подачей воздуха) горелки с полным предварительным смешением, которое происходит в смесительной камере. Такие горелки называют диффузионными. Газ в горелку подается под давлением и через систему небольших отверстий выходит наружу. Принципиальные схемы таких горелок показаны на рис. 4.5.

При расчете диффузионных горелок необходимо учитывать следующие особенности процесса горения:

- наиболее длинный факел формируется диффузионными горелками типа «труба в трубе» при соизмеримых скоростях истечения газа из отверстий и воздуха;
- при сжигании природного газа длина факела может достигать 200 и более диаметров газового сопла;
- диффузионные горелки вихревого типа с многоструйной подачей газа формируют более короткие факелы.

В условиях развитой турбулентности газового потока относительная длина диффузионных факелов зависит от ряда факторов: теоретического расхода воздуха на горение, вязкости газа, начальной интенсивности турбулентности потоков газа и воздуха, начальной температуры газа и воздуха, соотношения начальных скоростей газа и воздуха, калибра горелки и т. п.

Современное состояние теории горения пока не позволяет аналитически рассчитывать длину и форму факела ввиду большой сложности факельных процессов. В связи с этим конкретный вид зависимостей для длины и формы факела с учетом конструктивных особенностей горелок и камер сгорания определяется опытным путем и приводится в справочной литературе.

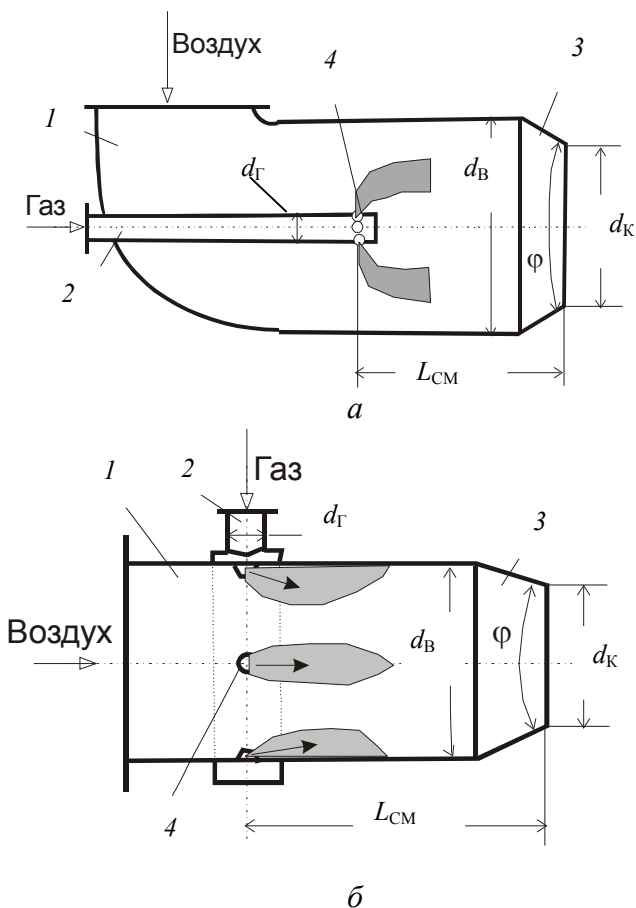


Рис. 4.5. Схема прямооточной диффузионной дутьевой горелки с центральной (а) и многоструйной периферийной (б) подачей газа: 1 – корпус горелки; 2 – труба подвода газа; 3 – конфузор; 4 – отверстия для выхода газа

Исходными данными для расчета диффузионной газовой горелки является ее тепловая мощность, химический состав сжигаемого газа, давление и температура газа перед соплом,

давление и температура идущего на горение воздуха, а также характеристики тепловой установки, для которой рассчитывается горелка.

Упрощенный расчет прямоточной дутьевой диффузионной горелки (рис. 4.5) сводится к нахождению площадей проходных сечений для газа, воздуха и подготовленной горючей смеси для заданной производительности горелки по газу V_{Γ} и располагаемого давления газа P_{Γ} и воздуха $P_{\text{В}}$.

По известному виду сжигаемого газа (прил. 3) определяют низшую теплоту сгорания $Q_{\text{Н}}^{\text{с}}$ и плотность газа ρ_{Γ} , идущего на горение.

Расход газа через горелку V_{Γ} может быть найден с использованием соотношения (4.26). Тогда требуемый расход воздуха через горелку, $\text{м}^3/\text{с}$, рассчитывают по формуле:

$$V_{\text{В}} = \alpha_{\text{Т}} \cdot V_{\Gamma} \cdot V_{\text{В}}^{\circ}, \quad (4.27)$$

где $\alpha_{\text{Т}}$ – коэффициент избытка воздуха, подаваемого в топочную камеру. При горении газового топлива он может быть принят равным 1,05; $V_{\text{В}}^{\circ}$ – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{нм}^3$, необходимый для горения 1 нм^3 газа. Этот расход воздуха, если он не задан, легко может быть рассчитан по формуле (4.5).

Массовая скорость воздуха (произведение плотности воздуха $\rho_{\text{В}}$ на его скорость $w_{\text{В}}$) в подводящем воздуховоде и в канале горелки принимается экономически целесообразной из соотношения $\rho_{\text{В}} \cdot w_{\text{В}} = 22\text{--}24 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

Задав массовую скорость воздуха $\rho_{\text{В}} \cdot w_{\text{В}}$ в указанных выше пределах, можно определить скорость его движения $w_{\text{В}}$ внутри корпуса горелки.

Внутренний диаметр корпуса горелки d_B , м, для прохода воздуха можно найти из уравнения неразрывности потока:

$$d_B = 2 \sqrt{\frac{V_B}{\pi \cdot w_B}}. \quad (4.28)$$

При проектировании подводящих газопроводов к горелкам скорость движения газа обычно принимают:

- при низком давлении газа в пределах от 10 до 12 м/с;
- при среднем давлении газа в пределах от 25 до 30 м/с.

Внутренний диаметр трубы d_Γ , по которой газ подается на горение, может быть найден с учетом предварительно принятой скорости газа внутри трубы $w_{\Gamma T}$. Тогда диаметр трубы d_Γ , м, можно определить по формуле:

$$d_\Gamma = 2 \sqrt{\frac{V_\Gamma}{\pi \cdot w_{\Gamma T}}}. \quad (4.29)$$

Для предотвращения проскока пламени внутрь смесителя горелки при малых расходах газа и улучшения процесса смешения газа с воздухом в конце горелки используют конфузор – суживающуюся часть. Сужение канала горелки позволяет повысить скорость выхода газозвоздушной смеси, чтобы эта скорость была выше нормальной скорости распространения пламени, но ниже максимальной нормальной скорости распространения пламени, т. е. чтобы не происходило проскока пламени внутрь горелки или его отрыва от устья горелки.

Для эффективного смешения газа с воздухом в смеситель горелки газ вводится системой мелких струй периферийно или центрально, как показано на рис. 4.5. Условно характер выхода

струи газа через стенку трубы в поток набегающего воздуха показан на рис. 4.6.

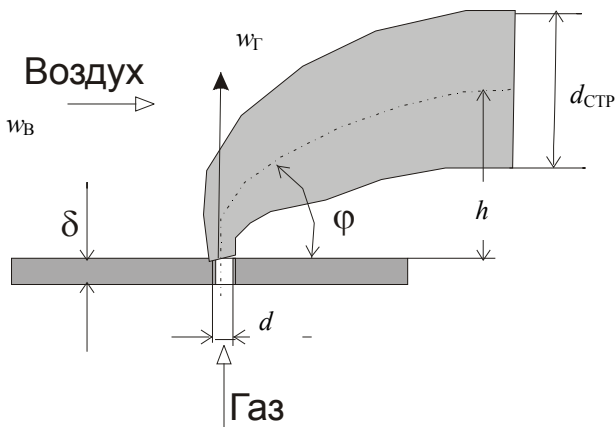


Рис. 4.6. Схема выхода газа через газовыпускное отверстие

Перепад давления газа в горелке ΔP_{Γ} до и после газовыпускных отверстий (обычно известен) достаточно небольшой по величине. Зная величину перепада давления газа в горелке, несложно подсчитать скорость истечения газа из отверстий w_{Γ} , м/с, считая его несжимаемой жидкостью, по формуле:

$$w_{\Gamma} = \psi \sqrt{\frac{2 \Delta P_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}}, \quad (4.30)$$

где ψ — коэффициент скорости, зависящий от соотношения толщины стенки δ к диаметру отверстия d :

- для тонкой стенки, когда $\delta < d$, $\psi = 0,97-0,98$;
- для толстой стенки, когда $\delta = (1-2)d$, $\psi = 0,97-0,98$;

ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м^3 , которая может быть принята по прил. 3.

При невысокой скорости выхода газа из газовыпускного отверстия и высокой скорости воздуха глубина проникновения h будет небольшой, и газовая струя будет прижата к внутренней стенке корпуса горелки, а все струи в целом создадут кольцевой поток газозвоздушной смеси. При высокой скорости газа и малой скорости движения воздуха глубина проникновения струи газа h будет значительной, и струи газа будут сливаться в одну большую струю, находящуюся в центре горелки. В обоих этих случаях условия смесеобразования не являются оптимальными. Аналогичная картина будет наблюдаться и при центральной подаче газа.

Эффективное смешение газовых струй с воздухом имеет место при определенном числе этих струй и примерно равных скоростей воздуха и газа. При малом числе газовых струй их диаметр должен быть большим, при этом потребуется длинный смеситель горелки для завершения смесеобразования газа с воздухом. При большом числе небольших струй, когда они имеют у корня малый диаметр, струи могут сливаться друг с другом в потоке воздуха в сплошную кольцевую струю, что ведет к ухудшению смесеобразования. Оптимальное число газовых струй должно соответствовать следующему условию:

$$d_{\text{СТР}} = 0,75 h, \quad (4.31)$$

где $d_{\text{СТР}}$ – диаметр газовой струи в месте ее полного разворота, как показано на рис. 4.6.

При центральной подаче газа (рис. 4.5, *а*) оптимальной считается глубина h проникновения струй газа в сносящий поток воздуха на величину $0,25(d_{\text{В}} - d_{\Gamma})$. При периферийной подаче газа (рис. 4.5, *б*) – на величину $(0,15-0,25)d_{\text{В}}$.

Диаметр газовыпускных отверстий d , мм, может быть определен по формуле [10]:

$$d = \frac{h}{k_1} \frac{w_B}{w_\Gamma} \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho_\Gamma}}, \quad (4.32)$$

где h – глубина проникновения струи газа в поток воздуха, мм;
 k_1 – экспериментальный коэффициент, учитывающий влияние относительного шага между отверстиями на размер h :

$$\begin{aligned} \text{– при } \frac{S}{d} = 5 \quad k_1 &= 1,6; \\ \text{– при } \frac{S}{d} = 10 \quad k_1 &= 1,75; \\ \text{– при } \frac{S}{d} = 15 \quad k_1 &= 1,9, \end{aligned}$$

где S – шаг между отверстиями.

При расчетах необходимо предварительно задавать значение относительного шага $\frac{S}{d}$, а потом его уточнять.

Число отверстий n для выхода газа может быть найдено по формуле:

$$n = \frac{4V_\Gamma}{\mu \cdot \pi \cdot d^2} \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{2 \Delta P_\Gamma}}, \quad (4.33)$$

где μ – коэффициент расхода для газовыпускных отверстий: для отверстий в тонкой стенке $\mu = 0,60\text{--}0,62$; для отверстий в толстой стенке $\mu = 0,82$.

После нахождения числа n следует принять целое их число и уточнить с использованием формулы (4.32) значение диаметра отверстий для выхода газа d .

Подводящие газопроводы к горелкам проектируют на скорость движения газа:

- при низком давлении газа в пределах от 10 до 12 м/с;
- при среднем давлении газа в пределах от 25 до 30 м/с.

Для обеспечения в горелке полного смешения газа с воздухом и оптимизации процесса горения длина ее смесителя $L_{\text{см}}$ (расстояние от газовыпускных отверстий до выходного сечения горелки) обычно принимается в пределах от 30 до 40 диаметров выходного отверстия для газа d .

Диаметр выхода газовой струи из кратера горелки, м, может быть принят в следующих пределах:

$$d_k = (0,91-0,93) d_b. \quad (4.34)$$

В прямоточных горелках (рис. 4.4) располагаемое полное избыточное давление воздуха перед горелкой, Па, может быть найдено по формуле:

$$P_b = k_2 (1 + \xi_{\text{кон}}) \frac{w_{\text{см}}^2}{2} \rho_{\text{см}} \pm P_{\text{кс}}, \quad (4.35)$$

где k_2 – коэффициент запаса, учитывающий дополнительные потери давления воздуха за счет трения потока о стенки горелки, и сопротивления, связанного с вводом в поток газовых струй, и др. Ориентировочно при расчетах можно принимать: $k_2 = 1,05-1,1$; $w_{\text{см}}$ – скорость газовой смеси в выходном сечении горелки (на выходе из кратера), м/с, которую можно определить из соотношения

$$V_{\Gamma} + V_B = w_{\text{см}} \frac{\pi \cdot d_K^2}{4}; \quad (4.36)$$

$\rho_{\text{см}}$ – плотность газозооушной смеси, кг/м³, определяемая по формуле:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} + \rho_B \cdot V_B}{V_{\Gamma} + V_B}; \quad (4.37)$$

$P_{\text{КС}}$ – избыточное давление (или разрежение) в камере сгорания, Па; $\xi_{\text{кон}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления конфузора, который рассчитывается по формуле

$$\xi_{\text{кон}} = 0,5 \sin \frac{\varphi}{2} \left[1 - \left(\frac{d_{\Gamma}}{d_B} \right)^2 \right]; \quad (4.38)$$

φ – угол сужения конфузора, имеющий значения в пределах от 15° до 30°.

4.7. Расчет инжекционной газовой горелки

Инжекционными называются горелки, в которых образование газозооушной смеси, идущей на горение, происходит за счет энергии струи газа (в литературе часто такие горелки называют эжекторами, или эжекционными смесителями). В таких горелках дополнительных устройств для принудительной подачи в нее воздуха не требуется. Принципиальная схема горелки показана на рис. 4.7.

Основной элемент инжекционной горелки – инжектор. Инжектор представляет собой газовое сопло 1 , расположенное

в суживающейся части горелки 2. Сопло на конце имеет суживающуюся часть для повышения скорости выхода газа из него. Струя газа, движущаяся из сопла с высокой скоростью, увлекает за собой воздух из окружающего пространства внутрь горелки в смесительную камеру 3, где далее происходит их смешение. В зависимости от количества инжектируемого (всасываемого в горелку) воздуха горелки могут быть с неполной или полной инжекцией.

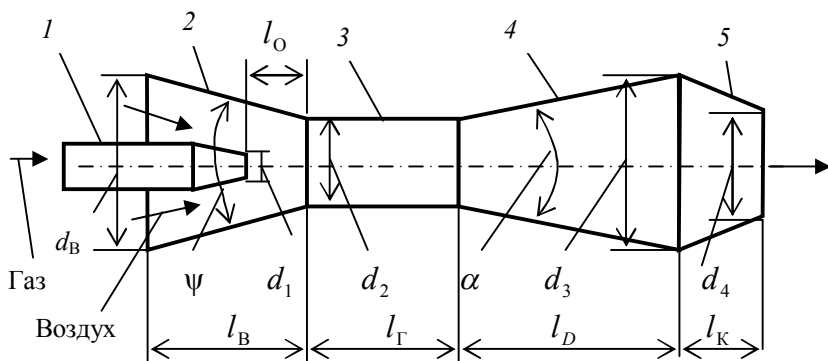


Рис. 4.7. Принципиальная схема инжекционной атмосферной газовой горелки: 1 – сопло; 2 – конфузор; 3 – горловина; 4 – диффузор; 5 – кратер

Инжекционные горелки устойчиво работают при низком давлении газа, из-за чего имеют ряд положительных качеств: хорошее смешение компонентов; простота конструкции; надежность в эксплуатации. Благодаря этим качествам их широко применяют в бытовых газовых приборах, в газовых приборах для предприятий общественного питания, а также они используются другими коммунально-бытовыми потребителями газа, в том числе и в отопительных котлах.

Важной характеристикой инжекционных горелок неполного смешения является *коэффициент инжекции* – отношение объема инжектируемого воздуха к объему воздуха, необходимо для полного сгорания газа. Например, если для полного сгорания 1 м^3 газа необходимо 10 м^3 воздуха, а первичный воздух составляет 4 м^3 , то коэффициент инжекции равен: $4:10 = 0,4$. Количество вторичного воздуха будет составлять 6 м^3 .

Другой характеристикой горелок является *кратность инжекции* – отношение объемного расхода первичного воздуха, засасываемому в горелку, к объемному расходу газа в горелке. Например, когда на 1 м^3 сжигаемого газа инжектируется 4 м^3 воздуха, кратность инжекции составит 4.

Основным достоинством инжекционных горелок является их свойство по саморегулированию подсасываемого воздуха на горение, т. е. поддержание постоянной пропорции между количеством подаваемого в горелку при неизменном давлении газа и количеством инжектируемого воздуха.

Пределы устойчивой работы инжекционных горелок ограничены возможностями проскока пламени внутрь горелки и отрывом пламени от устья горелки.

При расчете инжекционных горелок следует учитывать особенности горения:

- для холодных смесей природного газа с воздухом длина турбулентного прямооточного факела обычно должна лежать в пределах от 5 до 6 диаметров выходного сечения горелки d_4 ;

- для смесей с высокой нормальной скоростью распространения пламени длина факела должна быть еще меньше;

- при наличии подогрева воздуха перед горелкой длина кинетического факела должна быть небольшой. Например, при изменении температуры газозвоздушной смеси в горелке от 20 до 400°C длина факела уменьшается примерно вдвое.

В горелках полного предварительного смешения газа с воздухом (когда воздух, требующийся на горение, полностью

засасывается инжектором), поступление последнего на горение обеспечивается повышенным давлением газа. Горелки полного смешения газа обычно работают в диапазоне давления от 0,005 до 0,5 МПа. Их называют инжекционными горелками среднего давления, и применяют в основном в отопительных котлах и промышленных печах. Основные трудности повышения мощности таких горелок – сложность борьбы с проскоком пламени и громоздкость смесителей.

В основу расчета инжекционных горелок положено уравнение инжекции, полученное из классического уравнения Эйлера (уравнение импульсов):

$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{\text{опт}} = \left(1 + \frac{\xi_2}{2}\right)(1 + U_{\text{м}})(1 + U_{\text{об}}), \quad (4.39)$$

где $\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{\text{опт}}$ – оптимальное отношение площади сечения цилиндрической части смесителя (горловины) f_2 к площади сечения газового сопла f_1 ; ξ_2 – коэффициент сопротивления входной камеры смесителя, отнесенный к скорости газовой смеси в цилиндрической части смесителя; $U_{\text{м}} = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{г}}}$ – массовая кратность инжекции, т. е. отношение массового расхода воздуха $G_{\text{в}}$ к массовому расходу газа $G_{\text{г}}$ в горелке; $U_{\text{об}} = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{г}}}$ – объемная кратность инжекции, т. е. отношение объемного расхода воздуха $V_{\text{в}}$ к объемному расходу газа $V_{\text{г}}$ в горелке.

Выбор соотношения $\frac{f_2}{f_1}$ по основному уравнению инжекции (4.38) обеспечивает максимальный КПД смесительной камеры $\eta_{\max}$, определяемый по формуле

$$\eta_{\max} = \frac{(V_{\Gamma} - V_{\text{В}})P_3}{V_{\Gamma} \cdot P_1}, \quad (4.40)$$

где P_3 – полное избыточное давление газовой смеси, Па, в конце диффузора; P_1 – избыточное давление газа, Па, перед газовым соплом.

Оптимальное соотношение $\frac{f_2}{f_1}$ обеспечивает максимальное давление газовой смеси P_3 в конце диффузора и, следовательно, максимальную скорость истечения смеси из горелки, что приводит к расширению ее пределов регулирования тепловой мощности при заданном давлении газа перед ней.

Максимальное давление газовой смеси в конце диффузора определяется из соотношения:

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{\mu_1^2}{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{\text{опт}}}, \quad (4.41)$$

где μ_1 – коэффициент расхода для газового сопла.

Давление P_3 в конце диффузора находится в зависимости от аэродинамических сопротивлений конфузора горелки, горе-

лочного туннеля и других сопротивлений по тракту газовоздушной смеси, а также от противодействия в камере сгорания, Па:

$$P_3 = P_{3, \text{ст}} + \frac{w_3^2}{2} \rho_{\text{см}} = (1 + \sum \xi_4) \frac{w_4^2}{2} \rho_{\text{см}} \pm P_{\text{КС}}, \quad (4.42)$$

где $P_{3, \text{ст}}$ – статическое давление газовоздушной смеси в конце диффузора, Па; $\frac{w_3^2}{2} \rho_{\text{см}}$ – динамическое давление, Па, в конце диффузора; $\rho_{\text{см}}$ – плотность газовоздушной смеси, кг/м³ (см. формулу (4.37)); $\frac{w_4^2}{2} \rho_{\text{см}}$ – динамическое давление, Па, на выходе из горелки; $P_{\text{КС}}$ – избыточное противодействие (+) или разрежение (–) в камере сгорания, Па; $\sum \xi_4$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений по тракту газовоздушной смеси, отнесенных к скорости в выходном сечении горелки.

Подставив в уравнение (4.42) вместо P_3 его значение из уравнения (4.41), получим:

$$P_1 = [(1 + \sum \xi_4) \frac{w_4^2}{2} \rho_{\text{см}} \pm P_{\text{КС}}] \frac{1}{\mu_1^2} (1 + \frac{\xi_2}{2}) (1 + U_{\text{м}}) (1 + U_{\text{об}}). \quad (4.43)$$

Уравнение (4.43) называется *основным уравнением инжекционного смесителя*. Оно устанавливает зависимость необходимого давления газа перед горелкой от режимных параметров ее работы. Это уравнение заложено в основу методики расчета инжекционной горелки, которая приведена ниже.

При конструктивном расчете инжекционной горелки обычно известно давление газа перед горелкой P_{Γ} . Избыточное давление газа перед газовым соплом ΔP_1 , Па, может быть найдено по эмпирической формуле:

$$\Delta P_1 = 0,27 \frac{Q_{\text{H}}^{\text{c}}}{100} + 40, \quad (4.44)$$

где Q_{H}^{c} – низшая теплота сгорания сухого газа, кДж/нм³, принимаемая по справочным таблицам для данного газа.

Скорость газа на выходе из сопла, м/с, может быть определена по формуле:

$$w_{\Gamma} = \sqrt{\frac{2 \Delta P_1}{\rho_{\Gamma}}}. \quad (4.45)$$

Диаметр выходного сечения сопла d_1 , м, рассчитывается из условия обеспечения надежной работы горелки, без проскоков пламени в смеситель при минимально необходимой тепловой мощности, по формуле:

$$d_1 = 2 \sqrt{\frac{V_{\Gamma}}{\pi \cdot \mu \cdot w_{\Gamma}}}, \quad (4.46)$$

где μ_1 – коэффициент расхода, учитывающий неравномерность распределения скоростей потока газа по сечению сопла, сопротивление трения и сжатие струи. Данный коэффициент в основном зависит от формы сопла. Для конической формы сопла, приведенной на рис. 4.7, $\mu_1 = 0,85$ при угле конусности 30°.

Для других форм сопла и других углах конусности значение коэффициента μ_1 можно найти в справочной литературе.

Диаметр горловины (смесителя) сопла d_2 определяется из уравнения, выражающего закон сохранения количества движения при смешении горючего газа с воздухом. Примем, что объемная кратность инъекции равна: $U_{об} = \alpha_T \cdot V_B^o$. Тогда уравнение для определения диаметра горловины, м, запишется в следующем виде:

$$d_2 = d_1 \sqrt{(1 + \alpha_T \cdot V^o)(1 + \alpha_T \cdot V^o \frac{\rho_B}{\rho_T})}, \quad (4.47)$$

где α_T – коэффициент избытка инжектируемого воздуха. Этот коэффициент может быть принят равным коэффициенту избытка воздуха, подаваемого в топочное устройство (см. формулу (4.27)); V^o – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м³ газа (см. формулу (4.5)).

Диаметры конфузора d_B , м, и диффузора d_3 , м, обычно принимаются примерно одинаковыми, и определяются соотношением

$$d_B \approx d_3 = (1,5-1,7) d_2. \quad (4.48)$$

Диаметр кратера горелки d_4 , м, может быть принят:

$$d_4 = (1,07-1,1) d_2. \quad (4.49)$$

Остальные размеры горелки определяются по следующим соотношениям, полученным в результате экспериментальных исследований:

– длина конфузора, м,

$$l_B = (1,5-1,7) d_2 ; \quad (4.50)$$

– длина горловины, м,

$$l_\Gamma = (3-4) d_2 ; \quad (4.51)$$

– длина кратера, м,

$$l_K = (1,2-1,7) d_2 ; \quad (4.52)$$

– длина диффузора, м,

$$l_D = \frac{d_3 - d_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (4.53)$$

где α – угол расширения диффузора, принимаемый для обеспечения безотрывности потока газовойздушной смеси от стенок канала в пределах от 6° до 8° . В целях укорочения диффузора угол α может быть увеличен, но не более чем до 14° .

Расстояние от среза газового сопла до входа в цилиндрическую часть смесителя принимают в следующих пределах:

$$l_o = (1,5-2) d_2 . \quad (4.54)$$

Методика расчета инжекционных горелок с неполным предварительным смешением и с активной воздушной струей изложена в специальной литературе и здесь не рассматривается.

Задание 9 для самостоятельной работы

Задача 1. Рассчитать конструктивные размеры ($d_B, d_G, d, h, d_{\text{СТР}}, n, L_{\text{СМ}}$) прямооточной дутьевой диффузионной газовой горелки (рис. 4.5) и ее основные технические характеристики ($Q_G, V_G, V_B, w_B, w_G, w_{\text{СМ}}, P_B$). Две горелки установлены в топочной камере котла. Полезная тепловая мощность топочной камеры 1 МВт. Определить также давление воздуха на входе в горелку, если избыточное давление дымовых газов в топочной камере составляет: $P_{\text{КС}} = -20$ Па. Привести эскиз рассчитанной горелки в масштабе.

Исходные данные для решения задачи принять по своему варианту по табл. 4.4.

Сделать выводы по результатам расчета.

Задача 2. Рассчитать конструктивные размеры инжекционной атмосферной газовой горелки (рис. 4.7) с полным предварительным смешением, если известны следующие параметры: расход газа через горелку $V_G, \text{м}^3/\text{с}$; газопровод, откуда берется газ; КПД теплосилового агрегата η . Принять температуру газа и воздуха равной 0°C . Определить полезную тепловую мощность топочной камеры агрегата и требуемое давление газа перед горелкой. При расчете принять, что воздух на горение подается с избытком и коэффициент избытка воздуха $\alpha_T = 1,05$. Привести эскиз рассчитанной горелки в масштабе.

Исходные данные для решения задачи принять по своему варианту по табл. 4.5.

Сделать выводы по результатам расчета.

Таблица 4.4

Исходные данные для задачи 1 задания 9

№ вари- анта	Температу- ра воздуха t_B , °C	Перепад давления газа в горелке ΔP_r , Па	Подача газа: П – периферийная; Ц – центральная	КПД теп- лосилово- го агрегата η
1	0	200	П	0,70
2	10	150	Ц	0,80
3	20	100	П	0,90
4	30	50	Ц	0,72
5	5	400	П	0,82
6	15	350	Ц	0,92
7	25	300	П	0,74
8	–10	250	Ц	0,84
9	–20	225	П	0,68
10	–30	175	Ц	0,76
11	–5	125	П	0,86
12	–15	75	Ц	0,66
13	–25	375	П	0,78
14	0	325	Ц	0,88
15	10	275	П	0,75
16	20	200	Ц	0,77
17	30	150	П	0,91
18	5	100	Ц	0,89
19	15	50	П	0,81
20	25	400	Ц	0,83
21	–10	350	П	0,85
22	–20	300	Ц	0,71
23	–30	250	П	0,87
24	–5	225	Ц	0,73
25	–15	175	П	0,79

Таблица 4.5

Исходные данные для задачи 2 задания 9

№ варианта	Расход газа через горелку V_{Γ} , м ³ /с	КПД теплосилового агрегата η
1	0,040	0,85
2	0,010	0,71
3	0,020	0,87
4	0,050	0,73
5	0,015	0,79
6	0,025	0,85
7	0,035	0,71
8	0,045	0,87
9	0,040	0,73
10	0,010	0,79
11	0,020	0,70
12	0,050	0,80
13	0,015	0,90
14	0,025	0,72
15	0,035	0,82
16	0,045	0,92
17	0,040	0,74
18	0,010	0,84
19	0,020	0,68
20	0,050	0,76
21	0,015	0,86
22	0,025	0,66
23	0,035	0,78
24	0,045	0,88
25	0,055	0,75

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. *ГОСТ Р 12.3.047–98*. Пожарная безопасность технологических процессов.
2. *Приказ МЧС РФ* от 10 июля 2009 г. № 404. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (с изменениями и дополнениями от 14.12.2010 г.).
3. *Карауш, С.А.* Теория горения и взрыва : учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / С.А. Карауш. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 208 с. – (Серия «Бакалавриат»).
4. *Карауш, С.А.* Основы процессов горения и взрывов : учебное пособие / С.А. Карауш. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2008. – 278 с.
5. *Корольченко, А.Я.* Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. – М. : Пожнаука, 2007. – 265 с.
6. *Орленко, Л.П.* Физика взрыва и удара : учебное пособие для вузов. – М. : Физматлит, 2006. – 304 с.
7. *Тимофеева, С.С.* Теория горения и взрыва : практикум / С.С. Тимофеева, Т.И. Дроздова. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – Ч. 3. – 244 с.
8. *Низшая теплота сгорания* // Планы эвакуации. URL: <http://планы-эвакуации.рф/tag/nizshaya-teplota-sgoraniya/> (дата обращения: 28.11.2013).
9. *РД 03-409–01*. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изменениями и дополнениями).
10. *О требованиях пожарной безопасности*. Технический регламент: Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ // Собр. законодательства РФ. – 2008. – № 30 (ч. 1). – Ст. 3579.

11. *ГОСТ 31369–2008*. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава.

12. *ГОСТ 28656–90*. Газы углеводородные сжиженные. Расчетный метод определения плотности и давления насыщения паров.

13. *ПБ 09-540–03*. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств.

14. *Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия*. РБ Г-05-039–96 : нормативный документ.

Дополнительная

15. *Роддатис, К.Ф.* Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф. Роддатис, А.Н. Полтарецкий; под ред. К.Ф. Роддатиса. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.

16. *Водяник, В.И.* Взрывозащита технологического оборудования / В.И. Водяник. – М. : Химия, 1991. – 256 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчетные характеристики некоторых видов жидкого топлива [15]

№ п/п	Жидкое топливо	Мар- ка топ- лива, класс	Состав рабочей массы топлива, %						Температу- ра вспыш- ки t_B , °C	Плот- ность ρ , кг/м ³	Q_H^P , кДж/кг
			W^P	A^P	S^P	C^P	H^P	$O^P + N^P$			
1	Мазут	М-40	1,5	0,8	0,5	84,65	11,7	0,6	90	0,91	40610
2	малосернистый	М-100	1,5	1,5	0,5	84,65	11,7	1,0	110	1,015	40610
3	Мазут	М-40	1,5	0,8	2	83,8	11,2	0,8	90	0,931	40400
4	сернистый	М-100	1,5	1,5	2	83,8	11,2	1,0	110	1,015	40400
5	Мазут	М-40	1,5	0,8	3,5	83,0	10,4	0,8	90	0,944	39780
6	высокосернистый	М-100	1,5	1,5	3,5	83,0	10,4	1,0	110	1,015	39780
7	Дизельное топливо	—	—	0,1	0,3	86,3	13,3	0,1	30–90	0,83	42620
8	Соляровое масло	—	—	0,1	0,3	86,5	12,8	0,4	125	0,93	42330
9	Моторное топливо	—	—	—	0,4	86,5	12,6	0,5	35–45	0,95	41360
10	Керосин	—	—	—	0,2	86,0	13,7	0,1	428	0,8	42960
11	Бензин	—	—	—	0,05	85,0	14,9	0,05	80–90	0,72	43750

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчетные характеристики твердого топлива [15]

№ п/п	Месторожде- ние угля, топливо	Марка топлива, класс	Состав рабочей массы топлива, %							Выход лету- чих веществ V^r , %	Q_H^p , кДж/кг
			W^p	A^p	S^p	C^p	H^p	N^p	O^p		
1	Подмосковное	Б2,Р,К,О	32,0	25,2	2,7	28,7	2,2	0,6	8,6	48,0	9880
2	Бабаевское	Б1Р	57,6	7,6	0,5	25,4	2,4	0,2	8,0	65,0	9080
3	Барандатское	Б2,Р	37,0	4,4	0,2	41,9	2,9	0,4	13,2	48,0	14820
4	Воркутинское	Ж,Р,О	7,0	23,6	0,8	59,6	3,8	1,3	5,4	35,9	20600
5	Интинское	Д,Р,М	11,5	25,4	2,6	46,7	3,2	1,3	8,8	40,0	17540
6	Челябинское	Б3,Р,С	18,5	29,5	1,0	37,3	2,8	0,9	10,5	46,0	12770
7	Назаровское	Б2,Р	39,0	7,3	0,4	37,6	2,6	0,4	12,7	48,0	13020
8	Березовское	Б2,Р	33,0	4,7	0,2	44,3	3,0	0,4	14,4	48,0	15650
9	Боготольское	Б1,Р	44,0	6,7	0,5	34,3	2,4	0,4	11,7	48,0	17810
10	Интинское	Д,Р,М	11,5	25,4	2,6	46,7	3,2	1,3	8,8	40,0	17540
11	Итатское	Б1,Р	40,5	6,8	0,4	36,6	2,6	0,4	12,7	48,0	12810
12	Барандатское	Б2,Р	37,0	4,4	0,2	41,9	2,9	0,4	13,2	48,0	14820
13	Черногорское	Д,Р	14,0	15,5	0,5	54,9	3,7	1,4	10,0	43,0	20560
14	Норильское	СС,Р	4,0	26,8	0,5	59,2	3,3	1,2	4,9	24,0	22650
15	Абаканское	Б2,Р	33,5	8,0	0,4	41,5	2,9	0,6	13,1	48,0	14740
16	Харанорское	Б1,Р	40,5	8,6	0,3	36,4	2,3	0,5	11,4	44,0	11970
17	Бикинское	Б1,Р	44,5	22,1	0,3	26,8	2,3	0,7	10,8	56,0	7830

Окончание прил. 2

№ п/п	Месторож- дение угля, топливо	Название	Состав рабочей массы топлива, %							Выход лету- чих веществ V^r , %	Q_H^p , кДж/кг
			W^p	A^p	S^p	C^p	H^p	N^p	O^p		
1	Сланцы	ленинградские	11,5	60,6	1,7	20,6	2,7	0,1	2,8	85,9	7660
2		куйбышевские	17,5	59,2	3,4	13,5	1,8	0,3	4,3	80,0	4610
3	Торф	фрезерный	50,0	6,3	0,1	24,7	2,6	1,1	15,2	70,0	9250
4		кусовой	48,0	7,0	0,1	25,2	2,4	1,1	16,2	70,0	10210
5	Древесина	—	40,0	0,6	—	30,3	3,6	0,4	25,1	85,0	10210

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Расчетные характеристики природных газов [8,11,15]

№ п/п	Газопровод	Состав газа по объему, %							Q_H^C , кДж/нм ³	$\rho_{ну}$, кг/нм ³
		CH_4^C	$C_2H_6^C$	$C_3H_8^C$	$C_4H_{10}^C$	$C_5H_{12}^C$	N_2^C	CO_2^C		
1	Брянск–Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	1,6	0,1	37310	0,775
2	Бухара–Урал	94,2	2,5	0,4	0,2	0,1	2,6	–	36170	0,752
3	Газли–Коган	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	1,1	0,2	36590	0,750
4	Газли–Ташкент	94,0	2,8	0,4	0,3	0,1	2,0	0,4	36260	0,751
5	Гоголево–Полтава	85,8	0,2	0,1	0,1	–	13,7	0,1	30980	0,789
6	Дашава–Киев	98,9	0,3	0,1	0,1	–	0,4	0,2	35880	0,712
7	Джаркак–Ташкент	95,5	2,7	0,4	0,2	0,1	1,0	0,1	36680	0,748
8	Карабулак–Грозный	68,5	14,5	7,6	3,5	1,0	3,5	1,4	45850	1,036
9	Карадаг–Ереван	93,9	3,1	1,1	0,3	0,1	1,3	0,2	37090	0,766
10	Коробки–Волгоград	93,2	1,9	0,8	0,3	0,1	3,0	0,7	35840	0,766
11	Коробки–Камышин	81,5	8,0	4,0	2,3	0,5	3,2	0,5	41450	0,901
12	Кумертау–Магнитогорск	81,7	5,3	2,9	0,9	0,3	8,8	0,1	36800	0,858
13	Лижво–Вольск	93,2	2,6	1,2	0,7	–	2,0	0,3	37010	0,782
14	Оренбург–Совхозное	91,4	4,1	1,9	0,6	–	0,2	0,7	38020	0,883
15	Первомайск–Сторожевка	62,4	3,6	2,6	0,9	0,2	30,2	0,1	28300	0,952
16	Промысловка–Астрахань	97,1	0,3	0,1	–	–	2,4	0,1	35040	0,733
17	Рудки–Минск	95,6	0,7	0,4	0,2	0,2	2,8	0,1	35500	0,740
18	Саратов–Горький	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3,0	1,2	36130	0,786

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

**Теплота образования, испарения и сгорания некоторых веществ
при стандартных условиях ($P = 101300$ Па, $T = 298$ К) [7–14]**

Соединение	Название	Состояние	Теплота образования ΔH , кДж/моль	Теплота испарения $\Delta H_{\text{исп}}$, кДж/моль	Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}$, кДж/моль
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	Аллиловый спирт	ж	–131,8	39,99	1852
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	Ацетальдегид	ж	–166,4	27,0	1165
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	Ацетон	ж	–247,7	31,2	1829
C_6H_6	Бензол	ж	–34,8	30,6	3170
$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	Бутиловый спирт	ж	–369,5	43,8	2418
$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$	Валериановая кислота	ж	–548,1	44,02	2853
H_2O	Вода	ж	–285,8	44,0	–
C_4H_6	Диметилацетилен	ж	–119,8	26,53	2184
C_6H_{14}	2,2-Диметилбутан	ж	–211,9	26,36	4154

Окончание прил. 4

Соединение	Название	Состояние	Теплота образования ΔH , кДж/моль	Теплота испарения $\Delta H_{\text{исп}}$, кДж/моль	Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}$, кДж/моль
C_7H_{16}	2,4-Диметилпентан	Ж	-231,7	29,62	4887
CO_2	Диоксид углерода	Г	-394,6	—	—
C_3H_4	<i>n</i> -Метилацетилен	Г	-185,4	22,1	1850
CH_4O	Метиловый спирт	Ж	-238,7	37,7	715
$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	Метилэтилкетон	Ж	-273,3	34,8	2266
CO	Оксид углерода	Г	-110,5	—	282,8
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	<i>n</i> -Пропиловый спирт	Ж	-306,6	46,23	2017
$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	Уксусноэтиловый эфир	Г	-463,8	34,75	2255
$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	Фенол	Ж	-165,2	45,8	3058
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	Этиленгликоль	Ж	-456,5	58,7	1200
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	Этиловый спирт	Ж	-234,8	41,7	1367

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

**Нормальная скорость распространения пламени U_H при горении некоторых газов
в газозвушной смеси при давлении 101,3 кПа и температуре 20 °С [16]**

Горючий газ	Химическая формула	Температура самовоспламенения T_{CB} , К	Стехиометрическая смесь		
			Содержание компонента в смеси по объему, %		U_H , м/с
			газа	Воздуха	
Водород	H_2	783	29,5	70,5	1,6
Оксид углерода	CO	883	29,5	70,5	0,30
Метан	CH_4	810	9,5	90,5	0,28
Этилен	C_2H_4	813	6,5	93,5	0,50
Ацетилен	C_2H_2	608	7,75	92,25	1,00
Этан	C_2H_6	745	5,7	94,3	0,32
Пропан	C_3H_8	739	4,04	95,96	0,31
<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	678	3,14	96,86	0,30
Пропилен	C_3H_6	683	4,5	95,5	0,37
Бутилен	C_4H_8	657	3,4	96,6	0,38

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Максимальная нормальная скорость распространения пламени $U_{H. max}$ при горении некоторых газов в газозооушной смеси при давлении 101,3 кПа и температуре 20 °С [16]

Горючий газ	Смесь с максимальной нормальной скоростью распространения пламени		
	Содержание компонента в смеси по объему, %		$U_{H. max}$, м/с
	Газа	Воздуха	
Водород	42,0	58,0	2,67
Оксид углерода	43,0	57,0	0,42
Метан	10,5	89,5	0,37
Этан	6,3	93,7	0,40
Этилен	7,0	93,0	0,63
Ацетилен	10,0	90,0	1,35
Пропан	4,3	95,7	0,38
<i>n</i> -Бутан	3,3	96,7	0,37
Пропилен	4,8	95,2	0,44
Бутилен	3,7	96,3	0,43

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Пределы воспламенения газов в воздушных смесях при атмосферном давлении и температуре 20 °С [14]

Горючий газ	Химическая формула	Концентрационные пределы воспламенения, % газа по объему	
		нижний	верхний
Аммиак	NH_3	15,0	28,0
Ацетальдегид	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	4,0	55,0
Ацетилен	C_2H_2	2,3	81,0
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	2,2	13,0
Бензол	C_6H_6	1,4	7,1
<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	1,8	9,1
1-Бутен (бутилен)	C_4H_8	1,6	9,4
Водород	H_2	4,1	96,0
Гексан	C_6H_{14}	1,2	7,5
Гептан	C_7H_{16}	1,1	6,7
Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	6,2	16,0
Изобутан	C_4H_{10}	1,8	8,4
Изобутилен	C_4H_8	1,8	9,6
Изопентан	C_5H_{12}	1,3	7,6
Изопропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	2,0	12,0
<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	1,4	7,8
Толуол	C_7H_8	1,3	6,0
Этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	3,8	6,4
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	3,6	19,0
Этилен	C_2H_4	3,0	32,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Теплота сгорания и плотность углеводородов в жидком состоянии при температуре 20 °С [7–9, 11–13]

№ п/п	Углеводород	Химическая формула	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Теплота сгорания $Q_{\text{сг}} = Q_{\text{н}}^{\text{с}}$, кДж/кг	Плотность в жидком состоянии $\rho_{\text{ж}}$, кг/м ³
1	Ацетальдегид	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	44,053	27071	783,0
2	Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	58,08	31360	789,9
3	Бензол	C_6H_6	78,11	40580	879,0
4	1,3-Бутадиен	C_4H_6	54,09	44530	621,1
5	<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	58,123	45720	578,9
6	1-Бутен	C_4H_8	56,107	45290	594,5
7	<i>n</i> -Гексан	C_6H_{14}	86,177	45100	659,4
8	<i>n</i> -Гептан	C_7H_{16}	100,20	44920	683,8
9	Диэтилэфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	74,12	34147	715,0
10	Изобутан	C_4H_{10}	58,123	45580	560,0
11	Изопентан	C_5H_{12}	72,15	45240	626,2
12	Изопропилбензол	C_9H_{12}	120,20	46663	861,8
13	Метилловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	32,04	23839	810,0
14	Метилциклогексан	C_7H_{14}	98,188	43720	769,4
15	Метилциклопентан	C_6H_{12}	84,161	44030	748,6
16	2-Метилпентан	C_6H_{14}	86,18	45020	653,2
17	3-Метилпентан	C_6H_{14}	86,18	45050	664,3
18	<i>n</i> -Октан	C_8H_{18}	114,23	44790	702,6
19	<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	72,15	45100	659,4
20	1-Пентан	C_5H_{12}	70,134	45100	659,4

№ п/п	Углеводород	Химическая формула	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Теплота сгорания $Q_{\text{сг}} = Q_{\text{н}}^{\text{с}}$, кДж/кг	Плотность в жидком состоянии $\rho_{\text{ж}}$, кг/м ³
21	Пропан	C_3H_8	44,096	46340	501,1
22	Пропилен	C_3H_6	42,08	45604	519,3
23	<i>n</i> -Пропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	60,09	34405	804,4
24	Толуол	C_7H_8	92,14	40940	866,9
25	Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	60,05	13097	1049
26	Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	112,56	27315	1107
27	Циклогексан	C_6H_{12}	84,16	43830	778,6
28	Циклопентан	C_5H_{10}	70,134	44200	745,4
29	Этан	C_2H_6	30,069	51250	548,0
30	Этилбензол	C_8H_{10}	106,16	41320	867,0
31	Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	46,07	30562	789,3
32	Этилциклопентан	C_7H_{14}	98,186	44000	766,5

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Теплофизические свойства некоторых веществ [7–9, 12–14, 16]

Соединение	Химическая формула	Температура кипения $T_{\text{кип}}$, К	Теплота испарения $Q_{\text{исп}}$, кДж/кг	Удельная теплоемкость жидкой фазы $C_{\text{ж}}$, Дж/(кг·К)
Ацетальдегид	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	293,3	584	2180
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	329,3	525	2491
Бензол	C_6H_6	353,3	394	1674
Гексан	C_6H_{14}	341,9	332	2262
Гептан	C_7H_{16}	371,6	316	2180
Диэтилэфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	307,7	384	2320
Изобутан	C_4H_{10}	261,5	366	2240
Изопентан	C_5H_{12}	300,9	342	1647
Изопропилбензол	C_9H_{12}	370,3	316	1717
Метиловый спирт	CH_4O	337,7	1100	2547
<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	282,7	315	1670
<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	272,6	385	2240
<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	309,3	357	2670
<i>n</i> -Пропиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	370,3	750	766
Пропилен	C_3H_6	225,5	438	2430
Толуол	C_7H_8	383,6	412	1138
Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	391	406	2010
Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	404,8	313	1221

Учебное издание

Сергей Андреевич Карауш

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор М.В. Пересторонина

Оригинал-макет подготовлен автором

Подписано в печать 24.03.2015.

Формат 60×84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 6,98. Уч.-изд. л. 6,32. Тираж 100 экз. Заказ № 94.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.

634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.