

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

*А.Л. ШКАРОВСКИЙ*

**ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**  
**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСОБО ОПАСНЫХ И**  
**ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА**  
**ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Учебное пособие

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по университетскому политехническому образованию в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению подготовки магистров  
«Техносферная безопасность», «Строительство»*

Санкт-Петербург  
2012

УДК 662.61:502.36  
ББК 38.78н7.1+20.1+26.23  
К632

Рецензенты:

Член-корр. МАНЭБ, доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой теплогазоснабжения и охраны воздушного бассейна  
Санкт-Петербургского государственного  
архитектурно-строительного университета *А. Н. Воликов*  
Доктор технических наук, профессор  
президент Ассоциации «АВОК Северо-запад» *А. М. Гримитлин*

Шкаровский А. Л. **Охрана окружающей среды. Оценка воздействия особо опасных и технически сложных объектов на окружающую среду**: учебное пособие / А. Л. Шкаровский. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. – 99 с.

Рассмотрены основные вопросы охраны окружающей среды, исходя из задач, стоящих перед специалистами в области строительства особо опасных и технически сложных объектов. Сформулирована схема инженерно-экологических проблем во взаимоотношениях человека с окружающей средой. Особое внимание уделено сложным инженерным вопросам обезвреживания выбросов и отходов, включая твердые, жидкие и газообразные. Подробно рассмотрены методы обезвреживания газообразных выбросов. На конкретных примерах показаны принципы оптимизации установок термического обезвреживания производственных и вентиляционных парогазовых выбросов. Рассмотрены положения метода энергоэкологического анализа как основы практической инженерной деятельности в области охраны окружающей среды.

Рекомендовано в качестве учебного пособия по образовательным программам «Инженерная защита окружающей среды» направления подготовки магистров «Техносферная безопасность» и «Строительство особо опасных, технически сложных и уникальных зданий и сооружений» направления подготовки магистров «Строительство».

Пособие может быть полезно в системах повышения квалификации и в учреждениях дополнительного профессионального образования.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Шкаровский А. Л. , 2012

© Санкт - Петербургский государственный  
политехнический университет, 2012

ISBN 978-5-7422-1845-6

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Газообразное топливо.....	7
1.1. Состав горючих газов.....	7
1.2. Классификация горючих газов.....	9
Контрольные вопросы по разделу 1.....	11
2. Реакции горения.....	12
2.1. Стехиометрические уравнения.....	12
2.2. Кинетика реакции горения.....	13
2.3. Цепной механизм процесса горения.....	14
2.4. Тепловой эффект реакций горения.....	18
Контрольные вопросы по разделу 2.....	20
3. Материальный баланс реакций горения.....	21
3.1. Теоретический объем воздуха для горения.....	21
3.2. Коэффициент избытка воздуха.....	23
3.3. Объем продуктов сгорания.....	26
Контрольные вопросы по разделу 3.....	28
4. Характеристики горения.....	29
4.1. Температура горения.....	29
4.2. Температуры воспламенения и самовоспламенения.....	39
4.3. Пределы воспламенения.....	43
Контрольные вопросы по разделу 4.....	51
5. Процессы горения.....	53
5.1. Горение в неподвижной среде.....	53
5.2. Горение в ламинарном потоке.....	61
5.3. Горение в турбулентном потоке.....	64
Контрольные вопросы по разделу 5.....	69
6. Устойчивость горения.....	70
6.1. Основные понятия.....	70
6.2. Явление отрыва пламени.....	72
6.3. Явление проскока пламени.....	75
6.4. Принципы стабилизации пламени.....	81
Контрольные вопросы по разделу 6.....	84

7. Газовые горелки.....	85
7.1. Принципы эффективного и безопасного сжигания газов.....	85
7.2. Конструкции горелок.....	91
Контрольные вопросы по разделу 7.....	108
8. Охрана атмосферы при сжигании топлива.....	110
8.1. Продукты неполного сгорания.....	110
8.2. Оксиды азота.....	115
8.3. Подавление образования вредных веществ.....	117
Контрольные вопросы по разделу 8.....	132
9. Расчеты по эффективности использования топлива.....	134
9.1. Максимальное содержание трехатомных газов.....	134
9.2. Коэффициент избытка воздуха.....	139
9.3. Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания.....	143
9.4. Эффективность использования топлива.....	149
Контрольные вопросы по разделу 9.....	157
Библиографический список.....	158
Приложения.....	160
Приложение 1. Значения $RO_2^{\max}$ в зависимости от содержания $O_2$ и $RO_2$ в продуктах полного сгорания.....	161
Приложение 2. Значения коэффициента $Z$ для природного газа...	163

## **ВВЕДЕНИЕ**

Проектирование систем газоснабжения и установок для сжигания газа представляет собой очень ответственную инженерную задачу, поскольку принятые проектировщиком решения могут отразиться не только на здоровье, но и на жизни жильцов, пользователей, потребителей газа, которыми все мы являемся, часто даже не отдавая себе в этом отчета.

Именно на этапе расчета или подбора оборудования и устройств, где газ непосредственно используется, то есть горелок, котлов, печей и т. п., решается вопрос об эффективности его сжигания, безопасности для человека и окружающей среды. Поэтому трудно представить себе специалиста в области газоснабжения, который плохо ориентируется в вопросах, связанных со сжиганием газообразного топлива, не знает теоретических основ происходящих при горении процессов.

При этом нельзя не отметить, что столь важные вопросы в литературе по газоснабжению освещаются неполно, а иногда и противоречиво. Можно надеяться, что этот пробел хотя бы частично восполнит пособие, которое студент держит перед собой.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по магистерской программе «Строительство особо опасных объектов» направления подготовки магистров «Строительство», студентов высших и средних специальных учебных заведений, а также слушателей факультетов повышения квалификации инженерно-технических работников. Пособие будет также полезно для аспирантов, занимающихся проблематикой сжигания топлива.

При работе над пособием автор старался сохранить сбалансированное представление теоретических основ и информации по их практическому применению для расчетов и проектирования.

Поэтому в пособии содержатся примеры расчетов, связанных с рассматриваемыми задачами, а также многочисленные таблицы, необходимые для расчетов.

Слова глубокой признательности автор высказывает профессору Николаю Лукичу Стаскевичу, многолетний практический, научный и педагогический опыт которого был использован в настоящем пособии. Себя автор по-прежнему считает только его прилежными и преданным учеником.

# 1. ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО

## 1.1. СОСТАВ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

В состав газообразного топлива входят горючие и негорючие компоненты. Физико-химические и теплотехнические характеристики газового топлива обусловлены различием в составе горючих компонентов и наличием в газе негорючих газообразных компонентов и вредных примесей. Горючая часть топлива состоит из углеводородов, водорода и оксида углерода. В негорючую часть входят диоксид углерода, азот и кислород. К примесям относят сероводород, аммиак, цианистые соединения, водяные пары, нафталин, смолы, пыль и др. Негорючие газы и примеси являются балластом газового топлива, ухудшающим его теплофизические и эксплуатационные качества.

**Горючие компоненты.** *Углеводороды предельного ряда* составляют основную горючую часть природных газов и имеют общую химическую формулу  $C_nH_{2n+2}$ . Первый в ряду — метан ( $CH_4$ ), последующие — этан ( $C_2H_6$ ), пропан ( $C_3H_8$ ), бутан ( $C_4H_{10}$ ), пентан ( $C_5H_{12}$ ) и т. д. Метан является основным горючим компонентом всех природных газов.

Предельные углеводороды характеризуются высокой теплотой сгорания, не имеют цвета и запаха, не токсичны, но оказывают слабое наркотическое действие при большой концентрации (особенно высокомолекулярные углеводороды). При скоплениях в помещениях более 10 % по объему они способны вызывать удушье из-за недостатка кислорода воздуха. С увеличением молекулярной массы углеводородов повышаются их теплота сгорания, плотность и склонность к конденсации.

*Непредельные углеводороды* (общая формула  $C_nH_{2n}$ ) входят в значительных количествах в искусственные газы. Углеводороды этого ряда: этилен ( $C_2H_4$ ), пропилен ( $C_3H_6$ ), бутилен ( $C_4H_8$ ) — по своим свойствам сходны с предельными углеводородами.

*Водород* ( $H_2$ ) присутствует почти во всех искусственных газах. Это горючий газ без цвета, запаха и вкуса, не токсичен. В реакциях горения водород весьма активен.

*Оксид углерода* (CO) — горючий газ без цвета, запаха и вкуса, тяжелее воздуха, очень токсичен. Содержится в больших количествах в искусственных газах, а также образуется при неполном сгорании топлива.

**Негорючие компоненты.** *Диоксид углерода* ( $CO_2$ ) не имеет цвета и запаха, со слабым кисловатым вкусом, мало токсичен, но при скоплении в помещении способен вызвать удушье из-за недостатка кислорода воздуха. Химически инертен.

*Азот* ( $N_2$ ) — газ без цвета, запаха и вкуса, не горит и не поддерживает горение, не токсичен. При высоких температурах, например, в топках промышленных агрегатов, возможно образование оксидов азота, являющихся высокотоксичными компонентами продуктов сгорания.

*Кислород* ( $O_2$ ) — газ без цвета, запаха и вкуса, не горит, но поддерживает горение. Поэтому его присутствие в газе уменьшает потребность в доставке окислителя в зону горения извне. Содержится в небольших количествах в некоторых искусственных газах. В присутствии влаги активно способствует коррозии металла газопроводов и арматуры.

**Примеси.** *Сероводород* ( $H_2S$ ) — бесцветный горючий газ с характерным запахом тухлых яиц. Может содержаться в искусственных и плохо очищенных природных газах. Как сам сероводород, так и продукты его сгорания (оксиды серы  $SO_2$  и  $SO_3$ ), весьма токсичны и агрессивны, образуя с железом пиррофорные соединения, способные самовоспламеняться в воздухе.

*Аммиак* ( $NH_3$ ) — бесцветный газ с острым запахом нашатырного спирта, вредная токсичная примесь некоторых искусственных газов.

*Цианистые соединения*, прежде всего синильная кислота (HCN), могут образоваться в коксовых газах в результате взаимодействия

углерода топлива с аммиаком. При нормальных условиях HCN — бесцветная легкая жидкость с высокими токсичными и коррозионными свойствами.

*Пары воды* могут содержаться в недостаточно осушенных газах. При высоких давлениях они образуют с тяжелыми углеводородами кристаллогидратные соединения, внешне напоминающие частички снега или льда, которые закупоривают газопроводы.

*Нафталин, смолы и пыль*, откладываясь на внутренних стенках газопроводов, уменьшают их сечения, а при плохой очистке газа закупоривают отдельные участки газопроводов, преждевременно засоряют фильтры, арматуру и другие устройства.

## 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

В практике газоснабжения применяются различные газы, отличающиеся по происхождению, химическому составу и физическим свойствам. По происхождению горючие газы разделяются на естественные (природные) и искусственные, вырабатываемые из твердого и жидкого топлива. **Природные** газы добываются из скважин чисто газовых месторождений, а также нефтяных месторождений попутно с нефтью и газоконденсатных месторождений.

Газы чисто газовых месторождений преимущественно состоят из метана (до 99 %) с небольшим содержанием тяжелых углеводородов и негорючих примесей. Они характеризуются относительным постоянством состава и теплотой сгорания.

Газы газоконденсатных месторождений представляют собой месторождения в виде смеси различных предельных углеводородов, в основном метана (80...94 %), и более тяжелых гомологов вплоть до пентана, гексана, газового бензина и керосиновых фракций, причем по массе их количество может достигать 25 %. Газоконденсатные месторождения залегают на большой глубине. Они образовались в результате процесса обратного испарения конденсата, протекающего при высоких давлениях и температурах. Особенности разработки

газоконденсатных месторождений заключаются в том, что обработка и переработка газа (выделение тяжелых фракций) производится на промысле; применяются дорогостоящие аппаратура и трубопроводы из-за высокого давления, необходимого для вытеснения газа и транспортировки. В газах газонефтяных месторождений наряду с метаном содержится значительное количество тяжелых углеводородов (пропан и бутан).

Природный газ не имеет запаха, в связи с этим до подачи в сеть его одорируют, т. е. добавляют небольшое количество органических веществ (одорантов), обладающих резким запахом, что позволяет обнаруживать утечки и присутствие газа в воздухе.

**Искусственные** газы вырабатывают на специальных газобензиновых заводах, а также на заводах по переработке нефти или получают как побочный продукт при использовании угля на металлургических заводах.

Для газоснабжения населенных пунктов из искусственных газов используют главным образом сжиженные углеводородные газы, которые представляют собой смесь, состоящую преимущественно из пропана, нормального бутана и изобутана. В отдельных случаях в состав смеси также входят пропилен, бутилен и некоторые другие углеводороды. Характерным свойством углеводородных газов и их смесей является их относительно легкий переход в жидкое состояние при нормальной температуре и небольшом избыточном давлении. При снижении давления эти газы переходят обратно в газообразное состояние. Таким образом, углеводородные фракции, находясь в жидком состоянии, приобретают преимущества, свойственные жидкостям при хранении и транспорте. Находясь в газообразном состоянии, они приобретают преимущества, свойственные газам при их распределении по сетям и сжигании.

Основным источником получения сжиженных газов являются попутные нефтяные газы, которые подвергаются переработке с целью получения из них бензина и сжиженных газов. Другим источником

получения сжиженных газов являются заводы по переработке нефти. Большинство искусственных каменноугольных газов содержит значительное количество высокотоксичного оксида углерода. Наличие в газе оксида углерода и других ядовитых веществ весьма нежелательно, так как они усложняют производство эксплуатационных работ и даже небольшие утечки газа в помещениях могут создавать опасность отравления.

В промышленности используются искусственные горючие газы, полученные в результате термической переработки твердого или жидкого топлива. Газы высокотемпературной (около 1000 °С) и среднетемпературной (500...600 °С) перегонки получают нагреванием твердого или жидкого топлива без доступа воздуха. Получение горючих газов по этому способу основано на пирогенетическом разложении топлива под воздействием температуры. К этой группе относятся газы коксохимических, коксогазовых, газосланцевых, сланце- и нефтеперерабатывающих заводов. Горючую часть этих газов составляют водород (40...60 %).

### **Контрольные вопросы по разделу 1**

- 1. Назовите основные горючие компоненты газообразного топлива.*
- 2. Какие балластные и вредные примеси входят в состав природных газов?*
- 3. По каким основным признакам классифицируются горючие газы, используемые в системах газораспределения и газопотребления населенных пунктов?*
- 4. Назовите виды природных газов.*
- 5. Как изменяется состав природного газа в зависимости от вида месторождения?*
- 6. Какие искусственные газы используются в коммунально-бытовом секторе?*

## 2. РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ

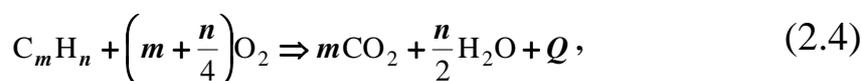
### 2.1. СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ

*Горением* называется быстро протекающая химическая реакция взаимодействия горючих компонентов топлива с кислородом, которой сопутствует интенсивное выделение теплоты, вызывающее резкий рост температуры. В отличие от обычных химических реакций с высоким экзотермическим эффектом при горении наблюдается пламя, представляющее собой зону реакций, происходящих в газообразной фазе.

Теоретический итог реакций горения описывается при помощи так называемых стехиометрических уравнений. Эти уравнения качественно и количественно характеризуют вещества, вступающие в реакцию, и продукты, образующиеся в результате нее. В случае реакций горения их результат дополняется тепловым эффектом, то есть количеством теплоты, выделяющимся во время реакции. Рассмотрим примеры стехиометрических уравнений реакций горения водорода, оксида углерода и метана (без учета теплоты конденсации образующегося водяного пара):



Реакция горения любого углеводорода может быть выражена универсальным уравнением



где  $m$  – количество атомов углерода в молекуле углеводорода;  $n$  – количество атомов водорода в молекуле углеводорода;  $Q$  – тепловой эффект реакции (теплота сгорания).

Для распространенных компонентов горючих газов стехиометрические уравнения и тепловой эффект их реакции с кислородом приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Стехиометрические уравнения и тепловой эффект  
реакций горения сухих газов в кислороде**

Наименование газов	Стехиометрическое уравнение горения	Теплота сгорания	
		$Q_{в}$ , МДж/м <sup>3</sup>	$Q_{н}$ , МДж/м <sup>3</sup>
Водород	$H_2 + 0,5O_2 \Rightarrow H_2O$	10,785	10,785
Оксид углерода	$CO + 0,5O_2 \Rightarrow CO_2$	12,627	12,627
Метан	$CH_4 + 2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O$	39,758	35,831
Этан	$C_2H_6 + 3,5O_2 \Rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	69,668	63,765
Пропан	$C_3H_8 + 5O_2 \Rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	99,143	91,272
Бутан	$C_4H_{10} + 6,5O_2 \Rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	128,493	118,675
Пентан	$C_5H_{12} + 8O_2 \Rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	157,905	146,287
Этен	$C_2H_4 + 3O_2 \Rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	63,011	59,076
Пропен	$C_3H_6 + 4,5O_2 \Rightarrow 3CO_2 + 3H_2O$	91,942	86,039
Бутен	$C_4H_8 + 6O_2 \Rightarrow 4CO_2 + 4H_2O$	121,417	113,546
Пентен	$C_5H_{10} + 7,5O_2 \Rightarrow 5CO_2 + 5H_2O$	150,725	140,928
Ацетилен	$C_2H_2 + 2,5O_2 \Rightarrow 2CO_2 + H_2O$	58,008	56,044

Необходимо подчеркнуть, что стехиометрические уравнения представляют только конечный результат горения и его суммарный тепловой эффект, однако по этим уравнениям нельзя судить ни о скорости протекания реакции, ни о механизме химических превращений.

## 2.2. КИНЕТИКА РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ

Скорость химической реакции  $W$ , моль/(м<sup>3</sup>·с), можно определить как изменение концентрации компонентов за единицу времени в единице объема. Для необратимых реакций, происходящих при сжигании горючих газов, скорость их протекания можно описать следующей зависимостью:

$$W = -\frac{dC}{d\tau} = kC_1C_2, \quad (2.5)$$

где  $k$  – константа скорости химической реакции;  $C_1, C_2$  – концентрация реагирующих компонентов, моль/м<sup>3</sup> (знак «←» в дифференциальной форме указывает на уменьшение концентрации исходных реагентов с течением времени).

При организованном сжигании топлива в технических устройствах концентрации реагирующих веществ можно условно считать постоянными, поскольку в зону горения происходит непрерывный приток топлива и окислителя. В этих условиях значение константы скорости реакции определяется экспоненциальным уравнением *Аррениуса*:

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (2.6)$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель, который характеризует данную реакцию и в первом приближении принимается постоянным;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура в реакционной зоне, К.

Уравнение (2.6) показывает, что скорость химической реакции зависит как от свойств реагентов ( $R, E$ ), так и от температуры, быстро увеличиваясь с ее ростом.

### 2.3. ЦЕПНОЙ МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Быстрое протекание реакций горения вызвано не только ускоряющим действием температуры, но и цепным механизмом этих реакций. Как известно, любая химическая реакция связана с перегруппировкой химических связей между атомами при переходе реагентов из начального состояния в конечное. Такая перегруппировка требует, чтобы реагирующие вещества обладали значительным количеством избыточной энергии (энергией активации), необходимой для разрыва существующих внутримолекулярных связей. Однако преобразование исходных реагентов в конечные продукты реакции происходит не одностадийно, а в несколько этапов, с образованием и распадом промежуточных химически активных частиц: атомов и радикалов, генерируемых самой реакцией.

Эти частицы легко реагируют с исходными реагентами, а также между собой, приводя к образованию, как конечных продуктов, так и новых радикалов, способных повторить такую же цепь реакций или инициировать новую. Нарастающее самопроизвольное генерирование активных частиц приводит к «разгону» химической реакции, воспринимаемому как взрыв всей реагирующей смеси.

Рассмотрим цепной механизм взаимодействия водорода с кислородом, как один из наиболее простых и изученных. Зарождение цепи при этой реакции связано с образованием атомарного водорода в результате диссоциации водорода молекулярного:



Элемент  $M$  следует здесь понимать как любой источник энергии активации. Это может быть открытое пламя, раскаленное тело, электрическая или механическая искра и т. п. Отметим, что аналогичное зарождение цепи реакции через атомарный кислород маловероятно, учитывая очень высокую энергию диссоциации молекулярного кислорода. Схема дальнейшего развития цепной реакции приведена на рис. 2.1.

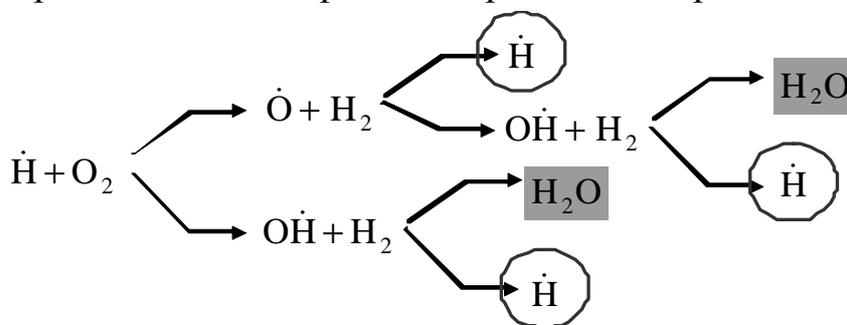
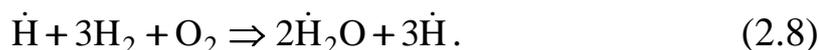


Рис. 2.1. Единичный цикл цепного механизма взаимодействия водорода с кислородом

Итогом такого единичного цикла является реакция:



Таким образом, каждый водородный радикал приводит к образованию двух частиц конечного продукта реакции в виде молекул воды и **трех** новых радикалов. В принципе каждый радикал может привести к развитию цепи в результате благоприятного соударения с

молекулой кислорода, однако таким же вероятным является неблагоприятное столкновение двух радикалов, приводящее к образованию стабильной молекулы водорода:



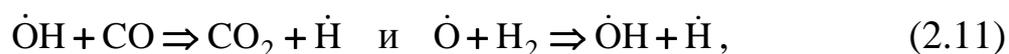
Свойством любого газообразного топлива является то, что в соответствующим образом приготовленной смеси с воздухом (окислителем) количество благоприятных столкновений, содействующих развитию цепи реакции, превышает количество неблагоприятных соударений, которые замыкают цепь. Поэтому воспламенение гомогенной газовой смеси в любой точке приводит к быстрому распространению пламени на весь объем смеси, называемому взрывом.

Механизм реакции оксида углерода с кислородом похож на описанный выше, однако он более сложен вследствие попутно развивающихся реакций. Сухая смесь оксида углерода с кислородом вообще не реагирует до температуры 700 °С. При более высокой температуре протекает медленная гетерогенная реакция. Распространение реакции на весь объем смеси происходит только при наличии в смеси некоторого количества водяного пара или атомарного водорода. Поэтому, как и в случае горения водорода, зарождение цепи начинается от столкновения образовавшегося при диссоциации атома водорода со стабильной молекулой кислорода:



Это означает образование сразу двух радикалов, которые легко реагируют как с молекулами оксида углерода по схеме, показанной на рис. 2.2, так и с молекулами водорода (см. рис. 2.1).

Возможны и другие варианты развития цепи, которые в итоге приводят к образованию стабильной молекулы диоксида углерода:



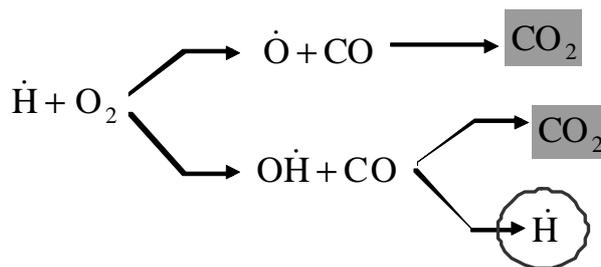
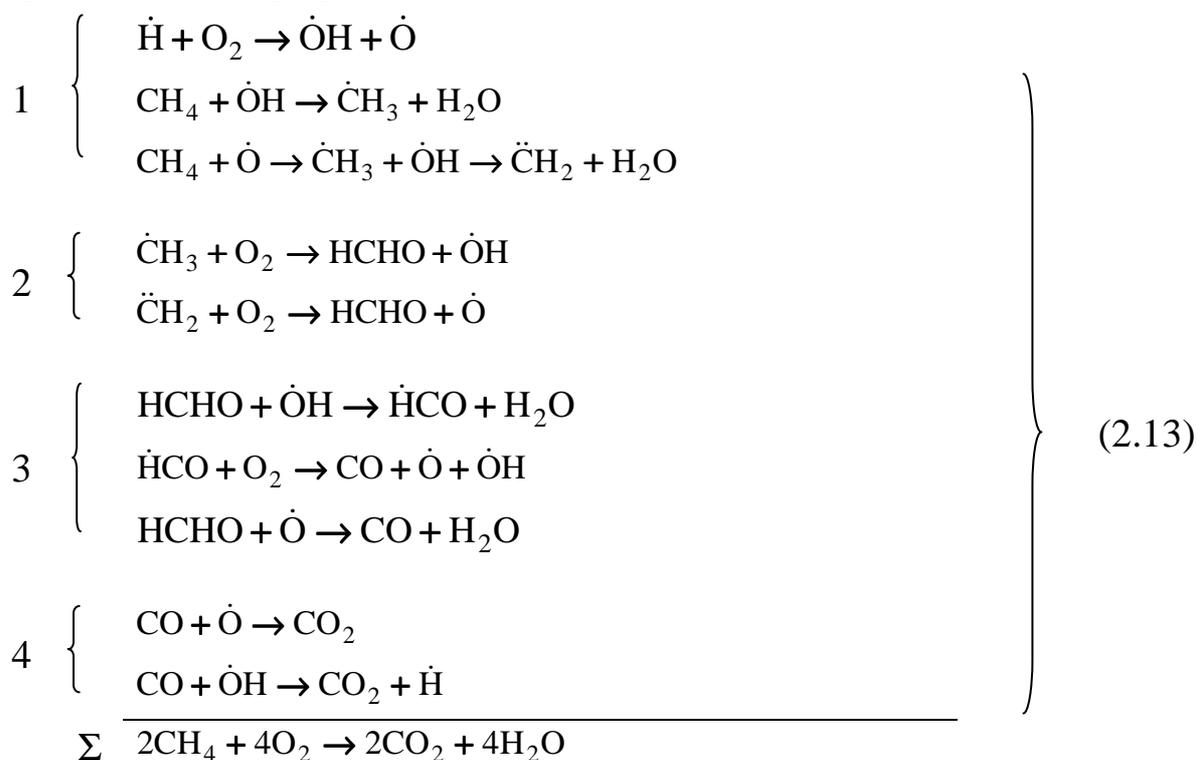


Рис. 2.2. Возможный единичный цикл цепного механизма реакции оксида углерода с кислородом

Механизм высокотемпературного окисления углеводородов имеет еще более сложный цепной характер и связан с промежуточным образованием атомарного водорода, кислорода и различных радикалов. Этот процесс осложняется тем, что при локальном недостатке кислорода или неоднородности газовой смеси одновременно с реакциями окисления протекают процессы термического разложения углеводородов.

Даже при горении самого простого из углеводородов — метана — цепной механизм его сгорания может состоять из следующего вероятного набора реакций:



В действительности процесс горения метана еще более сложен. Одновременно с процессами окисления при высокой температуре и недостатке кислорода протекают реакции термического разложения углеводородов. Эти процессы могут приводить к образованию не только участвующих в схеме (2.13) радикалов, но также и активных частиц в виде  $\ddot{C}N$  и  $C_2$ , что еще более разнообразит дальнейшее протекание цепных реакций.

## 2.4. ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ

*Тепловым эффектом* реакции горения или *теплотой сгорания* называется количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы количества топлива (до конечных продуктов окисления). Такой единицей может быть 1 моль (молярная теплота сгорания,  $Q_\mu$ , МДж/моль), 1 кг (массовая теплота сгорания  $Q$ , МДж/кг), или 1 м<sup>3</sup> (объемная теплота сгорания  $Q'$ , МДж/м<sup>3</sup>). Для газообразного топлива в теплотехнических расчетах обычно используется теплота сгорания, отнесенная к 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных физических условиях (0 °С; 101325 Па). Исключением является сжиженный газ, который при транспортировке в жидком состоянии характеризуется массовой теплотой сгорания, а при поступлении в газовую сеть и последующем сжигании — объемной теплотой сгорания. При необходимости пересчета теплоты сгорания на другую единицу количества вещества используются следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} Q_\mu &= Q \cdot \mu = Q' \cdot V_\mu \\ Q' &= \frac{Q_\mu}{V_\mu} = Q \cdot \rho \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

где  $\mu$  — масса моля газа, кг/моль;  $\rho$  — плотность газа при нормальных физических условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $V_\mu$  — молярный объем газа, м<sup>3</sup>/моль, который при нормальных физических условиях допускается принимать, как для идеального газа, т. е.  $V_\mu = 22,4136$  м<sup>3</sup>/моль.

Различают высшую и низшую теплоту сгорания. *Высшая теплота сгорания*  $Q_v$ , МДж/м<sup>3</sup>, соответствует условиям, при которых

водяной пар, **являющийся продуктом сгорания**, полностью конденсируется. В технике конденсация водяных паров отходящих газов происходит только в определенных случаях: например, при контактном нагреве воды и в так называемых конденсационных котлах.

*Низшая теплота сгорания*  $Q_n$ , МДж/м<sup>3</sup>, соответствует условиям, при которых водяной пар, **являющийся продуктом сгорания**, остается в газообразном состоянии. Таким образом, низшая теплота сгорания всегда меньше высшей на величину скрытой теплоты парообразования (конденсации) водяных паров, образовавшихся в результате реакций горения (около 2,5 МДж на каждый килограмм водяных паров с учетом некоторого дальнейшего охлаждения конденсата). В профессиональном техническом языке, а нередко и в научно-технической литературе теплота сгорания называется *калорийностью* или *теплотворной способностью* топлива.

Значения теплоты сгорания сухих газов приведены в табл. 2.1. Однако газообразное топливо, как правило, является смесью горючих и негорючих газов. Для расчета теплоты сгорания (как низшей, так и высшей) смеси сухих газов, состоящей из  $n$  компонентов, используется правило адиттивности (негорючие компоненты топлива учитываются в формуле с теплотой сгорания, равной нулю, т. е. не учитываются):

$$Q = \sum_{i=1}^n r_i Q_i, \quad (2.15)$$

где  $r_i$  – объемная доля компонента в составе горючего газа;  $Q_i$  – соответствующая теплота сгорания (высшая или низшая) этого компонента.

Теплота сгорания влажного газа всегда отличается от приведенных для сухих газов значений. В технических и коммерческих расчетах может возникнуть также необходимость пересчета теплоты сгорания из нормальных физических условий на действительные условия. Для определения значения теплоты сгорания влажного газа  $Q_{n(T,p)}^B$ ,

МДж/м<sup>3</sup>, при абсолютном давлении  $p$ , Па, и температуре  $T$ , К, используется выражение

$$Q_{H(T,p)}^B = Q_H \frac{p \cdot 273,15}{101325 \cdot T} \left[ 1 + \frac{\Phi \cdot p_{H_2O}}{p} \left( 1 + \frac{3,475}{Q_H} \right) \right], \quad (2.16)$$

где  $Q_H$  – теплота сгорания сухого газа при нормальных условиях, МДж/м<sup>3</sup>;  $\Phi$  – относительная влажность газа (безразмерная величина);  $p_{H_2O}$  – парциальное давление водяного пара, Па.

Для предварительно осушенных газов в городских системах газораспределения и газопотребления значение комплекса в квадратных скобках мало отличается от единицы и в технических расчетах может не учитываться.

### Пример 2.1

Объемный состав природного газа, % об.:  $CH_4 = 97$ ;  $C_2H_6 = 2$ ;  $C_3H_8 = 0,3$ ;  $C_4H_{10} = 0,2$ ;  $N_2 = 0,3$ . Определить низшую теплоту сгорания.

### Решение

По выражению (2.15), используя данные табл. 2.1 для отдельных компонентов, получим  $Q_H$ , МДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_H = 35,831 \cdot 0,97 + 63,765 \cdot 0,02 + 91,272 \cdot 0,003 + 118,675 \cdot 0,002 = 36,54$$

## Контрольные вопросы по разделу 2

1. Что такое горение газа?
2. Какими признаками характеризуются реакции горения газа?
3. Приведите примеры стехиометрических реакций горения.
4. Как протекают цепные реакции горения?
5. От чего зависит скорость реакции горения газа?
6. Что такое высшая и низшая теплота сгорания газа?
7. Как изменяется значение теплоты сгорания газа в зависимости от физических условий?

## 3. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ

### 3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОБЪЕМ ВОЗДУХА ДЛЯ ГОРЕНИЯ

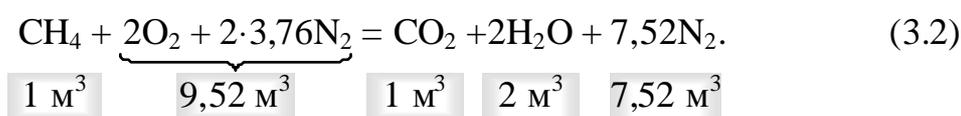
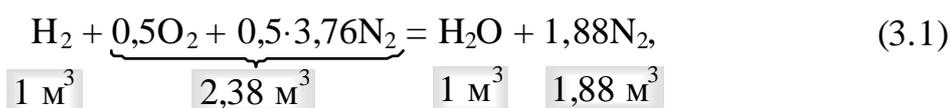
Стехиометрические уравнения учитывают теоретическое взаимодействие горючих компонентов непосредственно с кислородом. В реальных условиях кислород в зону реакции подается с воздухом, как его составная часть. Если пренебречь незначительным содержанием диоксида углерода и инертных газов в составе сухого воздуха, то можно считать, что воздух является смесью кислорода и азота в соотношении, поданном в табл. 3.1.

Таблица 3.1

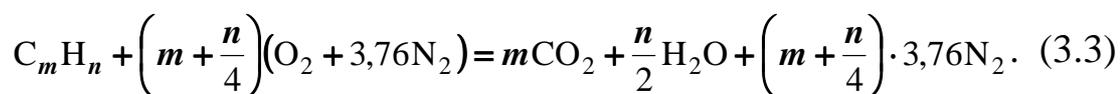
**Теоретический состав сухого воздуха**

Компонент	Объемный состав, %	Массовый состав, %
кислород O <sub>2</sub>	21,0	23,2
азот N <sub>2</sub>	79,0	76,8

Следовательно, чтобы доставить в зону горения 1 м<sup>3</sup> кислорода, в действительности необходимо доставить туда  $\frac{100}{21} = 4,76$  м<sup>3</sup> воздуха, поскольку каждому 1 м<sup>3</sup> кислорода сопутствует  $\frac{79}{21} = 3,76$  м<sup>3</sup> азота, не принимающего участия в горении. Поскольку 1 моль любого газа (если считать его идеальным газом) в одинаковых условиях занимает одинаковый объем, реакции горения водорода и метана **в сухом воздухе** можно представить следующим образом:



Аналогичным образом реакцию горения произвольного углеводорода **в сухом воздухе** можно представить в виде:



Значения теоретического объема кислорода и воздуха для горения различных газов и соответствующего объема продуктов сгорания приведены в табл. 3.2.

Для сложных газов теоретический объем сухого воздуха для горения  $V_B^{т.с.}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, можно определить, используя стехиометрические объемы для отдельных компонентов (подставляя в выражение их процентное содержание в газе):

$$V_B^{т.с.} = \frac{4,76}{100} (0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + 6C_4H_8 - O_2), \quad (3.4)$$

где H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> – содержание в газе горючих компонентов, O<sub>2</sub> – содержание кислорода, % об.

Таблица 3.2

**Теоретический объем кислорода и сухого воздуха для горения и объем продуктов сгорания для различных горючих газов**

Газ	Объем окислителя, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа		Объем продуктов сгорания, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа			
	O <sub>2</sub>	Воздуха	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Всего
Водород	0,5	2,38	—	1,0	1,88	2,88
Диоксид углерода	0,5	2,38	1,0	—	1,88	2,88
Метан	2,0	9,52	1,0	2,0	7,52	10,52
Этан	3,5	16,66	2,0	3,0	13,16	18,16
Пропан	5,0	23,80	3,0	4,0	18,80	25,80
Бутан	6,5	30,94	4,0	5,0	24,44	33,44
Пентан	8,0	38,08	5,0	6,0	30,08	41,08
Этилен	3,0	14,28	2,0	2,0	11,28	15,28
Попилен	4,5	21,24	3,0	3,0	16,92	22,92
Бутилен	6,0	28,56	4,0	4,0	22,56	30,56
Пентилен	7,5	35,70	5,0	5,0	28,20	38,20
Ацетилен	2,5	11,90	2,0	1,0	9,40	12,40

Слагаемые  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  не входят в состав природного газа, они приведены для того случая, когда используется искусственный газ или смесь природного и искусственного газа. Согласно ГОСТ 5542—87\* содержание кислорода в природном газе должно быть не более 1 %.

Кислород в формуле (3.4) участвует как отрицательная величина, поскольку его содержание в топливе уменьшает потребность в доставке окислителя с воздухом.

Теоретический объем влажного воздуха для горения всегда больше, чем теоретический объем сухого воздуха, приведенный в табл. 3.2 или определенный по формуле (3.4), на величину объема содержащегося в воздухе водяного пара. Объем 1 кг водяных паров при нормальных условиях составляет  $1,24 \text{ м}^3$ . Таким образом, если абсолютная влажность воздуха равна  $d_{\text{в}}$ ,  $\text{кг/м}^3$ , то искомый объем влажного воздуха для горения  $V_{\text{в}}^{\text{т.вл.}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа, можно определить по выражению:

$$V_{\text{в}}^{\text{т.вл.}} = V_{\text{в}}^{\text{т.с.}} + 1,24d_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}}^{\text{т.с.}} = (1 + 1,24d_{\text{в}}) \cdot V_{\text{в}}^{\text{т.с.}}. \quad (3.5)$$

Если состав топлива неизвестен, однако известна его низшая теплота сгорания  $Q_{\text{н}}$ ,  $\text{МДж/м}^3$ , то теоретический объем воздуха для горения можно ориентировочно определить по выражению:

$$V_{\text{в}}^{\text{т.}} = 0,27Q_{\text{н}}. \quad (3.6)$$

### 3.2. КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Если воздух или кислород доставлять до зоны горения в теоретически необходимом (стехиометрическом) количестве, то полное сгорание топлива обеспечить невозможно. В конечной фазе горения молекулы топлива и окислителя будут настолько разделены массой балласта и уже образовавшихся продуктов сгорания, что не смогут войти в контакт и прореагировать, несмотря на то, что их общее

количество соответствует стехиометрическому балансу. Так возникает явление *химического недожога*.

Для обеспечения полного сгорания горючих компонентов действительное количество влажного воздуха, доставляемого в зону горения  $V_B^{\text{вл.}}$ , должно быть несколько больше, чем теоретическое:

$$V_B^{\text{вл.}} = \alpha \cdot V_B^{\text{т.вл.}} \quad (3.7)$$

Безразмерная величина  $\alpha$  называется *коэффициентом избытка воздуха (избытка окислителя)*. Значение  $\alpha$  зависит от вида топлива, конструкции горелки и топки, которые определяют качество смешения топлива и воздуха в реакционной зоне.

Как следует из вышеизложенного, залогом совершенного сжигания топлива в большинстве технологических процессов является условие  $\alpha > 1,0$ , поскольку в противном случае неизбежен химический недожог. С другой стороны, избыток воздуха снижает эффективность использования топлива, поскольку увеличивает потери теплоты с отходящими газами (см. разд. 9). Поэтому усилия конструкторов горелок направлены на обеспечение полного сгорания топлива при как можно меньшем значении  $\alpha$ .

Для распространенных конструкций газовых горелок коэффициент избытка воздуха колеблется в пределах 1,05...1,15. Исключением являются промышленные процессы сжигания топлива, в которых технологической задачей является создание в рабочих камерах теплотехнических устройств нейтральной или слабоокислительной среды. К ним относятся металлургические процессы и высокотемпературная обработка металлов.

Определенным парадоксом является факт, что, будучи совершенно необходимым, избыток воздуха не используется, а только обеспечивает условия полного сгорания топлива. Весь избыток воздуха полностью переходит в состав отходящих газов.

### Пример 3.1

Определить теоретический и действительный объем воздуха для сжигания природного газа, имеющего состав, приведенный в примере 2.1. Температура воздуха 20 °С, а относительная влажность  $\phi = 60\%$ . Используемая горелка работает с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ .

#### Решение

1. Предварительно определяем абсолютную влажность воздуха. Для этого сначала по  $i, d$ -диаграмме влажного воздуха для  $t = 20\text{ °С}$  и  $\phi = 60\%$  определяем влагосодержание  $x = 8,8\text{ г/кг}$  сухого воздуха и плотность воздуха  $\rho = 1,2\text{ кг/м}^3$ . Отсюда можно вычислить абсолютную влажность воздуха:

$$d_{\text{в}} = 8,8 \cdot 1,2 \cong 10,5\text{ г/м}^3 = 0,01\text{ кг/м}^3.$$

2. Теоретический объем сухого воздуха для горения определяется по выражению (3.4):

$$V_{\text{в}}^{\text{т.с.}} = \frac{4,76}{100} (2 \cdot 97 + 3,5 \cdot 2 + 5 \cdot 0,3 + 6,5 \cdot 0,2) = 9,7\text{ м}^3/\text{м}^3\text{ газа.}$$

3. Теоретический объем влажного воздуха для горения по выражению (3.5) составит

$$V_{\text{в}}^{\text{т.вл.}} = (1 + 1,24 \cdot 0,01) 9,7 = 9,82\text{ м}^3/\text{м}^3\text{ газа.}$$

4. Окончательно для известного коэффициента избытка воздуха по выражению (3.7) определяем действительный объем влажного воздуха для полного сжигания газа:

$$V_{\text{в}}^{\text{вл.}} = \alpha \cdot V_{\text{в}}^{\text{т.вл.}} = 1,1 \cdot 9,82 = 10,8\text{ м}^3/\text{м}^3\text{ газа.}$$

5. С целью сравнения методов расчета определим объем воздуха для горения по приближенному выражению (3.6), учитывая, что теплота сгорания топлива, определенная в примере 2.1, составляет  $Q_{\text{н}} = 36,54\text{ МДж/м}^3$ :

$$V_B^T = 0,27Q_H = 0,27 \cdot 36,54 = 9,86 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

Как видим, приближенная формула дает результат, весьма близкий к значению, полученному по более точному методу.

### 3.3. ОБЪЕМ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Теоретические объемы продуктов, образующихся при горении различных газов в сухом воздухе, в соответствии с выражениями (3.1)...(3.3), приведены в табл. 3.1. Действительный объем продуктов сгорания углеводородных газов сложного состава,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа, во **влажном воздухе**, подаваемом с **необходимым избытком**, можно определить по приводимым ниже формулам, подставляя в них содержание соответствующих компонентов горючего газа, % по объему.

Диоксид углерода:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m C_m \text{H}_n). \quad (3.8)$$

Водяной пар:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(\text{H}_2 + \sum \frac{n}{2} C_m \text{H}_n) + 1,24(d_\Gamma + \alpha d_B V_B^{\text{T.C.}}), \quad (3.9)$$

где  $d_\Gamma$  – абсолютная влажность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Азот:

$$V_{\text{N}_2} = 0,01\text{N}_2 + 0,79\alpha V_B^{\text{T.C.}}. \quad (3.10)$$

Кислород:

$$V_{\text{O}_2} = 0,01\text{O}_2 + 0,21(\alpha - 1)V_B^{\text{T.C.}}. \quad (3.11)$$

Суммарный объем влажных продуктов сгорания  $V_{\text{п.с.}}^{\text{вл.}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа:

$$V_{\text{п.с.}}^{\text{вл.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (3.12)$$

Суммарный объем сухих продуктов сгорания  $V_{\text{п.с.}}^{\text{с.}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа, после конденсации водяных паров, **являющихся продуктом горения:**

$$V_{\text{п.с.}}^{\text{с.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (3.13)$$

Теоретический объем сухих продуктов сгорания  $V_{\text{п.с.}}^{\text{т.с.}}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, (в стехиометрических условиях) получаем по выражению (3.13), подставляя в формулы (3.10) и (3.11) значение  $\alpha = 1,0$ .

$$V_{\text{п.с.}}^{\text{т.с.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^{\alpha=1} + V_{\text{O}_2}^{\alpha=1}. \quad (3.14)$$

### Пример 3.2

Определить объем сухих и влажных продуктов сгорания природного газа. Состав газа и условия сжигания приведены в примерах 2.1 и 3.1.

#### Решение

1. Объем диоксида углерода определяем по формуле (3.8):

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(0,2 + 97 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2) = 1,03 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

2. Объем водяных паров определяем по формуле (3.9):

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(2 \cdot 97 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,2) + 1,24 \cdot 1,1 \cdot 0,01 \cdot 9,7 = 2,15 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

3. Объем азота определяем по формуле (3.10):

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot 0,3 + 0,79 \cdot 1,1 \cdot 9,7 = 8,4 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

4. Объем кислорода определяем по формуле (3.11):

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(1,1 - 1) \cdot 9,7 = 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

5. Объем сухих продуктов сгорания по выражению (3.13) составит

$$V_{\text{п.с.}}^{\text{с.}} = 1,03 + 8,4 + 0,2 = 9,63 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

6. Объем влажных продуктов сгорания по выражению (3.12) составит

$$V_{\text{п.с.}}^{\text{вл.}} = 9,634 + 2,15 = 11,78 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

### **Контрольные вопросы по разделу 3**

- 1. По какому принципу составляется материальный баланс реакций горения?*
- 2. Как определить теоретически необходимый и действительный объемы сухого воздуха для горения? Влажного воздуха?*
- 3. Почему в зону горения окислитель подается с избытком?*
- 4. От чего зависит коэффициент избытка воздуха?*
- 5. Какие компоненты входят в состав продуктов сгорания газа? Как определить их количество?*
- 6. В каком диапазоне изменяется значение коэффициента избытка воздуха при сжигании природного газа в промышленных тепловых установках?*

## 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ

### 4.1. ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

В теории и практике сжигания топлива различают следующие температурные характеристики горения газов: жаропроизводительность, калориметрическую температуру, теоретическую температуру и действительную температуру горения. Эти характеристики имеют различное применение в зависимости от решаемых задач из области сжигания газообразных топлив.

#### 4.1.1. Жаропроизводительность

*Жаропроизводительность*, известная также как *максимальная температура горения*  $t_{\max}$ , °С, — понятие, предложенное Д. И. Менделеевым. Это температура продуктов полного сгорания топлива в адиабатических условиях при  $\alpha = 1,0$  и при температурах топлива и воздуха перед горением, равных 0 °С.

Если объемы отдельных компонентов продуктов сгорания обозначить через  $V_i$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, а их средние объемные теплоемкости (в интервале температуры от 0 до  $t_{\max}$ , °С) — через  $c'_{pi}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К), то жаропроизводительность можно определить по выражению

$$t_{\max} = \frac{Q_H \cdot 10^3}{\sum V_i c'_{pi}}. \quad (4.1)$$

Таким образом, жаропроизводительность является чисто теоретическим понятием и определяется аналитически на основании расчетов объемов продуктов сгорания, полученных при помощи выражений (3.8)...(3.10). При этом необходимо использовать метод последовательных приближений, поскольку определяемая температура влияет на величину средней теплоемкости.

Сначала определяют объемы продуктов сгорания при  $\alpha = 1,0$ . Задаваясь значением  $t_{\max}$ , рассчитывают их теплоемкости и по

формуле (4.1) определяют жаропроизводительность. Цикл расчетов повторяется при полученном значении  $t_{\max}$  до удовлетворительного совпадения результатов.

Для некоторых газов и газообразных топлив значения жаропроизводительности при сжигании в сухом воздухе приведены в табл. 4.1. Чтобы определить жаропроизводительность при сжигании газа в атмосферном воздухе, содержащем около 1 % влаги по массе, приведенное в таблице значение следует уменьшить на 25...30 °С.

Таблица 4.1

**Жаропроизводительность простых и сложных газов  
в сухом воздухе**

Газ	Жаро-производительность $t_{\max}$ , °С	Газообразное топливо среднего состава	Жаро-производительность $t_{\max}$ , °С
Водород	2235	Природный газ газовых месторождений	2040
СО	2370	Природный газ нефтяных месторождений	2080
Метан	2043	Коксовый газ	2120
Этан	2097	Газ высокотемпературной перегонки сланцев	1980
Пропан	2110	Газ парокислородного дутья под давлением	2050
Бутан	2118	Генераторный газ из жирных углей	1750
Пентан	2119	Генераторный газ паровоздушного дутья из тощих топлив	1670
Этилен	2284	Швельгаз из жирных каменных углей	2050
Пропилен	2224	Сжиженный газ (50 % $C_3H_8$ и 50 % $C_4H_{10}$ )	2115
Бутилен	2203	Водяной газ	2210
Пентилен	2189	Доменный газ из кокса	1470
Ацетилен	2620		

#### 4.1.2. Калориметрическая температура

*Калориметрическая температура* отличается от жаропроизводительности тем, что учитывает действительные температуры топлива и воздуха, их влажность, а также значение коэффициента избытка воздуха. С этой целью в составе продуктов сгорания учитываются все действительные составляющие, а теплота сгорания дополняется физической теплотой топлива и воздуха  $Q_{\text{физ.}}$ , в соответствии с выражением

$$t_k = \frac{Q_H \cdot 10^3 + Q_{\text{физ.}}}{\sum V_i c'_{pi}}, \quad (4.2)$$

где  $c'_{pi}$  – средние объемные теплоемкости при постоянном давлении для отдельных составляющих продуктов сгорания, кДж/(м<sup>3</sup>·К), принимаемые в диапазоне температур от 0 до  $t_k$ , °С.

По определению калориметрической температуры физическая теплота, то есть удельная объемная энтальпия воздуха и топлива  $Q_{\text{физ.}}$ , кДж/м<sup>3</sup> газа, отсчитывается от температуры 0 °С с учетом действительной потребности во влажном воздухе  $V_B^{\text{вл.}}$ , в соответствии с выражением:

$$Q_{\text{физ.}} = V_B^{\text{вл.}} c'_{p_B} \cdot t_B + c'_{p_G} \cdot t_G, \quad (4.3)$$

где  $t_B$  – температура воздуха перед сжиганием, 0 °С;  $c'_{p_B}$  – средняя объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/м<sup>3</sup>, в интервале температур от 0 до  $t_B$ ;  $t_G$  – температура газа перед сжиганием, 0 °С;  $c'_{p_G}$  – средняя объемная теплоемкость газа при постоянном давлении, кДж/м<sup>3</sup>, в интервале температур от 0 до  $t_G$ , 0 °С.

С учетом (4.3) формулу (4.2) можно записать в развернутом виде:

$$t_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{н}} \cdot 10^3 + V_{\text{в}}^{\text{вл.}} \cdot c'_{p_{\text{в}}} \cdot t_{\text{в}} + c'_{p_{\text{г}}} \cdot t_{\text{г}}}{V_{\text{CO}_2} c'_{p_{\text{CO}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}} c'_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + V_{\text{N}_2} c'_{p_{\text{N}_2}} + V_{\text{O}_2} c'_{p_{\text{O}_2}}}. \quad (4.4)$$

Необходимо отметить, что природные и сжиженные газы в тепловых установках достаточно редко подогреваются перед сжиганием, а их объем незначителен по сравнению с объемом воздуха. Поэтому второе слагаемое в формуле (4.3), то есть энтальпию топлива, можно не учитывать.

Однако при сжигании газов со сравнительно низкой теплотой сгорания (генераторные, доменные и др.), особенно в случае их подогрева перед сжиганием, энтальпия топлива оказывает существенное влияние на величину калориметрической температуры горения и должна учитываться в расчетах.

В табл. 4.2 приведены значения калориметрической температуры сгорания во влажном воздухе с учетом фактического избытка воздуха для природного газа следующего объемного состава, %:  $\text{CH}_4 = 97$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_{10} = 0,5$ ;  $\text{N}_2 + \text{CO}_2 = 0,5$ .

Аналогичные данные для сгорания технического пропана в сухом воздухе приведены в табл. 4.3.

Данными табл. 4.2 и 4.3 с достаточной для технических расчетов точностью можно пользоваться и при определении калориметрической температуры горения природных газов близкого состава, а также практически для всех составов сжиженных углеводородных газов.

Изменение содержания пропана и бутана в сжиженном газе не влияет существенно на температуру горения, поскольку пропорционально теплоте сгорания изменяется объем продуктов сгорания. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить значения жаропроизводительности углеводородов (от этана до пентана), приведенные в табл. 4.1.

Таблица 4.2

**Калориметрическая и теоретическая температуры горения природного газа в воздухе с температурой 0 °С и влажностью 1 % мас.\* в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$**

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура $t_k, ^\circ\text{C}$	Теоретическая температура $t_t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура $t_k, ^\circ\text{C}$
1,00	2010	1920	1,33	1620
1,02	1990	1900	1,36	1600
1,03	1970	1880	1,40	1570
1,05	1940	1870	1,43	1540
1,06	1920	1860	1,46	1510
1,08	1900	1850	1,50	1470
1,10	1880	1840	1,53	1440
1,12	1850	1820	1,57	1410
1,14	1820	1790	1,61	1380
1,16	1800	1770	1,66	1350
1,18	1780	1760	1,71	1320
1,20	1760	1750	1,76	1290
1,22	1730	—	1,82	1260
1,25	1700	—	1,87	1230
1,28	1670	—	1,94	1200
1,30	1650	—	2,00	1170

\* Для сухого воздуха приведенные значения следует увеличить на 25...30 °С.

При необходимости достижения высоких температур в объеме топок или рабочих камер термических печей для сжигания газов с малыми избытками воздуха (в том числе при  $\alpha < 1,0$ ), а также для повышения к. п. д. печей, котлов и других газоиспользующих установок применяется предварительный подогрев воздуха, что приводит к соответствующему росту калориметрической температуры горения.

Таблица 4.3

**Калориметрическая температура горения технического пропана  
в сухом\* воздухе с температурой 0°С в зависимости  
от коэффициента избытка воздуха**

Коэффициент избытка возду- ха $\alpha$	Калориметриче- ская температура $t_k, ^\circ\text{C}$	Коэффициент избытка возду- ха $\alpha$	Калориметриче- ская температура $t_k, ^\circ\text{C}$
1,00	2110	1,45	1580
1,02	2080	1,48	1560
1,04	2050	1,50	1540
1,05	2030	1,55	1500
1,07	2010	1,60	1470
1,10	1970	1,65	1430
1,12	1950	1,70	1390
1,15	1910	1,75	1360
1,20	1840	1,80	1340
1,25	1780	1,85	1300
1,27	1750	1,90	1270
1,30	1730	1,95	1240
1,35	1670	2,00	1210
1,40	1630	2,10	1170

\* При сжигании в атмосферном воздухе с влажностью 1 % мас. приведенные значения следует уменьшить на 25...30 °С.

В табл. 4.4 приведены данные о калориметрической температуре горения природного газа среднего состава в зависимости от коэффициента избытка воздуха и его температур перед сжиганием.

### 4.1.3. Теоретическая температура

*Теоретическая температура горения* отличается от калориметрической тем, что учитывает затраты теплоты на эндотермические реакции диссоциации диоксида углерода и водяных паров, которые протекают в высокотемпературной зоне в соответствии с выражениями:



Эти реакции, во-первых, очень энергоемки, а, во-вторых, приводят к увеличению объема продуктов сгорания, что еще больше снижает их температуру. При высоких температурах процессы диссоциации развиваются еще более глубоко, с образованием атомарного водорода, атомарного кислорода и гидроксильной группы ОН.

Таблица 4.4

**Калориметрическая температура горения природного газа, °С,  
в зависимости от коэффициента избытка воздуха и  
его температуры (значения округлены)**

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Температура воздуха, °С								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
0,5	1380	1430	1500	1545	1620	1680	1740	1810	1860
0,6	1610	1650	1715	1780	1840	1900	1960	2015	2150
0,7	1730	1780	1840	1915	1970	2040	2100	2200	2250
0,8	1880	1940	2010	2060	2130	2200	2260	2330	2390
0,9	1980	2030	2090	2150	2220	2290	2360	2420	2500
1,0	2050	2120	2200	2250	2320	2385	2450	2510	2560
1,2	1810	1860	1930	2000	2070	2140	2200	2280	2350
1,4	1610	1660	1740	1800	1870	1950	2030	2100	2160
1,6	1450	1510	1560	1640	1730	1800	1860	1950	2030
1,8	1320	1370	1460	1520	1590	1670	1740	1830	1920
2,0	1220	1270	1360	1420	1490	1570	1640	1720	1820

Кроме того, при сжигании газа с избытком воздуха всегда образуется некоторое количество оксида азота. Все эти процессы эндотермичны и также приводят к снижению температуры горения.

Если обозначить потери теплоты на диссоциацию через  $Q_{\text{дис}}$  и учесть увеличение объема продуктов сгорания в результате диссоциации, то теоретическую температуру горения можно определить по выражению:

$$t_{\Gamma} = \frac{Q_{\text{H}} + Q_{\text{физ.}} - Q_{\text{дис.}}}{\left( \sum V_i c_{pi} \right)}, \quad (4.7)$$

где в знаменателе представлена сумма произведений объемов и средних теплоемкостей **всех составляющих отходящих газов**, включая продукты диссоциации.

Точные расчеты, учитывающие затраты теплоты на все процессы диссоциации (включая глубокую диссоциацию) и процесс синтеза NO, весьма сложны и в большинстве случаев сжигания газов в технике не обусловлены необходимостью. Поэтому определение теоретической температуры горения обычно осуществляется при помощи упрощенной методики. В основе методики лежит положение о том, что энтальпии недиссоциированных и частично диссоциированных продуктов весьма близки между собой. Это объясняется тем, что увеличение объема продуктов сгорания за счет диссоциации компенсируется большей теплоемкостью недиссоциированных газов.

На основе этого предположения теоретическую температуру горения можно определить, модифицируя формулу (4.2\*)

$$t_k = \frac{Q_{\text{H}} \cdot 10^3 + V_{\text{B}}^{\text{вл.}} \cdot c'_{p_{\text{B}}} \cdot t_{\text{B}} + c'_{p_{\Gamma}} \cdot t_{\Gamma} - (a \cdot 108,0 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + b \cdot 126,4 \cdot V_{\text{CO}_2})}{V_{\text{CO}_2} c'_{p_{\text{CO}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}} c'_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + V_{\text{N}_2} c'_{p_{\text{N}_2}} + V_{\text{O}_2} c'_{p_{\text{O}_2}}}, \quad (4.8)$$

где **a** и **b** – степень диссоциации водяных паров и диоксида углерода по отношению к их исходному количеству, образующемуся в результате реакций горения, %.

Степень диссоциации H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> растет с увеличением температуры и с уменьшением их парциального давления в составе продуктов сгорания. Значения степени диссоциации H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> при атмосферном давлении приведены в табл. 4.5 и 4.6. Из этих данных следует, что при температурах до 1500 °С степень диссоциации ничтожна и может не учитываться, то есть теоретическая температура принимается равной калориметрической.

Таблица 4.5

Степень диссоциации диоксида углерода  $b$ , %

$t$ , °C	Парциальное давление CO <sub>2</sub> , бар абс.														
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30
1500	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2	1,1
1700	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9
1800	6,9	6,3	5,9	5,5	5,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,3
1900	11,1	10,1	9,5	8,9	8,5	8,1	7,8	7,6	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	5,6	5,3
2000	18,0	16,5	15,4	14,6	13,9	13,4	12,9	12,5	11,8	11,2	10,8	10,4	10,0	9,4	8,8
2100	25,9	23,9	22,2	21,3	20,3	19,6	18,9	18,3	17,3	16,5	15,9	15,3	14,9	13,9	13,1
2200	37,6	35,1	33,1	31,5	30,3	29,2	28,3	27,5	26,1	25,0	24,1	23,3	22,6	21,2	20,1
2300	47,6	44,7	42,5	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,3	32,9	31,8	30,9	30,0	28,2	26,9
2400	59,0	56,0	53,7	51,8	50,2	48,8	47,6	46,5	44,6	43,1	41,8	40,6	39,6	37,5	35,8
2500	69,0	66,3	64,1	62,2	60,6	59,3	58,0	56,9	55,0	53,4	52,0	50,7	49,7	47,3	45,4
2600	77,7	75,2	73,3	71,6	70,2	68,9	67,8	66,7	64,9	63,4	62,0	60,8	59,7	57,4	55,5
2700	84,4	82,5	81,0	79,8	78,6	77,6	76,6	75,7	74,1	72,8	71,6	70,5	69,4	67,3	65,5
2800	89,6	88,3	87,2	86,1	85,2	84,4	83,7	83,0	81,7	80,6	79,6	78,7	77,9	76,1	74,5
2900	93,2	92,2	91,4	90,6	90,0	89,4	88,8	88,3	87,4	86,5	85,8	85,1	84,5	83,0	81,8
3000	95,6	94,9	94,9	93,9	93,5	93,1	92,7	92,3	91,7	90,6	90,1	89,6	88,5	87,6	86,8

Таблица 4.6

Степень диссоциации водяных паров  $a$ , %

$t$ , °C	Парциальное давление H <sub>2</sub> O, бар абс.															
	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
1600	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42
1700	1,45	1,35	1,27	1,20	1,16	1,12	1,08	1,02	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67
1800	2,40	2,25	2,10	2,00	1,90	1,85	1,80	1,70	1,60	1,53	1,46	1,40	1,30	1,25	1,20	1,15
1900	4,05	3,80	3,60	3,40	3,25	3,10	3,00	2,85	2,70	2,65	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,90
2000	5,75	5,35	5,05	4,80	4,60	4,45	4,30	4,00	3,80	3,55	3,50	3,40	3,15	2,95	2,80	2,65
2100	8,55	7,95	7,50	7,10	6,80	6,55	6,35	6,00	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,30	4,10
2200	12,3	11,5	10,8	10,3	9,90	9,60	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	6,25	5,90
2300	16,0	15,4	15,0	14,3	13,7	13,3	12,9	12,2	11,6	11,1	10,7	10,4	9,60	9,10	8,70	8,40
2400	22,5	21,0	20,0	19,1	18,4	17,7	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,2	11,7	11,2
2500	28,5	26,8	25,6	24,5	23,5	22,7	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6
2600	37,1	35,1	33,5	32,1	31,0	30,1	29,2	27,8	26,7	25,7	24,8	24,1	22,6	21,5	20,5	19,7
2700	44,7	42,6	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,2	33,0	31,8	30,8	29,9	28,2	26,8	25,7	24,8
2800	54,5	52,2	50,3	48,7	47,3	46,1	45,0	43,2	41,6	40,4	39,3	38,3	36,2	34,6	33,3	32,2
2900	62,8	60,5	58,6	56,9	55,5	54,3	53,2	51,3	49,7	48,3	47,1	46,0	43,7	41,9	40,5	39,2
3000	70,6	68,5	66,7	65,1	63,8	62,6	61,6	59,6	58,0	56,5	55,4	54,3	51,9	50,0	48,4	47,0

При более высоких температурах диссоциация может существенно снижать температуру горения. Поэтому влияние диссоциации на разницу между значениями  $t_k$  и  $t_T$  заметно только при температурах выше 1600 °С. Теоретическая температура горения природного газа в зависимости от коэффициента избытка воздуха при его температуре 0°С и влажности 1 % мас. приведена в табл. 4.2 вместе со значениями калориметрической температуры. На практике необходимость определения теоретической температуры возникает только при сжигании газа в высокотемпературных промышленных печах, работающих с предварительным подогревом воздуха. При сжигании газов в котельных установках такой необходимости нет, поскольку процессы диссоциации, происходящие в локальных высокотемпературных зонах, являются обратимыми.

При последующем достаточно медленном охлаждении продукты диссоциации ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  и  $OH$ ) снова ступают в реакции, выделяя при этом такое же количество теплоты, какое было затрачено на диссоциацию.

#### **4.1.4. Действительная температура горения**

*Действительная температура* горения всегда меньше теоретической и зависит от целого комплекса факторов, обуславливающих отвод теплоты из зоны горения: интенсивности теплоотдачи от факела излучением, потерь теплоты в окружающую среду, а также организации процессов смешения топлива с воздухом, определяющих растянутость процесса горения. Из этого следует, что точное определение действительной температуры горения возможно только в процессе теплового расчета конкретных тепловых агрегатов служащих для сжигания топлива, например — по тепловому балансу котельных агрегатов и промышленных печей.

Ориентировочно действительную температуру можно определить по калориметрической или теоретической температуре горения

(в зависимости от температурного уровня топочного процесса), используя выражение

$$t_d = \eta_{\text{п}} t_{\text{к}}, \quad (4.9)$$

где  $\eta_{\text{п}}$  – *пирометрический коэффициент*, который для различных типов устройств, применяемых в теплотехнике, можно принимать в следующих пределах:

- для термических и нагревательных печей с качественно выполненной теплоизоляцией — 0,75...0,85;
- для термических и нагревательных печей без тепловой изоляции — 0,65...0,75;
- для тепловых агрегатов с использованием теплоотдачи излучением в топке — 0,50...0,65.

К последнему типу агрегатов относятся все котлы на газовом топливе, используемые в качестве источников теплоты в теплоснабжении.

## 4.2. ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Понятия температур воспламенения и самовоспламенения очень важны в технике сжигания топлива. В тоже время нюансы, отличающие эти два понятия в теории горения, для технических специалистов могут выглядеть несколько расплывчатыми, что приводит к смешению и неправильному применению понятий. Поэтому данному вопросу необходимо уделить здесь особое внимание.

Первый и наиболее важный для понимания существа вопроса факт: **любое топливо сгорает в газообразном состоянии**. Газ уже находится в таком состоянии, поэтому воспламенение газообразного топлива происходит мгновенно, тогда как жидкое и твердое топлива необходимо сначала нагреть источником открытого пламени до начала активного испарения горючего вещества.

Воспламенение жидкого топлива сильно разнится по времени: летучие жидкости (бензин, спирт, эфир) воспламеняются так же

быстро, как и газы, а мазут и масла требуют достаточно продолжительного воздействия пламени. Твердое топливо в нормальных условиях всегда требует достаточно продолжительного предварительного подогрева до начала горения.

Вторым важным моментом является необходимость четко отличать энергию, необходимую для вышеописанного **предварительного испарения горючего вещества** и энергию **активации самой реакции горения**, приводящую к инициированию цепного механизма в виде образования необходимого количества радикалов (см. § 1.3).

*Температура воспламенения* — это минимальная температура вещества, при которой оно выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что **при воздействии на них источника зажигания** наблюдается воспламенение. Обратим внимание, что источник зажигания в этом случае только сообщает энергию активации уже выделяющимся парам горючего вещества. Это может быть искра или кратковременное воздействие пламени на зону над поверхностью вещества. Если воспламенения при этом не происходит, то температура воспламенения еще не достигнута. Длительное воздействие пламени, характерное для зажигания твердого топлива также означает, что температура воспламенения еще не достигнута, и мы сообщаем горючему веществу энергию, необходимую именно для доведения его до этой температуры.

*Температура самовоспламенения* — это наименьшая температура горючего вещества, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее в возникновению пламенного горения. Эта температура требуется непосредственно для достижения энергии активации реакции горения. Таким образом, это минимальная температура, до которой должна быть нагрета уже **образовавшаяся горючая смесь**, чтобы начался **самопроизвольный процесс горения**, не требующий источника зажигания и дальнейшего подвода теплоты извне.

Нетрудно убедиться, что в случае рассматриваемых задач сжигания газообразного топлива, понятия температур воспламенения и самовоспламенения практически совпадают. Этот вид топлива уже находится в газообразном состоянии (что соответствует температуре воспламенения), и любое инициирующее воздействие (искра, раскаленное тело, открытое пламя) сразу вызывает воспламенение. Использование понятия «температура воспламенения» является более точным.

Температура самовоспламенения, прежде всего, является характеристикой самого газа. Но, в то же время, ее величина зависит от многих факторов: содержания газа в смеси с воздухом, формы и размеров сосуда, в котором происходит нагрев смеси, каталитического воздействия материала стенок сосуда, скорости и способа подогрева смеси, давления под которым находится газ и т. п.

Поэтому определяется температура самовоспламенения экспериментально: методом впуска предварительно подготовленной холодной газовой смеси в нагретый сосуд, или методом смешения в сосуде предварительно нагретых до одинаковой температуры потоков газа и воздуха.

Значения температуры самовоспламенения различных газов, определенные методом впуска холодной смеси при атмосферном давлении в нагретый сосуд, приведены графически на рис. 4.1.

Данные графиков показывают, что наибольшую температуру самовоспламенения имеют окись углерода (более 650 °С) и метан (от 680 °С и выше, в зависимости от концентрации). Проще всего достигнуть самовоспламенения *n*-бутана (менее 500 °С при концентрации 6 %) и водорода (несколько выше 450 °С при концентрации 20 %).

При этом повышение содержания водорода, оксида углерода и метана в составе газовой смеси приводит к увеличению температуры самовоспламенения, тогда как рост содержания этана и других более тяжелых углеводородов — к ее снижению.

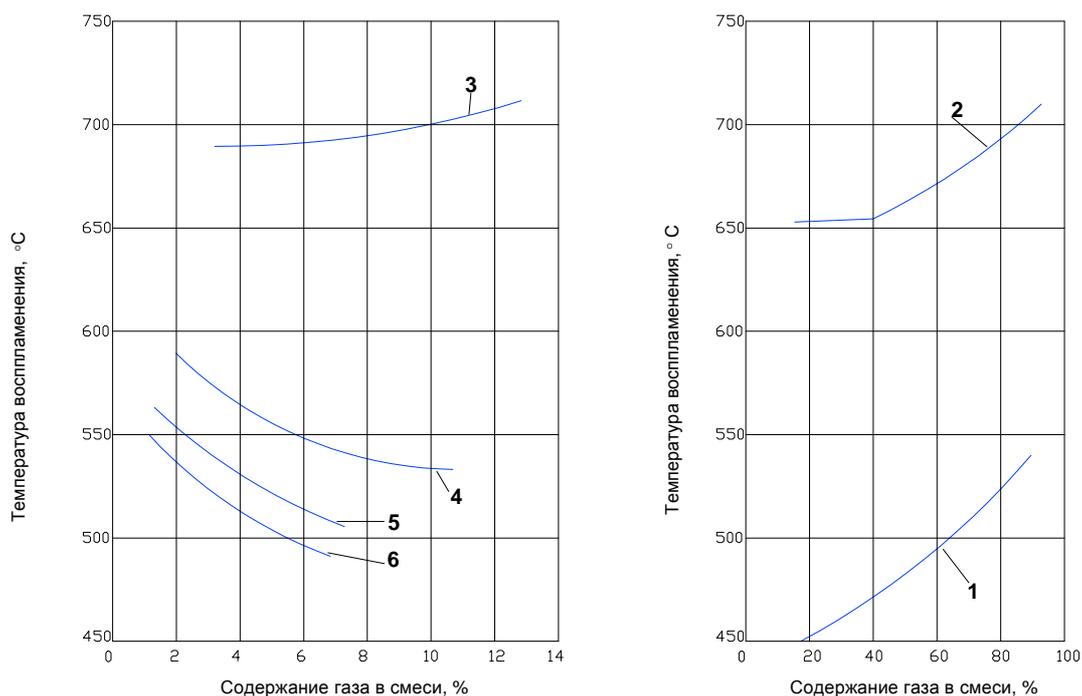


Рис. 4.1. Зависимость температуры самовоспламенения от содержания газа в газозудушной смеси: 1 – водород, 2 – оксид углерода, 3 – метан, 4 – этан, 5 – пропан, 6 – *n*-бутан

Температура самовоспламенения газов в смеси с кислородом, как правило, несколько ниже, чем в воздухе. Наличие балласта (негорючих компонентов, не принимающих участия в горении, таких как двуокись углерода и азот) увеличивает температуру самовоспламенения. Присутствие в сложных газах компонентов с низкой температурой воспламенения снижает температуру самовоспламенения всей газовой смеси.

В практике сжигания топлива нет необходимости доводить весь объем смеси до температуры самовоспламенения. Зажигание производится в одной точке при помощи внешнего высокотемпературного источника (так называемый запальник). Таким образом, **зажигание топлива** в технике отличается от лабораторного самовоспламенения. Смесь подогрывается до достаточно высокой температуры в очень ограниченном объеме вблизи запальника. После этого горение самопроизвольно распространяется на весь объем смеси благодаря тепловому эффекту реакций горения.

Однако при таком способе зажигания воспламенение сопровождается интенсивным теплоотводом к холодной смеси и окружающим поверхностям. Поэтому в очаге зажигания требуется обеспечить значительно более высокую температуру, по сравнению с теоретической температурой воспламенения.

Технически и конструктивно зажигание обеспечивается запальником (электроразрядник, раскаленная спираль, специальная небольшая горелка), находящимся поблизости от места вылета газа или газозвушной смеси (в зависимости от конструкции горелки) в топочное устройство или в открытое пространство (как в случае бытовых газозвушных плит). После воспламенения запальник удаляется или выключается, а устойчивое горение поддерживается за счет очень сложного процесса, который определяется терминами распространения и стабилизации пламени (см. разд. 6 и 7).

### 4.3. ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Смеси горючих газов с воздухом (с кислородом) могут воспламеняться (взрываться) только в том случае, когда содержание газа в смеси укладывается в строго определенные границы. С этой точки зрения различают нижний и верхний концентрационные *пределы воспламенения (границы взрываемости, воспламеняемости или распространения пламени)*. Нижний предел  $c_n$  соответствует минимальной концентрации газа в смеси, а верхний предел  $c_v$  — его максимальному содержанию, при которых происходит воспламенение (взрыв) смеси или самопроизвольное (без притока теплоты извне) распространение пламени в объеме смеси.

Вне концентрационных пределов воспламенения газозвушные смеси не горят и не взрываются. Поэтому эта характеристика так важна с точки зрения эффективного и безопасного использования газообразных топлив. Рис. 4.2 схематически иллюстрирует поведение газозвушных смесей при их зажигании раскаленной электрической спиралью в зависимости от содержания газа в смеси.

Если содержание газа в газозудной смеси внутри сосуда составляет меньше  $c_H$  (рис. 4.2, *а*), то при попытке произвести зажигание горение не будет происходить ни внутри сосуда, ни на выходе из него, поскольку в обоих местах в смеси слишком мало молекул топлива (слишком «бедная» смесь). Из рассуждений, приведенных в § 1.3, следует, что в этом случае количество неблагоприятных столк-

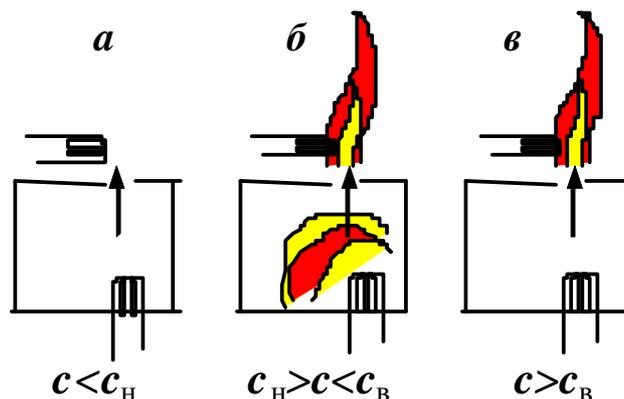


Рис. 4.2. К понятию пределов воспламенения

новений «топливо-топливо» и «кислород-кислород» превышает количество благоприятных столкновений типа «топливо-кислород», продолжающих цепь реакции горения. Строго говоря, на поверхности самой спирали будет происходить химическая реакция окисления топлива, но без дальнейшего самопроизвольного распространения пламени.

При содержании газа в пределах от  $c_H$  до  $c_B$  самопроизвольное горение после воспламенения будет происходить как внутри сосуда, так и вместе выхода из него, причем даже после удаления источника зажигания (рис. 4.2, *б*). Отметим, что внутри сосуда происходит очень быстрое распространение пламени в смеси, то есть взрыв. В этом случае в газозудной смеси существует наиболее выгодное для развития цепи реакции соотношение молекул горючего и окислителя.

При концентрации горючего газа выше  $c_B$  (рис. 4.2, *в*) в смеси не хватает молекул кислорода (слишком «богатая» смесь). Самопроизвольное (после зажигания спиралью) горение будет происходить в месте истечения смеси, благодаря ее разбавлению воздухом

из окружающей среды. В объеме смеси окисление будет происходить только на поверхности спирали во время ее действия.

Приближенные значения концентрационных пределов воспламенения для некоторых распространенных газов в смеси воздухом приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

**Концентрационные пределы воспламенения газов и паров  
в смеси с воздухом при температуре 20 °С и  
под давлением 101325 Па**

Наименование газов и паров	Содержание газа в газозоудшуй смеси, % об.				Максимальное давление взрыва, бар	Коэффициент избытка воздуха на границах воспламенения	
	на границах воспламенения		при стехиометрическом составе	при максимальном давлении взрыва		нижней	верхней
	нижней	верхней					
Водород	4,0	75,0	29,5	32,3	7,39	10,1	0,14
СО	12,5	74,0	29,5	-	-	2,9	0,15
Метан	5,0	15,0	9,5	9,8	7,17	1,99	0,59
Этан	3,0	12,5	5,68	-	-	1,93	0,42
Пропан	2,2	9,5	4,04	4,60	8,58	1,86	0,40
<i>n</i> -бутан	1,9	8,5	3,14	3,6	8,58	1,66	0,35
<i>i</i> -бутан	1,8	8,4	3,14	-	-	1,76	0,35
Пентан	1,4	7,8	2,56	3,0	8,65	1,83	0,31
<i>i</i> -пентан	1,4	7,6	2,54	-	-	1,83	0,32
Этилен	3,1	32,0	6,56	8,0	8,86	2,17	0,15
Пропилен	2,4	11,0	4,47	-	-	1,89	0,38
Бутилен	2,0	9,6	3,38	-	-	1,71	0,33
Ацетилен	2,5	81,0	7,75	14,5	10,3	3,3	0,019
Циклогексан	2,4	10,4	4,45	-	-	1,89	0,4

Замена воздуха чистым кислородом практически не изменяет нижней границы распространения пламени, тогда как верхняя граница значительно возрастает (табл. 4.8).

Это объясняется цепным характером реакций горения. В бедной смеси увеличение концентрации кислорода приводит только к дальнейшему росту числа соударений радикалов типа «O+O», которые с точки зрения развития цепи являются неблагоприятными и ничего не меняют. В бедной смеси замена воздуха кислородом приводит к тому, что вместо неблагоприятных столкновений типа «топливо-азот» происходят благоприятные соударения молекул горючего газа с кислородом и активными радикалами. Поэтому смесь продолжает оставаться горючей при более высокой концентрации газа.

Таблица 4.8

**Концентрационные пределы воспламенения газов в смеси с кислородом ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p = 101325\text{ Pa}$ )**

Газ	Содержание газа в смеси с кислородом, % об.		Газ	Содержание газа в смеси с кислородом, % об.	
	Нижний предел	Верхний предел		Нижний предел	Верхний предел
Водород	4,0	94,0	<i>i</i> -бутан	1,8	48,0
СО	12,5	94,0	Этилен	3,0	80,0
Метан	5,0	61,0	Пропилен	2,1	53,0
Этан	3,0	66,0	Бутилен	1,8	58,0
Пропан	2,2	55,0	Ацетилен	2,5	89,0
<i>n</i> -бутан	1,8	49,0	Циклопропан	2,4	60,0

Данные табл. 4.7 и 4.8 характеризуют воспламеняемость холодных смесей. С ростом температуры пределы воспламенения расширяются. При температуре, превышающей температуру самовоспламенения, смеси газов с воздухом и кислородом сгорают при любом их объемном соотношении.

### 4.3.1. Расчеты пределов воспламенения газообразных топлив

Поскольку в большинстве случаев газообразное топливо является смесью различных газов, возникает задача установления его пределов распространения пламени. Для газообразного топлива, не содержащего балластных примесей (негорючих компонентов), их нижний или верхний предел воспламенения  $L$ , % об., в смеси с воздухом или кислородом определяется по правилу адиттивности в соответствии с выражением

$$L = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{\frac{r_1}{L_1} + \frac{r_2}{L_2} + \dots + \frac{r_n}{L_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{L_i}}, \quad (4.10)$$

в котором  $r_i$  – содержание отдельных компонентов в составе сложного газообразного топлива, % об., причем  $\sum_{i=1}^n r_i = 100\%$ ;  $L_i$  – соответственно верхний или нижний предел воспламенения отдельных компонентов, % об., в газозоудной или газокислородной смеси, в соответствии с данными табл. 4.7 и 4.8.

Для газообразных топлив, содержащих небольшое количество негорючих примесей, значения пределов воспламеняемости  $L^{\text{б}}$ , % об., можно ориентировочно определить по выражению

$$L^{\text{б}} = L \frac{\left(100 + \frac{C_{\text{б}}}{100 - C_{\text{б}}}\right)}{100 + L \frac{C_{\text{б}}}{100 - C_{\text{б}}}}, \quad (4.11)$$

в котором  $L$  – нижний или верхний предел воспламенения, % об., определенный по формуле (4.10) для горючей части топлива, принимая ее за 100 %;  $C_{\text{б}}$  – содержание балласта, т. е. негорючих примесей ( $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ) в составе газообразного топлива, % об.

Другой часто встречаемой задачей в практике сжигания топлива является определение коэффициента избытка воздуха, соответствующего концентрационным пределам воспламеняемости, а также давления, возникающего при взрыве газовой смеси.

Значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на границах воспламеняемости чистых горючих газов приведены в табл. 4.7. Граничные значения  $\alpha$  для газообразных топлив произвольного состава, соответствующие как нижнему, так и верхнему пределу воспламенения (взрываемости), можно определить по выражению

$$\alpha = \left( \frac{100}{L} - 1 \right) \frac{1}{V_B^T}, \quad (4.12)$$

в котором  $V_B^T$  – теоретическая потребность в воздухе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, определенная по формулам (2.4) или (2.5).

Величина давления, возникающего при взрыве газовой смеси, определяется опытным путем на специальных установках. Результаты исследований свидетельствуют, что максимальное давление соответствует не теоретическому (стехиометрическому), а несколько большему содержанию газа в смеси. Значения максимальных давлений взрыва и соответствующие им концентрации газов в смеси с воздухом приведены в табл. 4.7.

При отсутствии экспериментальных данных значение давления взрыва  $p_{вз.}$ , бар абс., возникающего в сосуде, топке, печи и т. п. можно определить по следующим приближенным выражениям:

- при стехиометрическом соотношении простого газа с сухим воздухом:

$$p_{вз.} = p(1 + \beta \cdot t_K) \frac{m}{n}, \quad (4.13)$$

- при любом соотношении сложного газообразного топлива с влажным воздухом:

$$p_{\text{вз.}} = p(1 + \beta \cdot t_k) \frac{V_{\text{п.с.}}^{\text{вл.}}}{(1 + V_{\text{в}}^{\text{вл.}})}, \quad (4.14)$$

где  $p$  – давление в сосуде (топке, печи и т. п.) перед взрывом, бар абс.;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения газов, принимаемый равным  $1/273$ ;  $t_k$  – калориметрическая температура горения, °С;  $m$  – число молекул продуктов взрыва, определяемое по реакции сгорания газа в воздухе;  $n$  – число молекул исходных продуктов перед взрывом;  $V_{\text{п.с.}}^{\text{вл.}}$  – объем влажных продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа, определяемый по формулам (2.8)...(2.13);  $V_{\text{в}}^{\text{вл.}}$  – действительная потребность во влажном воздухе,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа, при фактическом значении коэффициента избытка воздуха, в соответствии с выражениями (3.4), (3.5), (3.7).

#### Пример 4.1

Определить нижний и верхний пределы воспламенения в воздухе для природного газа следующего объемного состава:

$$\text{CH}_4 = 93\%; \text{C}_2\text{H}_6 = 3,1\%; \text{C}_3\text{H}_8 = 0,7\%; \text{C}_4\text{H}_{10} = 0,6\%; \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 2,6\%.$$

#### Решение

1. Предварительно определяем состав горючей части газа, % об.:

$$\text{CH}_4 = \frac{93}{97,4} 100 = 95,48; \text{C}_2\text{H}_6 = \frac{3,1}{97,4} 100 = 3,18;$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 = \frac{0,7}{97,4} 100 = 0,72; \text{C}_4\text{H}_{10} = \frac{0,6}{97,4} 100 = 0,62.$$

2. Нижний предел воспламенения для горючей части газа определяем по формуле (4.10), используя данные табл. 4.7:

$$L_{\text{н}} = \frac{100}{\frac{95,48}{5} + \frac{3,18}{3} + \frac{0,72}{2,2} + \frac{0,62}{1,9}} = 4,8 \text{ \% об.}$$

3. Аналогично определяем верхний предел воспламеняемости горючей части газа:

$$L_B = \frac{100}{\frac{95,48}{15} + \frac{3,18}{12,5} + \frac{0,72}{9,5} + \frac{0,62}{8,5}} = 14,7 \text{ \% об.}$$

4. Теперь можно определить нижний предел воспламенения с учетом балластных примесей, используя выражение (4.11):

$$L_H^{\text{б}} = 4,8 \frac{\left(100 + \frac{100 \cdot 2,6}{100 - 2,6}\right)}{100 + 4,8 \frac{2,6}{100 - 2,6}} = 4,9 \text{ \% об.}$$

5. Верхний предел с учетом забалластированности газа по тому же выражению составит:

$$L_B^{\text{б}} = 14,7 \frac{\left(100 + \frac{100 \cdot 2,6}{100 - 2,6}\right)}{100 + 14,7 \frac{2,6}{100 - 2,6}} = 15 \text{ \% об.}$$

### Пример 4.2

Определить коэффициент избытка воздуха, соответствующий нижнему и верхнему пределам воспламенения в сухом воздухе для природного газа того же состава.

### Решение

1. Теоретическая потребность в сухом воздухе определяется по выражению (3.4):

$$V_B^{\text{т.с.}} = \frac{4,76}{100} (2 \cdot 93 + 3,5 \cdot 3,1 + 5 \cdot 0,7 + 6,5 \cdot 0,6) = 9,7 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

2. Коэффициент избытка воздуха на нижней границе воспламеняемости определяем по формуле (4.12), используя результаты предыдущего примера:

$$\alpha_{\text{H}} = \left( \frac{100}{4,9} - 1 \right) \frac{1}{9,7} = 1,99.$$

3. По тому же выражению, с использованием результатов примера 4.1, определяем значение  $\alpha$  на верхнем пределе воспламенения:

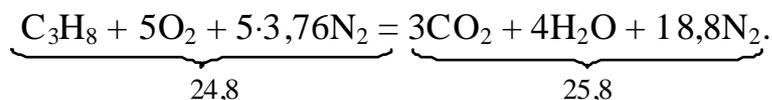
$$\alpha_{\text{B}} = \left( \frac{100}{15} - 1 \right) \frac{1}{9,7} = 0,58.$$

### Пример 4.3

Определить давление, возникающее при взрыве стехиометрической смеси пропана с воздухом, если начальное давление составляет 1 бар абс.

#### Решение

1. Количество молекул исходных компонентов перед взрывом и продуктов взрыва устанавливаем при помощи стехиометрического уравнения реакции горения пропана:



2. Развиваемое при взрыве давление, при calorиметрической температуре горения 2110 °С (по табл. 4.3), определяем по выражению (4.13):

$$p_{\text{вз.}} = 1,0 \cdot \left( 1 + \frac{2110}{273} \right) \frac{25,8}{24,8} = 9,5 \text{ бар абс.}$$

### Контрольные вопросы по разделу 4

1. Приведите определения жаропроизводительности, calorиметрической температуры, теоретической температуры и действительной температуры горения.

2. Какой метод расчета применяется при вычислении жаропроизводительности?

3. Назовите средние значения температур горения природного газа.
4. От каких факторов зависит действительная температура горения?
5. С помощью какого коэффициента учитываются реальные условия сжигания газа в тепловых установках?
6. Дайте определение температуры самовоспламенения?
7. Чем отличается зажигание топлива в технических устройствах от лабораторного самовоспламенения газа?
8. Что такое концентрационные пределы воспламенения (взрываемости) горючих газов?
9. Опишите поведение гомогенной газовой смеси с различным содержанием горючего газа при зажигании смеси высокотемпературным источником.
10. Как определить концентрационные пределы воспламенения многокомпонентных газовых смесей?
11. Назовите пределы воспламенения природного и сжиженного газа.
12. От каких параметров зависит давление, развиваемое при взрыве газовой смеси?

## 5. ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ

### 5.1. ГОРЕНИЕ В НЕПОДВИЖНОЙ СРЕДЕ

#### 5.1.1. Основные понятия

Если наблюдать за процессом горения в неподвижной среде, например в прозрачной горизонтальной трубке, заполненной гомогенной газовой смесью, то можно заметить тонкую пламенную зону, перемещающуюся вдоль трубки в направлении несгоревшей смеси. Эта зона, называемая *фронтом пламени*, в каждый момент разделяет свежую, еще не вступившую в реакцию горючую смесь и уже образовавшиеся продукты сгорания. Толщина фронта пламени весьма мала и для холодной смеси природных и сжиженных углеводородных газов с воздухом составляет около 0,5...0,6 мм.

Перемещение фронта пламени вызвано тем, что горючая смесь, находящаяся перед ним, нагревается до температуры воспламенения за счет теплопроводности и диффузии раскаленных продуктов сгорания и активных частиц (радикалов) вглубь холодной смеси.

Линейная скорость, с которой фронт пламени перемещается по однородной горючей смеси, называется *равномерной скоростью распространения пламени*. Эксперименты показывают, что величина равномерной скорости зависит как от физико-химических характеристик горючей смеси, так и от условий эксперимента. Скорость растет с увеличением диаметра трубки и наоборот.

Это вызвано тем, что рост диаметра трубки сопровождается интенсификацией конвективных потоков и развитию завихрений в предпламенной зоне. Оба эти явления приводят к большему искривлению и растянутости фронта пламени, увеличению его поверхности и пропорциональному росту скорости распространения пламени.

При уменьшении диаметра канала скорость снижается и в конечном итоге распространение пламени в газовой смеси становится невозможным. Это объясняется тем, что при уменьшении диаметра канала растет отношение его периметра к площади поперечного сечения, что означает рост соотношения поверхности пламени, контактирующей с холодной стенкой, с объемом пламенной зоны, являющейся источником энергии. Увеличение теплоотвода от зоны горения и рост количества неблагоприятных столкновений радикалов со стенкой канала (см. п. 2.3) приводит к невозможности дальнейшего развития цепной реакции горения.

Размер трубок, каналов, отверстий, щелей, при котором не происходит распространения пламени, называется *критическим размером*. Критический размер зависит как от вида газа, так и от формы канала. Для цилиндрического канала критический диаметр составляет: примерно 3 мм для стехиометрической смеси метана с воздухом и около 0,9 мм для водородно-воздушной смеси. Критическая ширина плоской щели для метан-воздушной смеси при максимальной скорости распространения пламени равна 1,17 мм.

Явление погасания пламени в каналах критического размера широко используется в технике. При сжигании газов в различных конструкциях газовых горелок применение каналов критического сечения является гарантией от проникновения (проскока) пламени внутрь горелок. По этому же принципу действуют так называемые огнепреградители, делающие невозможным распространение пламени во взрывоопасных системах (например, в промышленных системах вентиляции и пневмотранспорта). Они выполняются в виде пламегасящих сеток, пористых керамических плит, дисков из спрессованных металлических шариков, сосудов, наполненных мелкозернистыми материалами и т. п.

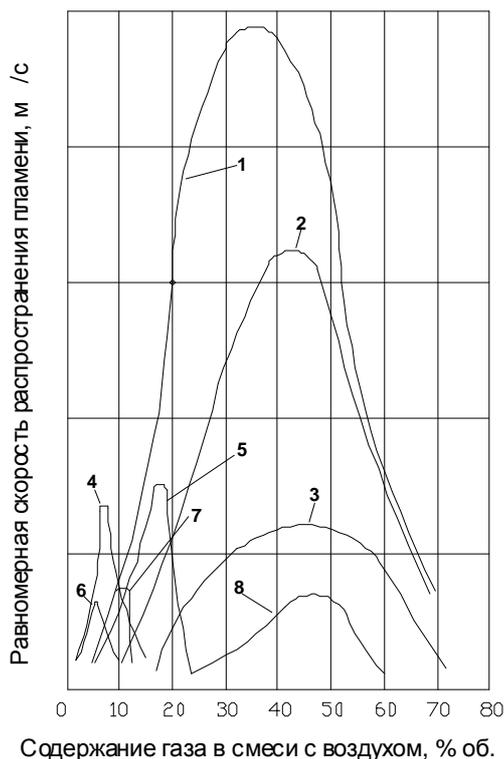


Рис. 5.1. Равномерная скорость распространения пламени: 1 – водород; 2 – водяной газ; 3 – оксид углерода; 4 – этилен; 5- коксовый газ; 6 – этан; 7 – метан; 8 – генераторный газ

(некоторому недостатку окислителя).

### 5.1.2. Нормальная скорость распространения пламени

Чтобы характеристики газов, имеющие принципиальное значение для эффективности и безопасности сжигания топлива, можно было сравнивать независимо от условий эксперимента (диаметр трубки и т. п.), было введено понятие *нормальной скорости распространения пламени* в газозвушной смеси.

Нормальной скоростью распространения пламени называется скорость относительно холодной, еще не воспламенившейся смеси, с которой фронт пламени перемещается в направлении, перпендикулярном к его поверхности.

Значения равномерной скорости распространения пламени, определенные для различных горючих газов в смеси с воздухом при комнатной температуре и атмосферном давлении в трубке диаметром 25,4 мм, приведены на рис. 5.1. Графики показывают, что скорость распространения пламени зависит как от вида газа, так и от его содержания в газозвушной смеси. При этом максимальная скорость соответствует не стехиометрическому составу смеси, а несколько более богатому соотношению газа и воздуха

Действительный фронт пламени можно заменить (рис. 5.2) плоскостью, равной поперечному сечению канала диаметром  $r$ , м, перпендикулярному к его оси (в действительности фронт пламени существенно искривлен). Если равномерная скорость пламени составляет  $u_p$ , м/с, то нормальную скорость распространения пламени  $u_n$ , м/с, можно определить по выражению

$$u_n = u_p \frac{\pi r^2}{S}, \quad (5.1)$$

в котором  $S$  — фактическая площадь поверхности искривленного фронта пламени,  $m^2$ , определяемая методом фотографирования и последующих геометрических расчетов.

Поскольку поверхность искривленного фронта пламени всегда больше геометрической поверхности поперечного сечения канала, нормальная скорость всегда меньше, чем равномерная скорость распространения пламени.

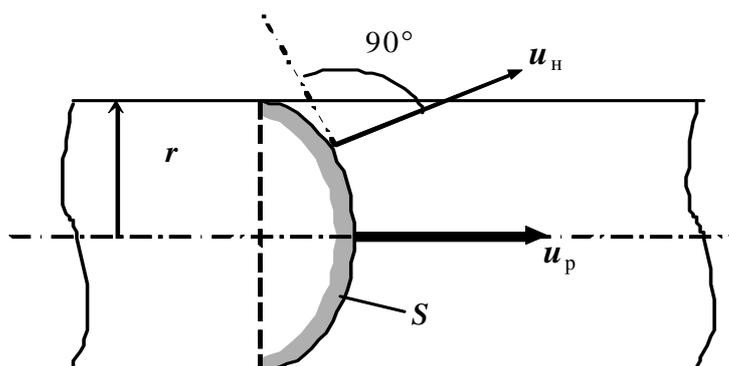


Рис. 5.2. К понятию нормальной скорости распространения пламени

Например, для метана в трубке диаметром 5 см равномерная скорость распространения пламени может в 3...6 раз превышать нормальную скорость. Нормальная скорость является, прежде всего, характеристикой горючего газа. Значения нормальной скорости распространения пламени для чистых газов в смеси с воздухом приведены в табл. 5.1. В таблице приведено также содержание газа, соответствующее максимальной скорости, и аналогичные характеристики для стехиометрического состава смеси.

Таблица 5.1

**Значения максимальной нормальной скорости распространения пламени в газовоздушных смесях при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $p = 101325\text{ Па}$**

Газ	Содержание газа в газозвушной смеси, % об.		Максимальная нормальная скорость распространения пламени, м/с	
	Стехиометрическая смесь	Смесь с максимальной скоростью распространения пламени	Для стехиометрической смеси	Для смеси с максимальной скоростью распространения пламени
Водород	29,5	42,0	1,6	2,67
Оксид углерода	29,5	43,0	0,3	0,42
Метан	9,5	10,5	0,28	0,37
Этан	5,68	6,3	0,32	0,40
Пропан	4,04	4,3	0,31	0,38
<i>n</i> -бутан	3,14	3,3	0,30	0,37
Этилен	6,56	7,0	0,50	0,63
Пропилен	4,47	4,8	0,37	0,44
Бутилен	3,38	3,7	0,38	0,43
Ацетилен	7,75	10,0	1,0	1,35

Скорость распространения пламени в смеси с кислородом всегда значительно выше. Например, для метан-кислородной смеси она составляет 3,3 м/с (в смеси с воздухом только 0,37 м/с), а для пропан-кислородной — 3,6 м/с (с воздухом — 0,38 м/с).

Для сложных газообразных топлив содержание газа в смеси  $C^{\max}$ , % об., соответствующее максимальной скорости распространения пламени, определяется по правилу аддитивности.

По этому же принципу определяется значение максимальной нормальной скорости распространения пламени  $u_{\text{H}}^{\max}$ , м/с, для газа, состоящего из нескольких компонентов:

$$C^{\max} = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{\frac{r_1}{C_1^{\max}} + \frac{r_2}{C_2^{\max}} + \dots + \frac{r_n}{C_n^{\max}}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{C_i^{\max}}}, \quad (5.2)$$

$$u_{\text{H}}^{\max} = C^{\max} \frac{\frac{r_1}{C_1^{\max}} u_{\text{H}1} + \frac{r_2}{C_2^{\max}} u_{\text{H}2} + \dots + \frac{r_n}{C_n^{\max}} u_{\text{H}n}}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{C_i^{\max}} u_{\text{H}i}}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (5.3)$$

где  $r_i$  – содержание отдельных компонентов, % об., в составе газообразного топлива, при этом  $\sum_{i=1}^n r_i = 100\%$ ;  $C_i^{\max}$  – содержание отдельных компонентов в сложном газе, % об., соответствующее максимальному значению нормальной скорости распространения пламени (по табл. 5.1);  $u_{\text{H}i}$  – максимальное значение нормальной скорости распространения пламени, м/с, для отдельных горючих компонентов сложного газа в смеси с воздухом (по табл. 5.1).

Выражения (5.2) и (5.3) строго справедливы в случае, если все компоненты, входящие в состав сложного газа, имеют одинаковую химическую природу (сюда относятся природные и сжиженные газы любого состава). Для смесей природных и искусственных газов они дают только приближенный результат.

Непригодны они также для газов, содержащих значительные количества балластных примесей (азота и двуокиси углерода), которые снижают скорость распространения пламени. Для забалластированных газов, при известном содержании  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ , % об., нормальную скорость распространения пламени  $u_{\text{H}}^{\text{б}}$ , м/с, следует скорректировать по выражению

$$u_{\text{H}}^{\text{б}} = u_{\text{H}}^{\max} (1 - 0,01\text{N}_2 - 0,012\text{CO}_2). \quad (5.4)$$

Значительное влияние на скорость распространения пламени оказывает предварительный подогрев газозвушной смеси. По экспериментальным данным значение нормальной скорости  $u_{\text{H}}^{T_2}$  при

абсолютной температуре смеси  $T_2$  можно приблизительно определено по квадратичной зависимости

$$u_{\text{н}}^{T_2} = u_{\text{н}}^{293} \left( \frac{T_2}{293} \right)^2, \quad (5.5)$$

в которой значение нормальной скорости распространения пламени  $u_{\text{н}}^{293}$  для температуры 20 °С принимается по табл. 5.1.

Поскольку при предварительном подогреве смеси ее плотность уменьшается обратно пропорционально абсолютное температуре, а скорость распространения пламени в соответствии с (5.5) растет пропорционально ее квадрату, то так называемая массовая скорость потока (произведение  $u_{\text{н}} \rho$ ) растет пропорционально абсолютное температуре. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете газовых горелок, работающих на гомогенной смеси, особенно в тех случаях, когда огневые каналы расположены в нагретой кладке, где на них воздействует излучение топки, шамотной горки, раскаленных газов и т. п.

### 5.1.3. Детонационное горение

Выше были рассмотрены закономерности равномерного (медленного) распространения пламени в условиях практически неизменного давления, близкого к атмосферному, когда трубка, в которой происходит горение, имеет небольшую длину (около 7 диаметров) и открыта с одного конца (соединена с неограниченным пространством или с сосудом большого объема, как минимум в сто раз превышающего объем трубки). В этом случае воспламенение свежей смеси, то есть ее подогрев до температуры самовоспламенения, происходит за счет теплопроводности и медленной молекулярной диффузии. Образующаяся таким образом и передвигающаяся с дозвуковой скоростью волна (дефлаграция) одновременно является зоной горения.

Если длина трубки значительна или объем, с которым она соединена, ограничен, то процесс горения будет сопровождаться ростом давления. Для некоторых газоздушных смесей это может привести

сначала к вибрационному горению, а затем к детонационному, распространяющемуся со сверхзвуковой скоростью — 2000 м/с и более.

Передача энергии в случае детонации происходит за счет ударной волны сжатия газа. Как любая ударная волна, она нагревает газ, и если температура достигает температуры самовоспламенения, то возникает детонация. В отличие от дефлаграции экзотермическая реакция горения при детонации распространяется вслед за ударной волной.

Установлено, что детонация возникает преимущественно в смесях, обладающих сравнительно высокой равномерной скоростью распространения пламени. При этом детонация возможна только в определенных концентрационных пределах, которые обычно уже пределов воспламенения газов. Например, концентрационные пределы детонации газокислородных смесей составляют, % об.: для пропана — 3,2...3,7; изобутана — 2,8...3,1; ацетилена — 3,5...9,2; водорода — 15...90.

Возникающие при детонации давления могут в 2...3 раза превышать давления обычного теплового взрыва, приведенные в табл. 5.1.

### **Пример 5.1**

Определить максимальную нормальную скорость распространения пламени для сложного газа в смеси с воздухом. Состав газа, % об.:  $\text{CH}_4 = 85,0$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 5,0$ ;  $\text{CO}_2 = 3,0$ ;  $\text{N}_2 = 7,0$ .

### **Решение**

1. Горючая часть газа составляет:

$$100 - (3 + 7) = 90 \text{ \% об.}$$

2. Состав горючей части газа без учета балласта:

$$\text{CH}_4 = \frac{85}{90}100 = 94,4; \quad \text{C}_2\text{H}_6 = \frac{5}{90}100 = 5,6.$$

3. Содержание горючей части в смеси с воздухом, имеющей максимальную скорость распространения пламени определим по выражению (5.2), используя данные табл. 5.1:

$$C^{\max} = \frac{94,4 + 5,6}{\frac{94,4}{10,5} + \frac{5,6}{6,3}} \cong 10 \text{ \%}.$$

4. Максимальную нормальную скорость распространения пламени для смеси горючей части газа с воздухом определим по выражению (5.3), используя данные табл. 4.1:

$$u_{\text{H}}^{\max} = 10 \frac{\frac{94}{10,5} \cdot 3,7 + \frac{5,6}{6,3} \cdot 0,4}{94,4 + 5,6} = 0,375 \text{ м/с}.$$

5. Максимальную нормальную скорость распространения пламени в газозвушной смеси с учетом содержания балластных примесей определим по выражению (5.4):

$$u_{\text{H}}^{\text{б}} = 0,375(1 - 0,01 \cdot 7 - 0,012 \cdot 3) = 0,34 \text{ м/с}.$$

## 5.2. ГОРЕНИЕ В ЛАМИНАРНОМ ПОТОКЕ

В большинстве случаев сжигания газов в технике фронт пламени должен не перемещаться, а занимать устойчивое положение в объеме топки или в другом пространстве, где должно происходить горение. Именно такую стабилизацию пламени обеспечивают различные конструкции горелок, в которых организация подачи потоков газа и воздуха позволяет остановить в пространстве фронт пламени горячей газозвушной смеси.

Теоретически фронт пламени может быть остановлен, если поток самой газозвушной смеси будет двигаться навстречу пламени со скоростью, равной нормальной скорости распространения пламени:  $w_{\text{пот}} = u_{\text{H}}$ .

Однако только в опытной трубке фронт пламени можно считать условно плоским, и для него справедливо вышеприведенное выражение. При истечении горючей смеси через огневое отверстие горелки в неограниченное пространство возникает конусный фронт пламени. Закономерности развития конусного пламени удобно рассматривать на примере простейшей горелки *Бунзена* (рис. 5.3).

Она представляет собой вертикальный цилиндрический канал  $I$ , по которому течет предварительно подготовленная газозвудушная смесь с первичным коэффициентом воздуха  $\alpha_1 = 0,5 \dots 0,6$ .

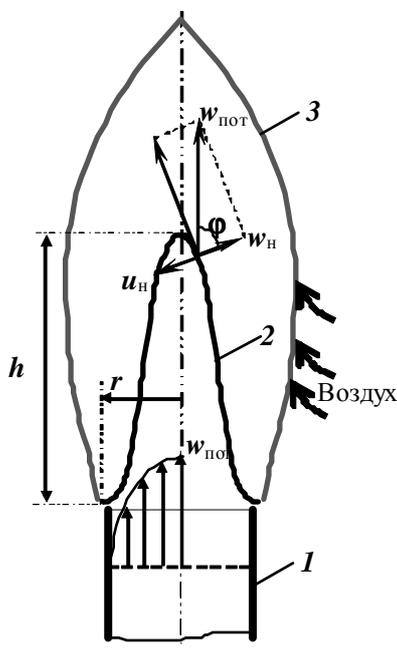


Рис. 5.3. Схема конусного фронта пламени при ламинарном течении

На срезе огневого отверстия канала происходит воспламенение смеси и возникает пламя, состоящее из двух конусов. Внутренний конус 2 представляет собой фронт пламени, где сгорает часть топлива, для которой хватает окислителя в составе самой горючей смеси.

Внутренний конус имеет достаточно устойчивый и резко очерченный контур зеленовато-голубого тона (для природного газа). У основания конуса пламени скорость течения смеси и скорость распространения пламени сравниваются

в горизонтальной плоскости. У среза горелки возникает устойчивая зона горения, выполняющая функцию запальника, а само ламинарное пламя проявляет способность к самостабилизации (см. разд. 6).

Наружный конус 3 представляет собой поверхность, на которой оставшаяся часть топлива выгорает в результате диффузии кислорода из окружающего воздуха.

Фронт выглядит неподвижным, хотя в действительности он движется навстречу истекающей смеси. В каждой точке внутреннего конуса скорость распространения пламени направлена по нормали к его поверхности внутрь пламени. Поскольку фронт неподвижен относительно среза горелки, это означает, что нормальная скорость распространения пламени  $u_n$  в точности компенсирована нормальной составляющей осевой скорости потока  $w_n$  (рис. 5.3). Математически это явление описывает уравнение Гюи — Михельсона (закон косинусов):

$$w_n = w_{\text{пот}} \cos \varphi = u_n. \quad (5.6)$$

Так как при ламинарном течении распределение скоростей в поперечном сечении канала близко к параболическому, то для каждой точки, лежащей на образующей конуса, можно определить скорость распространения пламени.

Для приближенных расчетов обычно принимают скорость прохождения смеси через фронт пламени постоянной и равной  $u_n$  на всей поверхности конуса. Это позволяет определить нормальную скорость распространения пламени путем деления объемного расхода протекающей через горелку смеси  $V$ , м<sup>3</sup>/с, на поверхность конусного фронта пламени  $S$ , м<sup>2</sup>:

$$u_n = \frac{V}{S}. \quad (5.7)$$

Если предположить, что фронт пламени имеет геометрическую форму правильного конуса, а скорость потока смеси  $w_{\text{пот}}$ , м/с, одинакова во всем сечении канала горелки, то формулу (5.7) можно модифицировать следующим образом (геометрические обозначения см. на рис. 5.3):

$$u_n = \frac{V}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}} = \frac{\pi r^2 w_{\text{пот}}}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} w_{\text{пот}}. \quad (5.8)$$

Поскольку в действительности фронт горения не является правильным геометрическим конусом, для точного определения нормальной скорости распространения пламени его фотографируют. Полученное изображение фронта пламени графически разбивается на ряд усеченных конусов с минимальной кривизной образующих. Суммируя их поверхность, можно определить площадь поверхности конусного фронта пламени, весьма близкую к действительной. Этот метод определения нормальной скорости распространения пламени называется методом горелки.

Значения нормальной скорости, полученные методом горелки, как и другими достоверными экспериментальными методами, близки между собой и равны значениям, полученным методом запаянной трубки (см. табл. 5.1).

Из формулы (5.8) после некоторых преобразований, можно получить зависимость высоты конусного фронта пламени  $h$ , м, от характеристик газа и горелки:

$$h = r \sqrt{\frac{w_{\text{пот}}}{u_{\text{н}}} - 1}. \quad (5.9)$$

Эта зависимость показывает, что высота конусного фронта пламени для данного вида газа зависит главным образом от размера огневого канала горелки. Из этого следует, что для уменьшения высоты пламени достаточно разделить большой канал на несколько мелких. Для газовоздушных смесей с равнозначными характеристиками высота конусных фронтов пламени малых каналов может быть определена (с достаточной для инженерных расчетов точностью) по высоте фронта пламени одиночного канала при помощи выражения

$$h = \frac{H}{\sqrt{n}}, \quad (5.10)$$

где  $h$  – высота фронта пламени малого канала многоканальной горелки;  $H$  – высота фронта пламени горелки с одним крупным каналом, определенная по формуле (5.8);  $n$  – количество каналов многоканальной горелки.

### 5.3. ГОРЕНИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Рассмотренное выше горение в ламинарном потоке осуществляется преимущественно в инжекционных горелках газовых устройств малой мощности. К ним относится многочисленное семейство горелок газовых плит, бытовых и коммунальных приборов, небольших отопительных котлов, водонагревателей и некоторых промышленных печей. В устройствах, работающих с высокими тепловыми нагрузками (отопительные и промышленные котлы средней и большой мощности, термические печи, сушила и т. п.), необходимость уменьшения размеров горелок и топок, а также быстрого получения больших количеств энергии в ограниченном пространстве обуславливает принцип сжигания при турбулентном движении потоков газа и воздуха.

При турбулентном течении воспламенение и другие внутривламенные процессы протекают в результате перемещения в пространстве мольных масс газов, то есть турбулентной диффузии. При переходе ламинарного режима течения в турбулентный режим гладкий конусный фронт пламени вследствие вихревого движения и пульсаций начинает размываться и терять четкое конусное очертание.

Возрастает толщина зоны горения, которая перестает быть поверхностью горения и становится объемной. При этом наблюдаются две характерные разновидности горения, соответствующие мелкомасштабной и крупномасштабной турбулентности. При мелкомасштабной турбулентности, не превышающей толщины зоны ламинарного горения, конусный фронт пламени сохраняет свою форму и остается гладким, хотя толщина зоны горения заметно увеличивается. Если же масштаб турбулентности несколько превышает толщину зоны нормального горения, то поверхность фронта горения становится неровной, волнистой, на ней как бы наблюдаются выступы и впадины.

Это ведет к увеличению суммарной поверхности фронта горения и, как следствие, к возможности сжигания большего количества топлива на единицу поверхности поперечного сечения потока. В ламинарном пламени нормальная скорость горения является характеристикой газа и не зависит от скорости потока. Характер процессов в турбулентном пламени определяет его важнейшее свойство: турбулентная скорость распространения пламени  $u_t$  является функцией степени его турбулентности, то есть критерия Рейнольдса. Эту зависимость можно выразить через отношение турбулентной и нормальной скорости пламени:

$$\frac{u_t}{u_n} = f(\text{Re}). \quad (5.11)$$

Наглядной иллюстрацией относительного изменения турбулентной скорости распространения пламени в зависимости от критерия Рейнольдса являются результаты экспериментальных исследований (смесь городского газа с воздухом), представленные на рис. 5.4. Примерно до значения  $\text{Re} = 2000$  сохраняется ламинарное течение, и

скорость распространения пламени не зависит от скорости потока (от величины  $Re$ ). В переходной зоне скорость горения резко возрастает, а после достижения развитой турбулентности возрастает равномерно.

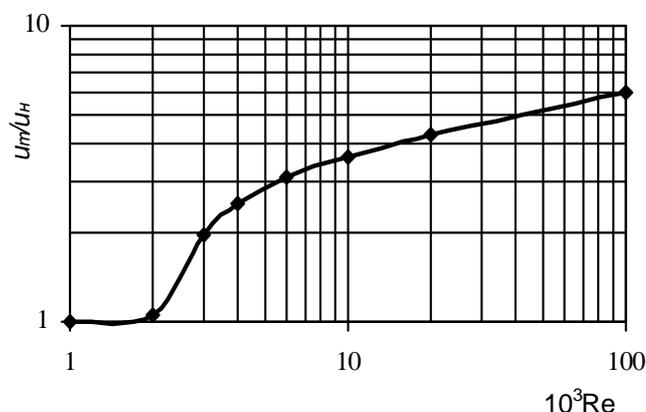


Рис. 5.4. Зависимость относительной турбулентной скорости распространения пламени от  $Re$

При развитой крупномасштабной турбулентности, когда ее масштаб значительно превышает толщину зоны горения, пульсации такой интенсивности, что от него начинают отрываться отдельные молярные объемы горячей смеси. Эти объемы, в свою очередь, подвергаются дальнейшему дроблению последующими пульсациями. Фронт горения теряет свою целостность и превращается в систему отдельных очажков горения в виде похожих на себя выгорающих в потоке частиц горючей смеси.

Таким образом, при крупномасштабной турбулентности (вызванной как турбулентностью потока, так и самим процессом горения) поверхность фронта пламени, состоящая из поверхностей всех горящих частиц, растет, приводя тем самым к резкому увеличению скорости распространения пламени. Этому способствует также то, что при таком режиме может происходить не только фронтальное горение, распространяющееся со скоростью  $u_n$ , но и горение объемное, вызванное турбулентной диффузией раскаленных продуктов горения в свежую горючую смесь. Следовательно, суммарная турбулентная скорость распространения пламени при крупномасштабной турбулентности определяется тем или иным сочетанием элементов фронтального и объемного горения.

Турбулентная скорость распространения пламени  $u_T$ , см/с, применительно к фронтальной модели горения, обычно выражается в виде следующей зависимости от нормальной скорости пламени  $u_H$ , см/с:

$$u_T = u_H \sqrt{1 + B \left( \frac{w'}{u_H} \right)^2}, \quad (5.12)$$

где  $w'$  – среднеквадратичная пульсационная скорость, зависящая от средней скорости потока, см/с;  $B$  – безразмерный коэффициент, зависящий от физико-химических свойств газа, близкий к 1,0.

Формула (5.12) показывает, что при отсутствии пульсаций турбулентная скорость распространения пламени становится равной нормальной скорости. И наоборот, если пульсационная скорость в потоке значительно превышает нормальную скорость распространения пламени, то турбулентная скорость пламени практически не зависит от свойств газа, то есть от  $u_H$ :

$$u_T \approx w' \sqrt{B} \approx w' \quad (5.13)$$

Этот факт подтверждается многочисленными экспериментальными наблюдениями, показывающими сравнительно слабую зависимость скорости сгорания различных гомогенных газоздушных смесей при  $\alpha \geq 1,0$  в промышленных топках от нормальной скорости распространения пламени. Хотя выражение (5.12) и отражает физический смысл турбулентной скорости распространения пламени, оно не может быть использовано в практических расчетах, в основном из-за трудностей определения пульсационных скоростей.

С этой точки зрения заслуживают внимания результаты исследований, приведенные на рис. 5.5. Это исследования процесса турбулентного горения ацетилена, этилена и пропана на бунзеновских горелках в диапазоне значений критерия Рейнольдса  $3000 < Re < 3500$ . Графики показывают, что турбулентная скорость горения зависит от вида газа, диаметра огневого канала горелки и степени турбулизации потока. При этом увеличение турбулентной скорости

распространения пламени с ростом критерия Рейнольдса сначала происходит быстрее, а затем замедляется.

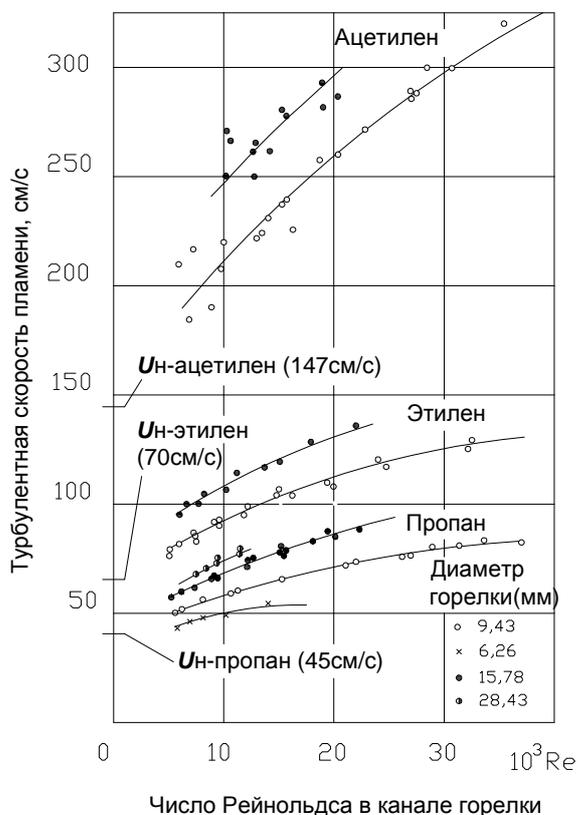


Рис. 5.5. Значения турбулентной скорости горения в зависимости от вида газа, диаметра горелки и числа Рейнольдса

В результате приближенного расчета поверхности турбулентного фронта горения и обработки экспериментальных данных была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$u_t = 0,1761 u_n d^{0,256} Re^{0,238}, \quad (5.14)$$

где  $d$  – диаметр огневого канала горелки, см;  $Re$  – значение критерия Рейнольдса, определенное по средней скорости истечения газовой смеси и диаметру огневого канала.

Однако расчеты, выполненные по формуле (5.14) не всегда согласуются с опытными данными. Это может быть связано с тем,

что формула (5.14) не учитывает подогрева газовой смеси в пристенной области огневого канала и влияния объемного горения.

Теория турбулентного горения представляет собой чрезвычайно сложную задачу, и все еще разработана недостаточно. Поэтому приходится часто пользоваться приближенными данными, полученными из практики или отдельных экспериментов.

Турбулентное пламя не имеет свойства самостабилизации (см разд. 6), поэтому легко отрывается от горелки. Поэтому устройства для турбулентного сжигания газов должны иметь в своей конструкции специальные элементы для непрерывного воспламенения (стабилизации) факела.

## **Контрольные вопросы по разделу 5**

- 1. Что понимают под фронтом пламени?*
- 2. Какую скорость называют равномерной скоростью распространения пламени и от чего она зависит?*
- 3. Какие размеры огневых отверстий называют критическими?*
- 4. Что такое нормальная скорость распространения пламени?*
- 5. Какими методами можно определить нормальную скорость распространения пламени?*
- 6. Как вычисляется нормальная скорость распространения пламени для многокомпонентной смеси горючих газов и для забалластированных газов?*
- 7. Какое горение называется детонационным?*
- 8. Опишите метод определения нормальной скорости распространения пламени в ламинарном потоке газовой смеси с помощью горелки Бунзена.*
- 9. Какими особенностями характеризуется вид пламени при сжигании газа в турбулентном потоке?*
- 10. Как зависит относительная турбулентная скорость распространения пламени от степени турбулентности?*
- 11. Какое уравнение связывает турбулентную и нормальную скорость распространения пламени?*
- 12. Почему при турбулентном сжигании газов необходимы устройства, обеспечивающие стабилизацию процесса горения?*

## 6. УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ

### 6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Стабилизация всего пламени в топочном пространстве является очень сложной задачей. В то же время это одна из основ разработки высокоэффективных и безопасных в эксплуатации горелок самого различного назначения.

При ламинарном горении полностью устойчивой является только нижняя периферийная часть пламени, прилегающая к срезу огневого канала. Внутренний конус пламени в действительности не является геометрически правильным конусом. При ламинарном течении смеси эпюра скоростей в поперечном сечении канала близка к параболическому распределению (см. рис. 5.2.), что в принципе определяет форму всего фронта пламени (рис. 6.1).

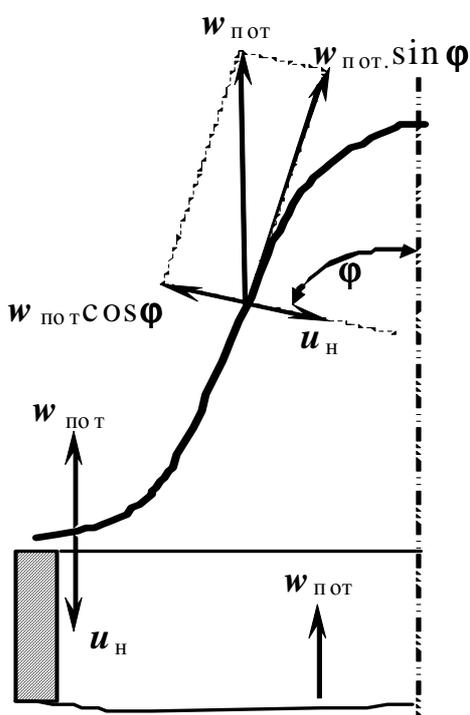


Рис. 6.1. Схема прямой компенсации скоростей в ламинарном пламени

В канале поток находится под некоторым избыточным давлением по отношению к окружающему воздуху, поэтому на выходе он несколько расширяется. Дальнейшее развитие формы пламени определяется взаимодействием аэродинамических процессов и процессов горения.

У основания конуса диаметр фронта пламени несколько больше диаметра огневого отверстия горелки. У стенки скорость потока имеет наименьшее значение в результате трения.

В то же время именно в этой части потока нормальная скорость

распространения пламени также минимальна из-за охлаждающего действия стенок и окружающей среды. Поэтому у основания конуса возникают условия для прямой и полной взаимной компенсации скорости потока и скорости распространения пламени. В соответствии с выражением (5.6) это выглядит следующим образом:

$$\cos \varphi = 1,0; \quad w_n = w_{\text{пот}}.$$

Фронт пламени у стенки развивается в горизонтальной плоскости, создавая своеобразный концентрический пояс. Являясь зоной стабильного горения, он выполняет функцию постоянно действующего источника воспламенения.

По мере перемещения к оси потока его скорость растет, и скорость пламени может компенсировать уже только нормальную проекцию осевой скорости потока ( $w_{\text{пот}} \sin \varphi$ ). Тангенциальная составляющая осевой скорости потока ( $w_{\text{пот}} \cos \varphi$ ) остается некомпенсированной и сносит зону воспламенения все дальше вперед по оси потока по сравнению с параболическим распределением скоростей. Форма фронта пламени становится все более наклонной, приближающейся к конусной. Однако повышение температуры газовой смеси неизбежно отражается на увеличении нормальной скорости распространения пламени, и на вершине конуса скорости потока и пламени снова не уравниваются в горизонтальной плоскости.

Таким образом, стабилизация конусного фронта ламинарного пламени обусловлена наличием постоянного источника воспламенения в виде самостабилизирующегося кольцевого пояса, без которого остальная конусная часть пламени была бы снесена потоком газовой смеси.

Чем более «богатой» является смесь, тем проще осуществить стабилизацию горения, поэтому наиболее устойчивым является диффузионный факел, когда по каналу горелки подается чистый газ, а

воздух, необходимый для горения, поступает из окружающей атмосферы. По существу диффузионный факел обладает способностью полной самостабилизации.

По мере повышения форсировки горелки, то есть при постепенном переходе от ламинарного горения к турбулентному, ширина воспламеняющего пояска начинает сначала уменьшаться, а затем становится ничтожно малой.

Вместе с тем уменьшается тепловая мощность горелки и становится недостаточной для надежного воспламенения факела. В этом случае фронт пламени не получает стабильного воспламенения, его однородность нарушается, и факел начинает отрываться от среза огневого канала.

В противоположном случае, при чрезмерном снижении нагрузки горелки, скорость распространения пламени в кольцевой пристенной области потока смеси может превысить скорость самого потока и пламя начнет втягиваться внутрь смесителя горелки.

Первый случай в технике сжигания топлива получил название *отрыва пламени*, а второй — название *проскока пламени* или *обратного удара пламени*.

## **6.2. ЯВЛЕНИЕ ОТРЫВА ПЛАМЕНИ**

Общее понятие отрыва пламени в практике сжигание газов может иметь несколько характерных разновидностей:

- полный срыв пламени с горелки, вызывающий его погасание;
- отрыв от кромки огневого канала и достижение его нового, достаточно устойчивого положения в потоке на некотором расстоянии от горелки (так называемое «висящее, взвешенное» пламя);
- отрыв «висящего» пламени, приводящий к его погасанию;
- обратный отброс «висящего» пламени к кромке огневого канала горелки.

Все эти разновидности рассматриваемого явления недопустимы, поскольку нарушают работу устройств для сжигания топлива,

снижают эффективность его использования, вызывают выброс повышенного количества продуктов химического недожога и токсических веществ в атмосферу (см. разд. 8), а также возможность образования взрывоопасной смеси в топке, газоходах и помещениях.

На рис. 6.2. приведены приближенные усредненные графические зависимости отрыва пламени от кромки огневых каналов однофакельных горелок, работающих в спокойной открытой атмосфере на холодной смеси природного газа с воздухом. На линии этих кривых наблюдаются первые признаки неустойчивого горения, при более высоких скоростях — отрыв пламени, а ниже этих кривых — устойчивое горение.

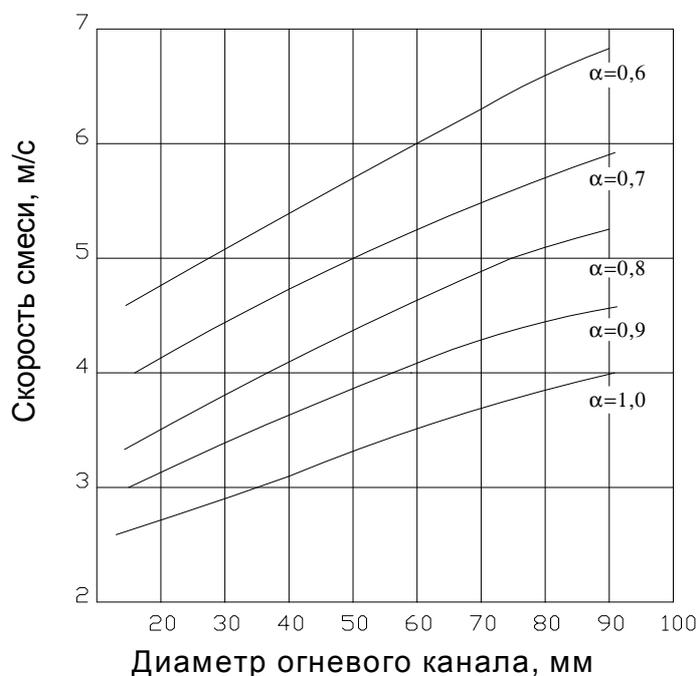


Рис. 6.2. Скорость отрыва одиночного пламени в открытой атмосфере для смесей природного газа с воздухом в зависимости от диаметра горелки и содержания первичного воздуха

духа еще перед воспламенением превышает стехиометрический состав ( $\alpha_1 > 1,0$ ).

Это снижает скорость распространения пламени и, как следствие, приводит к его отрыву при меньших скоростях. В практике

Графики показывают, что увеличение диаметра горелки приводит к росту скорости отрыва, то есть горение становится более устойчивым. А увеличение содержания первичного воздуха в смеси (более «бедная» смесь) снижает скорость отрыва пламени.

Причиной этого является резкое разбавление газозвушной смеси на срезе канала воздухом из окружающей атмосферы. В случае бедной смеси значение коэффициента избытка воз-

газоснабжения бытовых и коммунальных потребителей широкое распространение получили разнообразные конструкции многофакельных инжекционных горелок с огневыми каналами диаметром от 2 до 6 мм.

Усредненные экспериментальные данные, характеризующие условия отрыва пламени от кромок огневых каналов таких горелок, приведены на рис. 6.3.

Определить скорость отрыва пламени  $w_{отр.}$ , м/с, для таких горелок можно также при помощи эмпирического выражения

$$w_{отр.} = 3,6 \cdot 10^{-3} d T^2 \frac{1 + V_B^T}{1 + \alpha_1 V_B^T}, \quad (6.1)$$

где  $d$  – диаметр огневых каналов, м;  $V_t$  – теоретический потребность в воздухе,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа;  $\alpha_1$  – коэффициент избытка первичного воздуха;  $T$  – абсолютная температура стенок огневых каналов, К.

Формула (6.1) показывает, что устойчивость горения в отношении отрыва пламени растет с увеличением диаметра огневых каналов, но снижается при увеличении коэффициента избытка воздуха в смеси.

Особенностью многопламенных горелок является повышение устойчивости горения в результате взаимного воспламеняющего воздействия факелов соседних каналов.

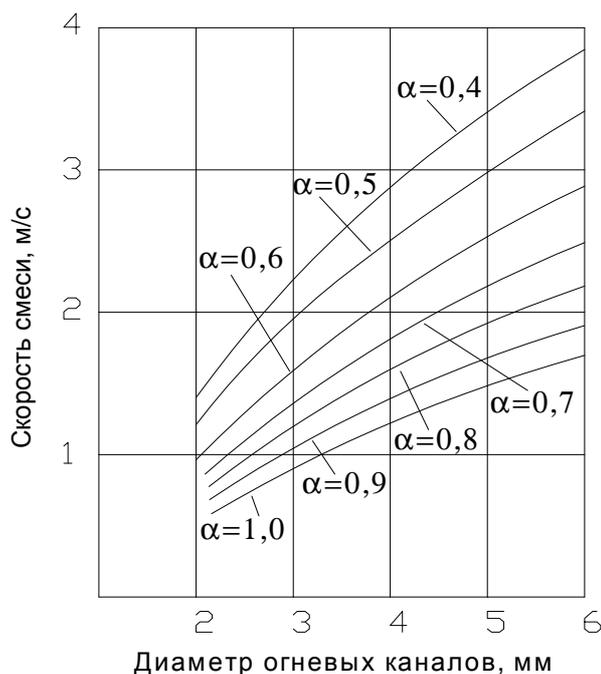


Рис. 6.3. Скорость отрыва многофакельного пламени в открытой атмосфере для смесей природного газа с воздухом в зависимости от диаметра огневых каналов и содержания первичного воздуха

Графики (рис. 6.3) и формулу (6.1) можно с достаточной для инженерных расчетов точностью использовать не только при сжигании природного газа, но и газов с близкими значениями нормальной скорости распространения пламени (например, сжиженные углеводородные газы). В некоторых случаях отрыв пламени от кромки огневых каналов может быть вызван причинами, не связанными с рассмотренными выше факторами. При неправильном расположении инжекционной горелки и плохо организованном отводе продуктов сгорания последние могут попасть в инжектор. Уменьшение скорости распространения пламени в забалластированной смеси может в этом случае привести к отрыву.

Причиной отрыва может также быть слишком высокая скорость вторичного воздуха, который сдувает пламя с кромок огневых каналов. В некоторых случаях инжектор горелки и ее огневые каналы находятся в резко отличающихся условиях наружного давления. Например, инжектор горелки может находиться в атмосфере помещения, а распределительный коллектор с огневыми каналами — в топке газоиспользующего агрегата, работающего в условиях изменяющегося по величине разрежения. Это также приводит к нестабильности горения, а в крайних случаях — к отрыву пламени.

### **6.3. ЯВЛЕНИЕ ПРОСКОКА ПЛАМЕНИ**

Не менее опасным и, поэтому, недопустимым является также явление проскока пламени внутрь смесительного канала горелки. Проскок пламени обычно сопровождается хлопком (взрывом), который вызывает:

- погасание пламени и поступление горючей смеси в помещение или в топку устройства, что грозит последующим взрывом;
- горение внутри канала горелки или непосредственно на выходе из газового сопла, что резко ухудшает условия поступления и

смешения первичного воздуха с газом и приводит к явлению химического недожога с выбросом в атмосферу оксида углерода и других продуктов неполного сгорания топлива.

Тенденция работы горелок к проскоку пламени зависит от вида горючего газа (его нормальной скорости распространения пламени), содержания первичного воздуха в газозоудшной смеси, размеров огневых каналов, температуры смеси или температуры стенок огневых каналов. Влияние на проскок пламени оказывает также коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнены огневые каналы, их форма, глубина и качество выполнения (наличие заусенцев, царапин, обломанных краев и т. п.).

В табл. 6.1 и 6.2 приведены полученные экспериментально значения скоростей газозоудшнх смесей (для природных и сжиженных углеводородных газов), при которых наблюдается проскок пламени внутрь смесителей инжекционных горелок.

Данные этих таблиц показывают, что скорость смеси, при которой происходит проскок пламени, зависит от размера огневого канала, коэффициента избытка первичного воздуха в смеси и вида горючего газа. При этом максимальное значение скорости проскока соответствует содержанию воздуха в горючей смеси, близкому к стехиометрическому соотношению.

Максимальные значения скорости проскока пламени  $w_{\text{пр}}$ , м/с, при  $\alpha_1 = 0,95$  можно определить по следующим приближенным зависимостям (обозначения как в формуле (6.1)):

- для природного газа

$$w_{\text{пр}} = 0,73 \cdot 10^{-3} dT^2, \quad (6.2)$$

- для сжиженных углеводородных газов

$$w_{\text{пр}} = 0,88 \cdot 10^{-3} dT^2. \quad (6.3)$$

Таблица 6.1

**Приближенные значения скорости смеси природного газа с воздухом, м/с, при которой происходит проскок пламени (температура смеси 20 °С)**

Диаметр огневого канала, мм	Коэффициент избытка первичного воздуха $\alpha_1$					
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
3,5	0,05	0,10	0,18	0,22	0,23	0,15
4,0	0,08	0,12	0,22	0,25	0,26	0,18
5,0	0,09	0,16	0,27	0,31	0,32	0,22
6,0	0,11	0,18	0,32	0,38	0,38	0,26
7,0	0,13	0,22	0,38	0,44	0,45	0,30
8,0	0,15	0,25	0,43	0,50	0,52	0,35
9,0	0,17	0,28	0,48	0,57	0,58	0,39
10,0	0,20	0,30	0,54	0,64	0,65	0,43

Таблица 6.2

**Приближенные значения скорости смеси сжиженных углеводородных газов с воздухом, м/с, при которой происходит проскок пламени (температура смеси 20 °С)**

Диаметр огневого канала, мм	Коэффициент избытка первичного воздуха $\alpha_1$					
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
3,5	0,08	0,12	0,21	0,25	0,25	0,17
4,0	0,09	0,14	0,25	0,29	0,29	0,20
5,0	0,11	0,18	0,31	0,36	0,37	0,25
6,0	0,13	0,21	0,37	0,44	0,45	0,30
7,0	0,15	0,25	0,44	0,50	0,51	0,35
8,0	0,18	0,28	0,50	0,57	0,58	0,40
9,0	0,20	0,32	0,56	0,65	0,65	0,45
10,0	0,23	0,35	0,62	0,74	0,75	0,50

### 6.3.1. Результаты экспериментальных исследований

В практике инженерных расчетов максимальные скорости истечения газозвушной смеси, при которой происходит проскок пламени, чаще всего, принимаются на основании результатов экспериментальных данных. Одна из наиболее достоверных серий экспериментов была выполнена на инжекционных горелках с прямыми смесительными каналами, в условиях, приближающихся к сжиганию газа на промышленных установках.

С целью более глубокого исследования влияния физико-химических характеристик газов на проскок пламени эти исследования проводились на природном и сланцевом газах, а также на их смесях.

Обобщение многочисленных экспериментальных данных позволило получить следующие выражения для определения скорости проскока пламени при сжигании любых горючих газов, применяемых для газоснабжения населенных пунктов:

- при сжигании открытым факелом в окружающем воздухе

$$w'_{\text{пр}} = 4,5 \cdot 10^{-3} u_{\text{н}}^2 d/a ; \quad (6.4)$$

- при сжигании в топке с керамическим туннелем

$$w'_{\text{пр}} = 7,75 \cdot 10^{-3} u_{\text{н}}^2 d/a , \quad (6.5)$$

где  $w'_{\text{пр}}$  – скорость проскока пламени, м/с, соответствующая коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1=1,0$ ;  $d$  – диаметр огневого канала горелки, м;  $u_{\text{н}}$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности газозвушной смеси, м<sup>2</sup>/с.

Например, для смеси природного газа с воздухом (при  $\alpha_1 = 1,0$ ;  $t = 20$  °С) значение коэффициента температуропроводности составляет примерно  $20 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а нормальная скорость распространения пламени — 0,36 м/с. Подставляя эти значения в выражения (6.4) и

(6.5), получим следующие значения максимальной скорости смеси природного газа с воздухом, при которой еще возможен проскок пламени:

- для горелок, работающих в открытой атмосфере, а также для горелок с водоохлаждаемой огневой насадкой, установленной в туннеле топки

$$w'_{\text{пр}} \approx 30d ; \quad (6.6)$$

- для горелок без водоохлаждаемых насадок, установленных в туннеле топки

$$w'_{\text{пр}} \approx 50d . \quad (6.7)$$

На рис. 6.4 приведены приближенные значения скорости проскока для стехиометрических смесей природного и сжиженного углеводородного газа с воздухом. Опыты проводились на серийных прямых неохлаждаемых инжекционных горелках, устанавливаемых в открытой атмосфере и в тщательно выполненных туннелях, предотвращающих перегрев торцов и стенок огневых каналов горелок.

Однако даже в этих условиях скорость проскока пламени для горелок, установленных в туннеле, была значительно выше по сравнению со сжиганием в открытом пространстве. Причем разница скоростей отрыва возрастает с увеличением диаметра огневого канала горелки.

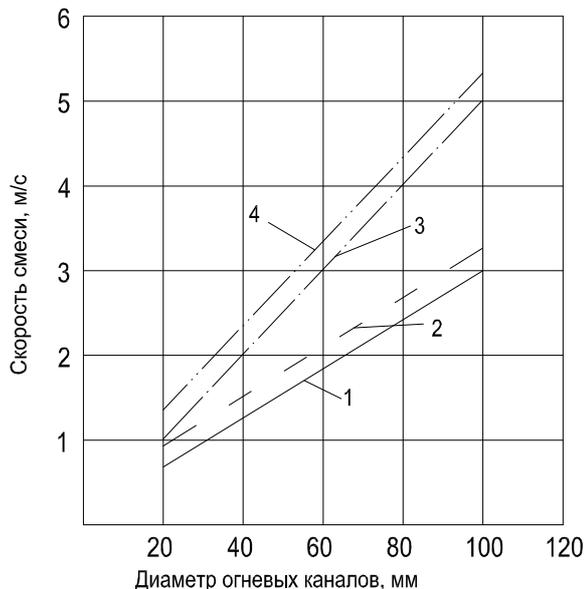


Рис. 6.4. Максимальная скорость проскока пламени ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 101325 \text{ Па}$ ) инжекционных однофакельных горелок для газозвоздушных смесей при  $\alpha = 1,0$ : 1, 3 – природный газ; 2, 4 – сжиженный газ; 1, 2 – сжигание в открытой атмосфере; 3, 4 – горелка установлена в туннеле

В случае неправильно или небрежно выполненных туннелей, а также при использовании угловых горелок с близко расположенным коленом, проскок пламени наблюдался при более высоких значениях скорости по сравнению графиками. Это объясняется как чрезмерным нагревом кромок и стенок огневых каналов, так и неравномерным по сечению канала профилем скорости в результате близкого расположения колена горелки.

На рис. 6.5 графически представлены границы устойчивой работы горелок при сжигании природного газа в виде.

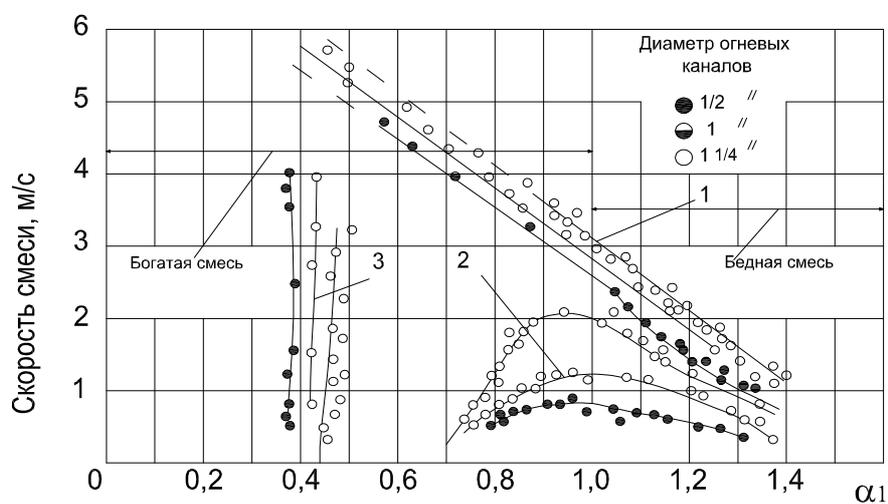


Рис. 6.5. Область устойчивого и полного сгорания:  
1 – кривые отрыва пламени; 2 – кривые проскока пламени;  
3 – кривые появления желтых краев пламени

Область устойчивого горения ограничена кривыми отрыва пламени (наклонные кривые 1) и его проскока в канал горелки (U-образные кривые 2), в зависимости от коэффициента избытка первичного воздуха в горючей смеси  $\alpha_1$  и от диаметра огневого канала горелки.

Как следует из этих данных, область устойчивого горения резко сужается при увеличении содержания первичного воздуха в смеси выше стехиометрического соотношения ( $\alpha_1 = 1,0$ ). И, наоборот, обогащение смеси увеличивает устойчивость горения, которая достигает

максимума при  $\alpha_1 = 0$ , то есть при переходе к диффузионному горению.

Однако в большинстве случаев такое горение является недопустимым, поскольку сопровождается появлением желтого ярко светящегося пламени, свидетельствующего о неполном сгорании топлива. Содержание первичного воздуха, соответствующее первым признакам неполного сгорания (появление желтых «язычков» пламени) на рис. 6.5 характеризует группа кривых 3. Во всех устройствах, где светящееся пламя считается недопустимым (например, бытовые газовые плиты, котлы с низкими топками и т. п.), содержание первичного воздуха в смеси принимается несколько больше того значения, при котором появляются желтые края пламени.

При необходимости работы горелок без проскока на очень низких нагрузках содержание первичного воздуха в смеси принимается несколько меньше соответствующего верхнему пределу воспламенения (см. формулу (4.11)).

Предотвращение проскока пламени при большом содержании большого содержании первичного воздуха в смеси (в том числе при  $\alpha_1 > 0$ ) достигается уменьшением размера огневых каналов до значений меньше критических.

#### **6.4. ПРИНЦИПЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ**

В соответствии с общим принципом расширения диапазона устойчивого горения любых горючих газоздушных смесей скорость потока принимается в несколько раз больше скорости отрыва пламени, чтобы гарантировать отсутствие опасности проскока пламени на любых нагрузках. Однако такие высокие скорости вылета требуют применения специальной искусственной стабилизации пламени, предотвращающей его отрыв. Наиболее распространенные способы стабилизации пламени в технике иллюстрирует рис. 6.6.

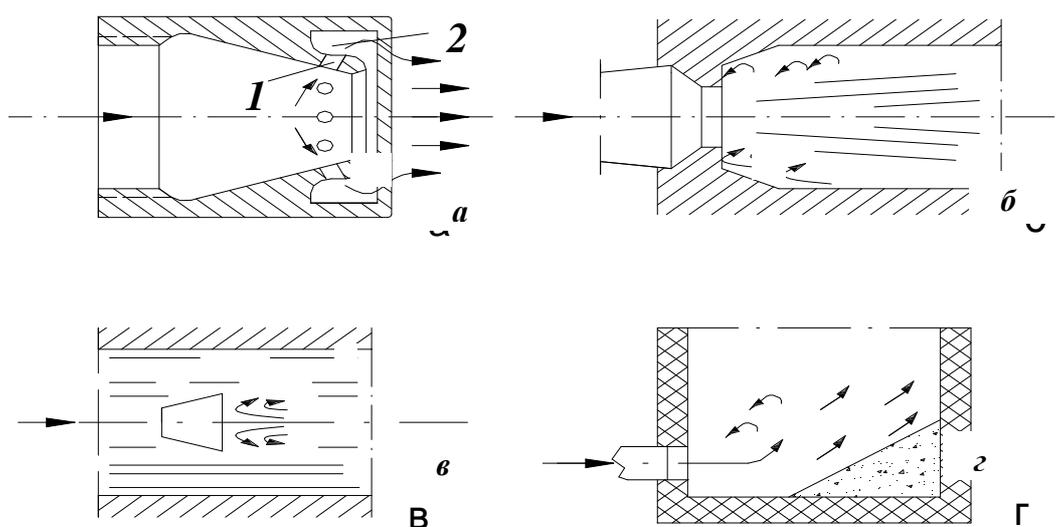


Рис. 6.6. Схемы стабилизаторов горения в отношении отрыва пламени: *а* – кольцевой стабилизатор; *б* – стабилизирующий туннель; *в* – центральный конический стабилизатор; *г* – шамотная горка

В стабилизаторе, показанном на рис. 6.6, *а*, часть газозвушной смеси (5...10 % ее общего расхода) через отверстия *1* отводятся в кольцевой канал *2*, окружающий головку инжекционной горелки. Благодаря соответствующему подбору геометрических размеров вокруг главного факела образуется спокойное устойчивое кольцевое пламя. Его стабилизирующее действие заключается в предотвращении разбавления главного потока у основания факела (так называемый «корень» факела), а также на подогреве и зажигании основного потока смеси по всей его периферии. Диаметры боковых отверстий стабилизатора, формирующих кольцевое пламя, принимаются несколько меньше критических величин (см. п. 5.1.1). Например, для природных и сжиженных газов этот диаметр составляет 2...3 мм.

Еще более надежную стабилизацию в отношении отрыва пламени обеспечивают туннели из огнеупорных материалов (рис. 6.6, *б*). Это могут быть керамические туннели заводского изготовления (при небольших диаметрах) или туннели, выполняемые на месте из

огнеупорной массы. Стабилизирующее действие туннеля основано на рециркуляции части потока образовавшихся раскаленных продуктов сгорания к корню факела в месте возникновения области разрежения при резком расширении струи. Кроме того, раскаленная поверхность туннеля является источником стабильного зажигания вдоль факела в случае кратковременных неблагоприятных флуктуаций скорости или состава смеси. Конструкция стабилизирующих туннелей и их оптимальные размеры могут существенно отличаться в зависимости от типа горелки и способа ее установки в топке.

В тех случаях, когда установка кольцевых стабилизаторов и расширяющихся туннелей невозможна или нежелательна, применяются осесимметричные стабилизаторы в виде плохообтекаемых тел (трапециевидные, конусные, U-образные), размещаемые в центральной части потока горячей смеси (рис. 6.6, в). Их стабилизирующее действие, как и в случае туннелей, заключается в рециркуляции раскаленных продуктов сгорания к месту истечения газозвдушной смеси (к корню факела).

Однако в случае туннелей воспламенение происходит по периметру потока, а в случае осесимметричных стабилизаторов — в его центральной части (изнутри факела). Простейшим способом такой стабилизации является размещение поперек потока стержней соответствующего сечения, создающих обратные токи продуктов сгорания.

В некоторых случаях стабилизацию горения в топке устройства обеспечивают наиболее дешевым способом — в виде шамотной горки (наброски), размещаемой в топке в непосредственной близости от амбразуры горелки (рис. 6.6, г). Этот способ характерен для камерных топок, работающих без отвода теплоты (так называемые предтопки), назначением которых является приготовление потока теплоносителя, для его последующего использования в сушильных установках, термических и нагревательных печах и т. п.

## Контрольные вопросы по разделу 6

1. *Какие условия необходимы для создания устойчивой зоны горения?*
2. *Какие явления называют отрывом и проскоком (обратным ударом) пламени?*
3. *От каких факторов зависит диаметр огневых отверстий газогорелочных устройств?*
4. *Как влияет диаметр огневых отверстий на скорость отрыва пламени?*
5. *Как изменяется скорость отрыва пламени при увеличении коэффициента избытка воздуха?*
6. *Назовите возможные последствия проскока пламени внутрь смесителя газовой горелки.*
7. *Как изменяется область устойчивого горения при увеличении содержания первичного воздуха в газозоудушной смеси?*
8. *Какие способы стабилизации пламени применяются в современных газоиспользующих установках?*
9. *Назовите основные типы стабилизаторов горения.*
10. *Почему наличие кольцевого стабилизатора приводит к повышению устойчивости горения?*
11. *Назовите преимущества стабилизирующих туннелей из огнеупорных материалов.*
12. *Какой принцип стабилизации реализуется при использовании стабилизаторов плохо обтекаемой формы?*

## 7. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ

### 7.1. ПРИНЦИПЫ ЭФФЕКТИВНОГО И БЕЗОПАСНОГО СЖИГАНИЯ ГАЗОВ

Согласно современным научным воззрениям оптимальная организация эффективного и безопасного сжигания газообразного топлива в потоке с воздухом основывается на ряде принципов, из которых предельными случаями являются принципы кинетического и диффузионного сжигания.

Оба термина являются весьма условными, поскольку каждый процесс сжигания является реализацией определенного сочетания кинетических и диффузионных факторов. Тем не менее, использование этих понятий удобно. Они позволяют обобщенно охарактеризовать состояние газовой смеси перед сжиганием, вид, структуру и размеры различных типов пламени, а также протекающие в нем процессы.

При **кинетическом сжигании** предварительно (до начала воспламенения) готовится однородная горючая газозвудушная смесь, содержащая воздух в несколько большем количестве, чем это требуется по стехиометрическим соотношениям. Сгорание такой смеси происходит в коротком «жестком» прозрачном факеле, без видимых признаков пиролизических процессов, приводящих к термическому распаду углеводородов и образованию в пламени сажистых частиц, что вызывает свечение пламени в желтой части спектра.

Процесс кинетического горения может протекать при почти неограниченной объемной плотности теплового потока в зоне горения и практически без химического недожога. Недостатками кинетического принципа сжигания являются: малая устойчивость пламени в отношении отрыва и проскока пламени, невозможность регулирования скорости сгорания смеси и трудность сжигания газа с предварительно нагретым воздухом. Обычно для сжигания газа по этому принципу

применяются специальные смесители или инжекционные горелки, обеспечивающие приготовление однородной газовой смеси с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,02 \dots 1,05$ .

Если содержание первичного воздуха газовой смеси меньше стехиометрического ( $\alpha_1 < 1,0$ ), то по кинетическому принципу протекает только начальный этап горения — вплоть до использования кислорода, содержащегося в смеси. Оставшаяся часть горючих газов вместе с продуктами неполного сгорания, образовавшимися на первой стадии, сгорает за счет диффузии кислорода из окружающего воздуха, то есть по диффузионному принципу сжигания.

Особенностью пламени при сжигании смеси с  $\alpha_1 < 1,0$  является наличие двух видимых фронтов горения: внутреннего, образующегося за счет первичного воздуха и наружного, в котором горение происходит в результате диффузии кислорода из окружающей пламя воздушной среды (см. рис. 5.3). В результате растягивания процесса смешения при таком сжигании длина пламени увеличивается, а температура несколько снижается. Устойчивость такого пламени и его прозрачность (при прочих равных условиях) зависит от содержания первичного воздуха в смеси. Чем выше содержание первичного воздуха в смеси, тем ниже устойчивость пламени и больше его прозрачность, и наоборот.

Принцип сжигания газов при  $\alpha_1 < 1,0$  является промежуточным между кинетическим и диффузионным принципами, его называют **смешанным принципом сжигания**. Он широко используется в большинстве бытовых и коммунальных газовых приборов, а также некоторых промышленных аппаратах, оборудованных инжекционными горелками. Содержание первичного воздуха в смеси принимается в зависимости от вида газа, таким, чтобы в пламени не протекали пиролизные процессы, и обеспечивалась естественная стабилизация пламени во всем возможном диапазоне изменения тепловой нагрузки устройства.

При **диффузионном принципе сжигания** газового топлива ( $\alpha_1 = 0$ ) процессы горения и смешения развиваются параллельно. Поскольку процессы смешения протекают значительно медленнее процессов горения, то скорость и полнота сгорания определяются скоростью и качеством смешения топлива с воздухом. Смешение газа с воздухом при диффузионном принципе сжигания может протекать либо в виде медленной молекулярной диффузии, либо путем турбулентной диффузии, которая включает в себя молекулярную на заключительной стадии.

В соответствии с этим отличаются и скорость горения, и структура диффузионного пламени (рис. 7.1). На рис. 7.1, *а* приведена упрощенная схема свободного ламинарного факела, возникающего за счет взаимной молекулярной диффузии газа и воздуха. Внутри конусного ядра 1 находится чистый газ, истекающий из канала горелки при ламинарном режиме течения. В зоне 2 образуется смесь, состоящая из газа и продуктов сгорания, а в зоне 3 — смесь из продуктов сгорания и окружающего воздуха. Граница 4 между зонами 2 и 3 представляет собой гладкий конусный фронт пламени, к которому изнутри диффундируют молекулы газа, а снаружи — молекулы воздуха.

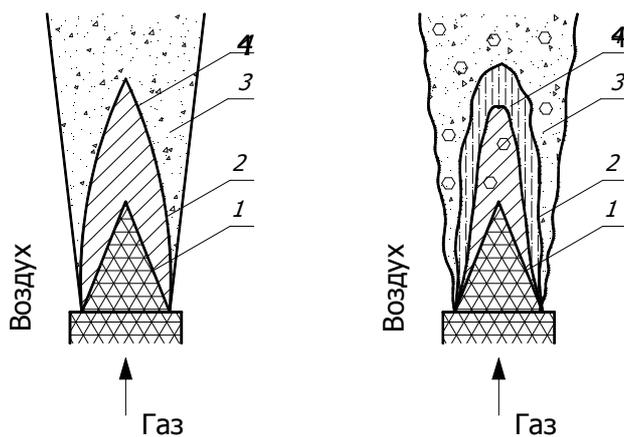


Рис. 7.1. Структура свободного диффузионного пламени:  
*а* – ламинарное пламя; *б* – турбулентное пламя

Образовавшиеся во фронте пламени продукты сгорания частично диффундируют навстречу газу, интенсивно нагревая его в предпламенной зоне 2, а частично в окружающий факел воздух (зона 3). Нагрев газа раскаленными продуктами сгорания, не содержащими кислорода, приводит к частичному термическому распаду (пиролизу) углеводородов и образованию частиц сажи, придающих пламени яркое желтое свечение.

Достоинствами диффузионного способа сжигания являются:

- высокая устойчивость пламени при изменении тепловых нагрузок от нуля до максимально возможных, по условиям отрыва пламени, величин;

- сравнительно постоянная температура по всей высоте (длине) пламени;

- возможность распределения пламени на большой поверхности практически любой формы;

- компактность и простота изготовления горелок.

Однако при таком сжигании необходимо учитывать следующие его характерные особенности:

- значительную высоту пламени;

- низкая интенсивность горения;

- недопустимость омывания пламенем поверхностей теплообмена;

- необходимость большого объема топок, обеспечивающего свободное развитие пламени;

- неизбежность пиролитических процессов при сжигании углеводородных топлив;

- наличие в отходящих газах продуктов незавершенного горения.

По этим причинам ламинарное сжигание на основе принципа диффузионного молекулярного смешения применяется только в устройствах, где не требуются высокие объемные плотности теплового потока в топочной камере и обеспечиваются условия свободного развития пламени. Это преимущественно чугунные секционные и

некоторые конструкции водотрубных котлов. Но и в этих случаях рекомендуется дробить газовый поток на тонкие струи, направленные под углом к потоку воздуха, чтобы обеспечить интенсификацию процессов смешения и горения.

Значительная интенсификация процесса горения достигается применением методов естественной и искусственной турбулизации смешивающихся потоков. На рис. 7.1, б показана упрощенная схема свободного турбулентного диффузионного факела, основанная на результатах химического анализа проб, отобранных из различных областей горящей струи.

В отличие от ламинарного горения в этом случае нет четкого конусного фронта пламени. Фронт горения размыт и раздроблен на отдельные горящие частицы в результате пульсаций и завихрений, имеющих место при турбулентном течении.

Результаты газового анализа показывают наличие в факеле ядра чистого газа 1, области сравнительно медленного горения 2 с преобладающим содержанием в ней газа, размытой зоны наиболее интенсивного горения 3 с наиболее высоким содержанием продуктов сгорания и зоны горения 4 с преобладанием в ней воздуха. При этом не существует четких границ между этими зонами, и они постоянно смещаются и меняют очертания в зависимости от степени турбулизации потоков.

Характерными особенностями турбулентного диффузионного горения по сравнению с ламинарным являются: протекание процесса горения по всему объему факела, значительное повышение интенсивности горения, большая прозрачность пламени и его меньшая устойчивость по отношению к отрыву.

Сжигание газа по турбулентному диффузионному принципу широко используется в котельной технике и промышленных печах. При этом используется как естественная турбулизация за счет повышения скорости потоков газа и воздуха, так и их искусственная турбулизация. В последнем случае наиболее часто применяется закрутка воздушного

потока при помощи лопаток и подача в закрученный поток воздуха тонких струй газа. Если создать условия, при которых процессы смешения будут несколько опережать процессы горения, то диффузионное горение может перейти в кинетическое или промежуточное. В практике это достигается устройством дополнительного участка смешения между лопаточным завихрителем и туннелем или амбразурой горелки.

Такое решение обеспечивает создание однородной или близкой к ней смеси с  $\alpha_1 > 1,0$ , сгорающей в прозрачном пламени. Исследования и практика показывают, эффективность этого способа улучшения процессов смешения и снижения химического недожога. Перенос процессов смешения вместе с горением в топку сопровождается, как правило, свечением пламени и возникновением недожога, особенно в секционных и экранированных топках котлов.

Некоторое повышение светимости пламени и сопутствующее повышение степени его черноты может быть позитивным фактором в котлах с экранированными топками. В соответствии с законом Стефана — Больцмана лучистый поток энергии от пламени определяется выражением:

$$q_o = \epsilon \sigma_o T^4, \quad (7.1)$$

где  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $T$  – абсолютная температура пламени, К;  $\epsilon$  – степень черноты пламени.

Однако, анализируя формулу (7.1), нетрудно убедиться, что повышение степени черноты пламени даже в 1,5...2 раза при сопутствующем падении температуры всего на 10...20 % не приведет к росту лучистого потока энергии. Поэтому обоснованы только такие способы «подсветки» пламени, которые не приводят к заметному снижению температуры горения.

Наиболее распространено введение небольшого количества газообразных или жидких углеводородов в высокотемпературное ядро пламени. Максимальный эффект достигается в термических печах,

работающих на предварительно нагретом воздухе. При сжигании газа в котлах, оборудованных газомазутными горелками, применяется «подсветка» топки путем добавления небольшого количества мазута при работе котла на газе.

В практике используется также **пульсирующий метод сжигания** газа. В этом случае горение газа происходит без горелки в специальной камере сгорания. Газ и воздух подаются в камеру сгорания отдельно через обратные клапаны. Для первичного розжига используется свеча зажигания. Затем она выключается. Состав газозвушной смеси близок к верхнему пределу воспламеняемости.

При сгорании газозвушной смеси давление в камере повышается, при этом порция продуктов сгорания выбрасывается из камеры сгорания. Обратные клапаны (на газе и воздухе) закрываются. После сброса продуктов сгорания давление в камере уменьшается, обратные клапаны открываются, и в разогретую камеру поступает новая порция газа и воздуха. Происходит воспламенение горючей смеси, но уже не от искры, а от нагретой камеры и оставшихся горячих продуктов сгорания. Процесс воспламенения и выброса продуктов сгорания происходит примерно 30 раз в секунду. Соотношение газ — воздух обеспечивается автоматически при помощи обратных клапанов. Такой метод сгорания используют в котлах небольшой мощности.

## **7.2. КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛОК**

Постоянное развитие техники сжигания газов привело к тому, что одновременно в эксплуатации находится огромное количество разнообразных конструкций горелок. В предлагаемом разделе описываются общие требования к газогорелочным устройствам, классификация газовых горелок и систематизация сведений об их конструкции и принципах действия.

Газовая горелка — это устройство, обеспечивающее устойчивое сгорание топлива и возможность регулирования процесса горения. Горелка, оборудованная дополнительным устройством, например,

огнеупорным туннелем-стабилизатором, дутьевым вентилятором и т. п., называется газогорелочным устройством (ГГУ).

### **7.2.1. Основные требования к газогорелочным устройствам и их технические характеристики**

Требования, предъявляемые к конструированию горелок, можно свести к следующим основным положениям:

- создание условий для полного сгорания газа с минимальным избытком воздуха и выходом вредных веществ в продуктах сгорания;
- обеспечение необходимой теплопередачи и максимального использования теплоты сгорания газового топлива;
- наличие пределов регулирования, не меньших, чем требуемое изменение тепловой мощности агрегата;
- отсутствие сильного уровня шума (не более 85 дБ);
- простота конструкции, удобство ремонта, безопасность эксплуатации;
- возможность применения автоматики регулирования и безопасности;
- соответствие современным требованиям промышленной эстетики.

*Тепловая мощность* горелки, кВт, — количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании секундного расхода газа, проходящего через горелку. Различают номинальную, максимальную и минимальную тепловую мощность горелок. Номинальная тепловая мощность — максимально достигнутая мощность при длительной работе горелки с минимальным коэффициентом избытка воздуха и при допустимой по установленным нормам химической неполноте сгорания. Минимальная тепловая мощность определяет тот нижний предел работы горелки с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ , при котором горелка работает устойчиво. Максимальная тепловая мощность составляет 0,9 от мощности, соответствующей верхнему пределу работы горелки.

*Коэффициент предельного регулирования* по тепловой мощности (диапазон устойчивой работы горелки) — отношение максимальной тепловой мощности горелки к минимальной.

*Коэффициент рабочего регулирования* — отношение номинальной тепловой мощности горелки к минимальной.

*Давление газа и воздуха перед горелкой*, Па, подразделяется на номинальное, максимальное и минимальное. Номинальное соответствует номинальной тепловой мощности, максимальное и минимальное — соответственно максимальной и минимальной тепловой мощности горелки.

*Удельная металлоемкость*, кг/кВт, — отношение массы горелки к ее номинальной тепловой мощности.

*Шумовая характеристика* — уровень звукового давления, создаваемого при работе горелки в зависимости от спектра частот. Уровень шума горелок, работающих во всем диапазоне изменения расхода газа, не должен превышать 85 дБ на расстоянии 1 м от горелки и на высоте 1,5 м от пола.

*Номинальная относительная длина факела* — расстояние по оси факела от выходного сечения горелки, измеренное при работе с номинальной тепловой мощностью в калибрах выходного сечения до точки, где концентрация оксида углерода при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$  составляет 95 % от максимального значения.

*Давление (разрежение) в камере сгорания*, Па, — давление (разрежение) в камере сгорания в зоне выходного сечения горелки при номинальной тепловой мощности.

*Коэффициент избытка первичного воздуха*  $\alpha_1$  показывает, какая часть воздуха от теоретически необходимого для сгорания газа подается в горелку предварительно (до пламени).

*Коэффициент избытка вторичного воздуха*  $\alpha_2$  показывает, какая часть воздуха от теоретически необходимого для сгорания газа подается непосредственно к пламени из окружающего пространства.

*Объемный коэффициент инжекции (кратность инжекции)*, показывает отношение объема первичного воздуха к объемному расходу газа.

### **7.2.2. Классификация газовых горелок**

Согласно ГОСТ 21204—97 газовые горелки классифицируются по следующим признакам:

- способу подачи воздуха;
- степени подготовки горючей смеси;
- номинальному давлению газа;
- характеру потока горючей смеси;
- возможности регулирования характеристик факела;
- возможности регулирования коэффициента избытка воздуха;
- локализации зоны горения;
- возможности использования теплоты продуктов сгорания для подогрева воздуха.

В зависимости от применяемых принципов сжигания топлива, описанных в п. 7.1, газовые горелки можно поделить на четыре основные группы:

- горелки с полным предварительным смешением топлива с воздухом, реализующие кинетический принцип сжигания;
- горелки с предварительным смешением газа с частью воздуха, необходимого для горения, в которых горение происходит по кинетическо-диффузионному принципу, как в горелке Бунзена (см. рис. 5.3);
- горелки с незавершенным предварительным смешением газа с воздухом, реализующие промежуточный, кинетическо-диффузионный принцип сжигания с объединением процессов смешения и горения;
- горелки без предварительного смешения газа с воздухом, реализующие турбулентный диффузионный принцип сжигания.

По способу подачи воздуха в зону горения и коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1$  различают конструкции горелок:

- диффузионные ( $\alpha_1 = 0$ ) или бездутьевые, при использовании которых воздух в зону горения поступает за счет разрежения в топке;
- инжекционные ( $\alpha_1 > 1$  и  $\alpha_1 < 1$ ), в которых воздух инжектируется энергией газовой струи (в немногочисленных конструкциях — наоборот);
- с принудительной подачей воздуха (дутьевые), в которые воздух подается при помощи вентилятора.

Этот признак наиболее полно характеризует конструктивные и эксплуатационные особенности газогорелочных устройств. Горелки можно также классифицировать по их назначению (горелки газовых плит, горелки для отопления, горелки отопительных котлов, промышленных печей и т. п.), номинальному давлению газа и воздуха, теплоте сгорания газа, номинальной тепловой мощности горелок, номинальной относительной длине факела, локализации пламени.

### **7.2.3. Горелки бытовых газовых плит**

Наиболее распространенным типом газовых горелок являются горелки бытовых газовых плит. В большинстве случаев это инжекционные горелки с предварительным смешением газа с частью воздуха, необходимого для полного сгорания (рис. 7.2), что соответствует значению  $\alpha_1 < 1,0$ .

В насадке горелки подготовленная однородная смесь делится на большое количество мелких струй, каждая из которых истекает через собственный огневой канал, создавая отдельное пламя (от 15...18 до 30 и более, в зависимости от типа горелки, ее мощности и вида газа).

Остальная часть необходимого воздуха поступает в зону горения из окружающей атмосферы. При этом поступление воздуха может осуществляться только по периферии горелки (рис. 7.2, а, б) или по периферии и по центру, через специальный канал (рис. 7.2, в). Вторым способом рекомендуется для горелок на сжиженный газ, чтобы обеспечить полное сгорание топлива (см. разд. 8).

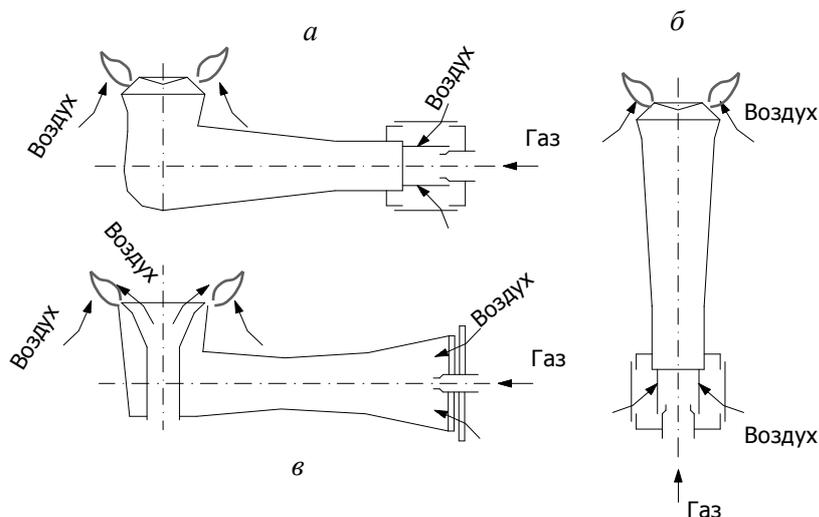


Рис. 7.2. Схемы горелок бытовых газовых плит:  
*а, б* - с периферийным подводом вторичного воздуха;  
*в* - с двусторонним подводом вторичного воздуха

Стабилизация пламени в рассматриваемых горелках осуществляется двояко. Во-первых, стабилизация каждого отдельного пламени происходит способом, характерным для двухконусного пламени горелки Бунзена, то есть путем естественной самостабилизации.

Чтобы обеспечить дополнительную стабилизацию горения в очень широком диапазоне регулирования тепловой мощности по отношению к отрыву пламени, в конструкции горелок применяются элементы, создающие небольшой козырек в месте вылета газоздушной смеси. Этим способом обеспечивается рециркуляция части раскаленных продуктов сгорания к основанию пламени и стабильное воспламенение истекающей смеси.

#### 7.2.4. Горелки отопительных и промышленных устройств

**Инжекционные горелки.** Среди горелок отопительного и промышленного назначения наиболее простую конструкцию имеют инжекционные горелки низкого давления продольной формы, которые

появились как дешевый и простой способ перевода котлов малой мощности с твердого топлива на газ (рис. 7.3).

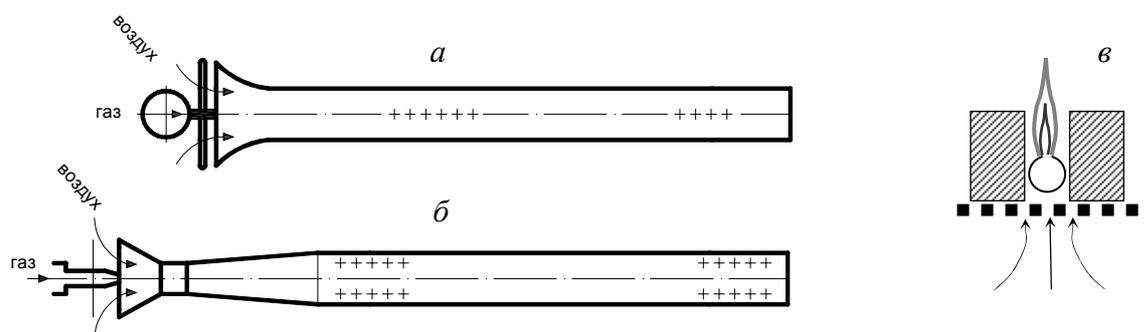


Рис. 7.3. Конструкция щелевых инъекционных горелок:  
*а* - однорядная горелка; *б* - двухрядная горелка;  
*в* - устройство щели на колосниковой решетке

Форма горелок соответствовала сохранению равномерного тепловосприятия поверхностями нагрева котла по всей длине топки.

При точных расчетах горелка может быть изготовлена даже в условиях мастерских. Сжигание газа в таких горелках очень похоже на процесс, происходящий в горелках бытовых газовых плит.

Эти горелки называются также щелевыми, поскольку при переводе котлов на газ размещались в щелях из огнеупорного кирпича, выкладываемых на колосниковой решетке, служившей раньше для сжигания твердого топлива. Раскаленные стенки щелей успешно выполняют функцию стабилизирующего туннеля. Горелка работает с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,5 \dots 0,6$ , а через отверстия в решетке, за счет разрежения в топке, в зону горения поступает вторичный воздух (рис. 7.3, в).

Инжекционные горелки среднего давления (рис. 7.4) используются в разнообразных теплотехнических устройствах. Они предназначены преимущественно для работы с полным предварительным смешением газа и воздуха при  $\alpha_1 = 1,0 \dots 1,15$ , с образованием при этом короткого прозрачного (так называемого «жесткого») факела.

Исключение составляют установки, которые по своей технологии требуют более растянутого и «мягкого» факела.

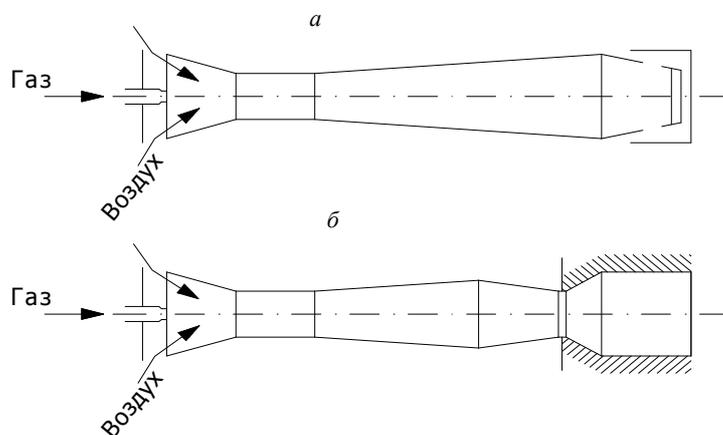


Рис. 7.4. Инжекционные горелки среднего давления: *а* - с кольцевым стабилизатором; *б* - со стабилизирующим керамическим туннелем

Стабилизация высокоскоростного пламени в таких горелках производится при помощи кольцевых стабилизаторов (рис. 7.4, *а*, 6.6, *а*) или стабилизирующих туннелей (рис. 7.4, *б*, 6.6, *б*), выполненных из огнеупорных материалов (керамика, шамотная масса и др.).

**Дутьевые горелки.** Дутьевые горелки, или горелки с принудительной подачей воздуха, представляют собой весьма разнообразную группу устройств для сжигания газов в котлах и промышленных печах.

В горелках с принудительной подачей воздуха, воздух, необходимый для горения, нагнетается в горелки принудительно вентилятором, воздуходувкой или компрессором. Газ из газопровода подается в газораспределительное устройство, а из него через сопла вытекает в закрученный поток воздуха. Здесь происходит смешение газа с воздухом. Подготовленная газовоздушная смесь выдается через насадку к месту сжигания. Эти горелки, как и инжекционные горелки, работающие с  $\alpha_1 > 1$ , оснащены стабилизаторами пламени.

К особенностям горелок этого типа относится: 1) устойчивая работа в широком диапазоне применения тепловой мощности; 2) возможность использовать теплоту предварительно подогретого (подаваемого для горения) воздуха; 3) возможность обеспечить сжигание газа по кинетическому или по промежуточному принципу (в зависимости от вида смесителя); 4) работа горелки не зависит от давления в топке; 5) необходимость устанавливать клапан блокировки, отключающий подачу газа при прекращении подачи воздуха; 6) необходимость в рабочем режиме регулирования соотношения расходов газа и воздуха для поддержания заданного коэффициента избытка воздуха; 7) меньшая удельная металлоемкость по сравнению с инжекционными горелками; 8) большой коэффициент предельного регулирования.

Смешение газа с воздухом зависит от конструкции, как самой горелки, так и ее смесителя. Имеются горелки с хорошим предварительным смешением газа с воздухом. Такие горелки обеспечивают горение газа, близкое к кинетическому, и имеют в топке короткое пламя с высокой температурой. Для получения более длинного пламени применяют внешнее смешение газа с воздухом, иногда переносимое в топочное устройство.

Регулировать длину пламени можно, изменив качество смешения газа с воздухом. Чтобы сократить длину пламени, надо обеспечить хорошее предварительное смешение. Это достигается путем удлинения участка смешения; увеличения разности скоростей газа и воздуха, а также поверхности соприкосновения газовых струй с воздушным потоком; направления потоков газа и воздуха под углом; выдачи газовых струй в закрученный поток воздуха.

На рис. 7.5 приведены различные схемы горелок с принудительной подачей воздуха.

По схеме I газ и воздух к месту сгорания подаются отдельно, широкими параллельными потоками с примерно равными скоростями. Смешение происходит крайне медленно. Горение близко к диффузионному. Пламя длинное, при сжигании углеводородных газов светящееся, имеет невысокую температуру.

При схеме II поверхность соприкосновения потоков газа и воздуха увеличена за счет подачи газа внутри воздушного потока (горелка типа «труба в трубе»). Длина пламени сокращается.

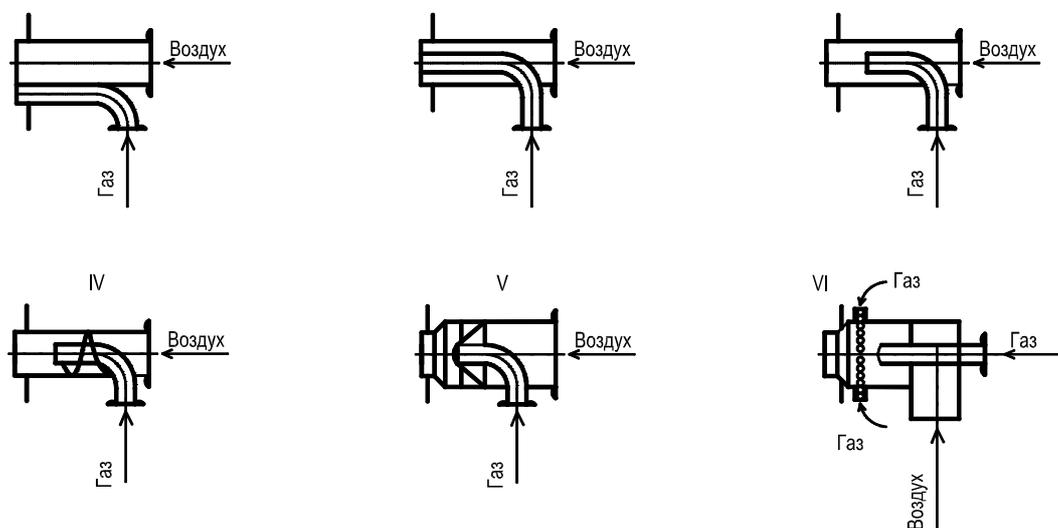


Рис. 7.5. Схемы горелок с принудительной подачей воздуха

Еще более существенное сокращение длины пламени достигается, если обеспечить некоторое предварительное смешение газа с воздухом (схема III). Улучшение предварительного смешения газа с воздухом достигается установкой в горелке завихрителя, закручивающего поток воздуха (схема IV). Для увеличения площади соприкосновения газа с воздухом вместо одного крупного огневого отверстия делают много мелких под углом к предварительно закрученному потоку воздуха (схема V). Это приводит к образованию более равномерной газозвушной смеси, что обеспечивает горение, близкое к кинетическому, а также короткое пламя с высокой температурой.

Смешение можно еще более улучшить, если газ в закрученный поток воздуха подавать не только с центра, но и с периферии (схема VI), обеспечивая равномерное распределение газовых струй в сносящем потоке воздуха. Закручивание воздушного потока может осуществляться лопаточным направляющим аппаратом, улиткой, тангенциальным подводом к горелке и др.

Горелки с принудительной подачей воздуха в зависимости от конструкции работают на газе низкого или среднего давления. Их применяют в основном для котлов, печей, сушил и др. Горелки этого типа позволяют использовать теплоту отработанных дымовых газов за счет подогрева в теплообменниках (рекуператорах, регенераторах и др.) воздуха, подаваемого для горения, что позволяет повысить к. п. д. теплоагрегатов.

Недостатками рассматриваемых горелок являются: значительные затраты электроэнергии на дутьевые вентиляторы; усложнение инженерных коммуникаций теплоагрегата из-за наличия воздухопроводов, устройств регулирования соотношения газ — воздух и клапанов, отсекающих подачу газа к горелкам при остановке вентилятора.

Степень незавершенности процессов смешения газа и воздуха зависит от интенсивности крутки потока воздуха, длины участка  $l$ , на котором протекает смешение (рис. 7.6), скорости газовых струй и других факторов.

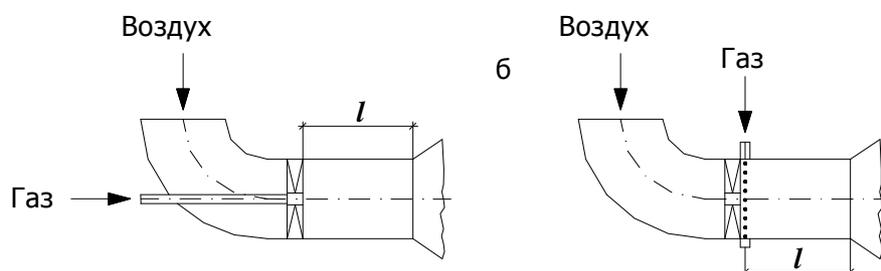


Рис. 7.6. Схемы подачи газа в закрученный поток воздуха в дутьевых горелках: *а* – центральная; *б* – периферийная

Несмотря на огромное разнообразие особенностей конструкции таких горелок, в них применяется два главных способа подачи струй газа в закрученный поток воздуха: от центра поперек потока или под определенным углом к нему (рис. 7.6, *а*), либо через периферийный коллектор по направлению к центру (рис. 7.6, *б*). Имеется также большое количество конструкций с комбинированной подачей газа, например, в газомазутных горелках, когда центральная часть газожидкостной горелки занята жидкотопливной форсункой (рис. 7.7).

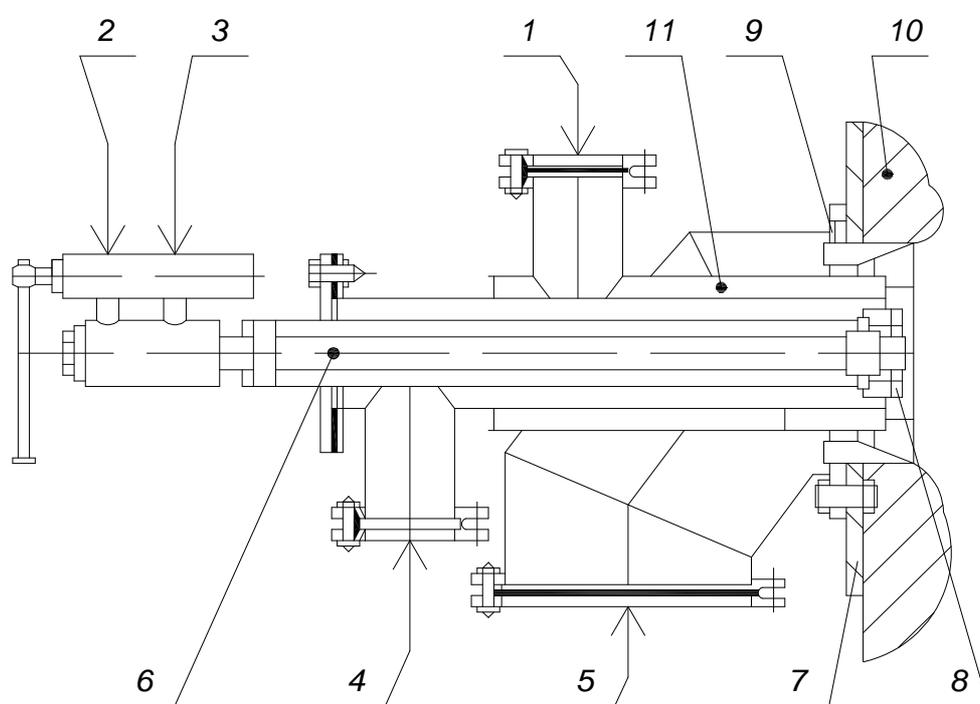


Рис. 7.7. Схема газомазутной горелки ГМГ:

- 1 – вход газа; 2 – вход мазута; 3 – вход пара; 4 – вход первичного воздуха;
- 5 – вход вторичного воздуха; 6 – паромазутная форсунка; 7 – монтажная плита;
- 8 – завихритель первичного воздуха; 9 – завихритель вторичного воздуха;
- 10 – керамический туннель; 11 – газовый канал

Часть струй газа в газомазутной горелке может подаваться через кольцевой канал (окружающий форсунку) в поперечном направлении, другая часть — вдоль оси горелки или другими способами.

Отличаться могут также способы закрутки воздушного потока. В газовых горелках малой и средней мощности более распространены лопаточные регистры (рис. 7.6).

При большой мощности и соответствующих размерах горелок лопаточный способ крутки требует более длинного отрезка смещения и в целом приводит к неоправданно большому гидравлическому сопротивлению. В этом случае лучшие показатели закрутки обеспечивают тангенциальные или улиточные (рис. 7.8) закручивающие аппараты.

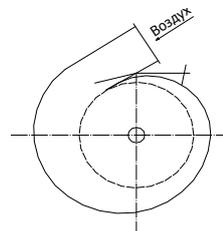


Рис. 7.8. Схема улиточного способа закрутки воздушного потока

В последние годы широкое распространение получили автоматизированные газовые горелки с принудительной подачей воздуха (рис. 7.9, 7.10).

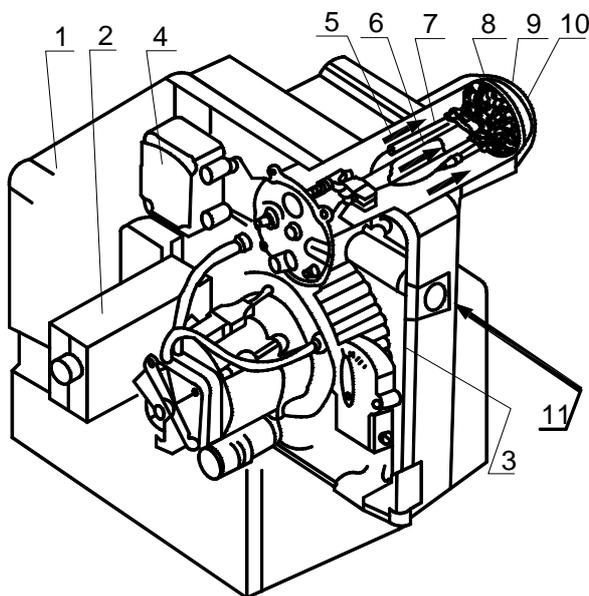


Рис. 7.9. Автоматизированная блочная горелка: 1 – корпус горелки; 2 – блок управления; 3 – вентилятор; 4 – прибор зажигания; 5 – воздушный канал; 6 – газовый канал; 7 – электрод зажигания; 8 – подпорная шайба; 9 – пламенная труба; 10 – электрод контроля пламени; 11 – вход газа

Автоматическая блочная горелка — это горелка, скомпонованная в единый блок с вентилятором и оснащенная автоматическими устройствами зажигания, контроля пламени и управления горелкой.

Горелка, как правило, укомплектована системой автоматического регулирования. Тепловая мощность горелки может регулироваться плавно или ступенчато, часто двухпозиционно. Расход воздуха регулируется воздушной заслонкой, расположенной внутри корпуса горелки. Расход газа регулируется управляющим устройством, расположенным вне корпуса горелки. Розжиг горелки производится с помощью специального устройства зажигания. Наличие пламени контролируется специальным датчиком.

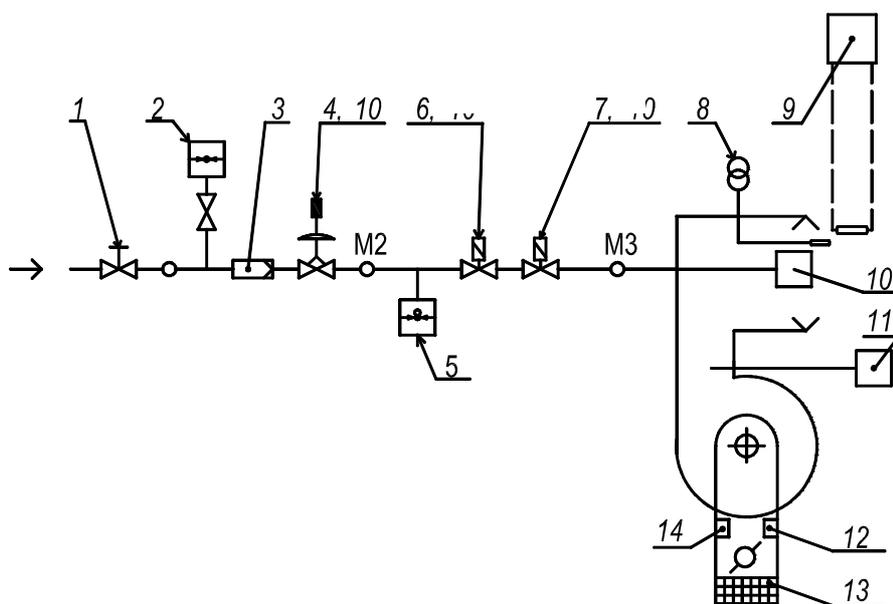


Рис. 7.10. Схема автоматической блочной газовой горелки с принудительной подачей воздуха: 1 – ручной кран отключения; 2 – манометр; 3 – фильтр; 4 – регулятор давления газа; 5 – устройство контроля давления газа; 6 – отсечной клапан; 7 – регулятор расхода; 8 – устройство зажигания; 9 – датчик контроля пламени; 10 – устройство, способствующее перемешиванию газа с воздухом в огневой насадке горелки; 11 – устройство контроля вентилятора; 12 – позиционный переключатель низкого расхода воздуха; 13 – предохранительное устройство для вращающихся деталей, например, решетка; 14 – позиционный переключатель высокого расхода воздуха; М1 – точка измерения давления на входе; М2 – точка измерения для регулирования давления; М3 – точка измерения в головке горелки

**Излучающие горелки.** Особую группу составляют излучающие (инфракрасные) горелки. Их основным применением является обогрев предметов или людей в условиях, когда конвективный обогрев всего объема или помещения невозможен или экономически неоправдан. К таким случаям относятся большие залы (производственные, торговые, складские), помещения большой высоты, в которых люди находятся только в нижней зоне (например, церкви), а также открытые пространства: скамейки запасных на стадионах, стрелочные переходы на железных дорогах и т. п.

В излучающих горелках после процесса инжектирования воздуха (при  $\alpha_1 = 1,05$ ) и его последующего смешения с газом не происходит немедленное воспламенение смеси. Смесь поступает в распределительную камеру, а из нее в многочисленные каналы в керамической панели (рис. 7.11), в которых она движется со скоростью 0,10...0,15 м/с. Только на входе из этих каналов происходит воспламенение горючей смеси и ее сгорание в большом количестве микрофакелов. Керамическая панель быстро разогревается до температуры 800...900 °С и начинает передавать энергию в виде теплового излучения в соответствующем направлении.

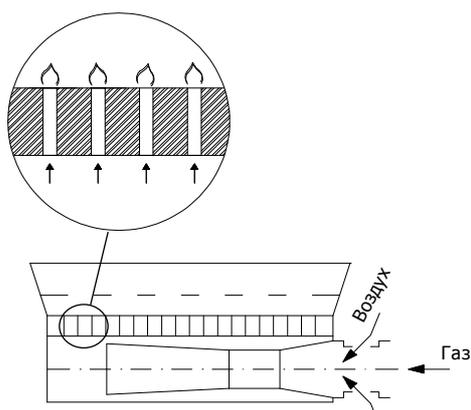


Рис. 7.11. Общие принципы конструкции излучающих горелок

На фоне излучающей поверхности керамической панели зона горения, состоящая из сотен крошечных пламен, абсолютно не видна. По этой причине в технической литературе и профессиональной терминологии долгое время было распространено неправильное определение «горелки беспламенного горения».

Раскаленная поверхность панели обеспечивает надежное воспламенение и отсутствие отрыва пламени.

Однако серьезной проблемой является недопущения проскока пламени внутрь распределительной камеры горелки.

Излучающая панель складывается из отдельных перфорированных плиток, выполненных из легкой керамической массы (рис. 7.12). Средний состав массы: 45 % огнеупорной глины, 25 % каолина, 5 % оксида хрома и 25 % талька. Пористость керамики уменьшает ее теплопроводность, содействуя снижению температуры на ее внутренней поверхности примерно до 400 °С и предотвращая, тем самым, проскок пламени путем самовоспламенения. Поскольку в газовых излучателях инжекция воздуха происходит с тыльной стороны корпуса, это грозит засасыванием продуктов сгорания и соответствующим ухудшением горения. Из-за этого газовая инфракрасная горелка может быть направлена вниз под углом не более 35...45°.

Основным же способом предотвращения проскока пламени является применение каналов с диаметром, который как минимум в два раза меньше критического размера, то есть 1,0...1,5 мм. Толщина слоя керамики между каналами составляет менее 0,5 мм. Живое сечение каналов в общей поверхности панели составляет 35...40 %, что обеспечивает малое гидравлическое сопротивление.

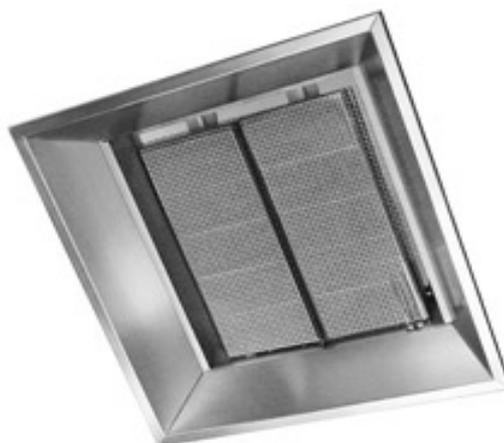


Рис. 7.12. Излучающая горелка с керамической панелью

В то же время во многих случаях наиболее желательным является потолочное размещение излучателя. Для такого применения разработаны специальные горелки, в которых эжекция воздуха и приготовление горючей смеси происходит в отдельном блоке (рис. 7.13-7.15).



Рис. 7.13. Потолочный газовый излучатель с отводом продуктов сгорания

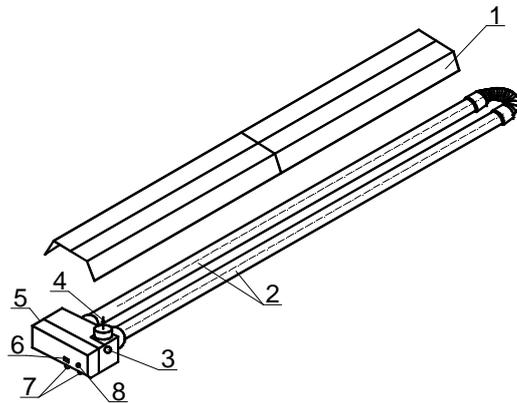


Рис. 7.14. Схема потолочной горелки:  
 1 – отражатель; 2 – излучатели;  
 3 – ввод воздуха на горение;  
 4 – отвод продуктов сгорания; 5 – ввод газа;  
 6 – электропитание; 7 – сигнальные лампочки;  
 8 – контакт датчика контроля

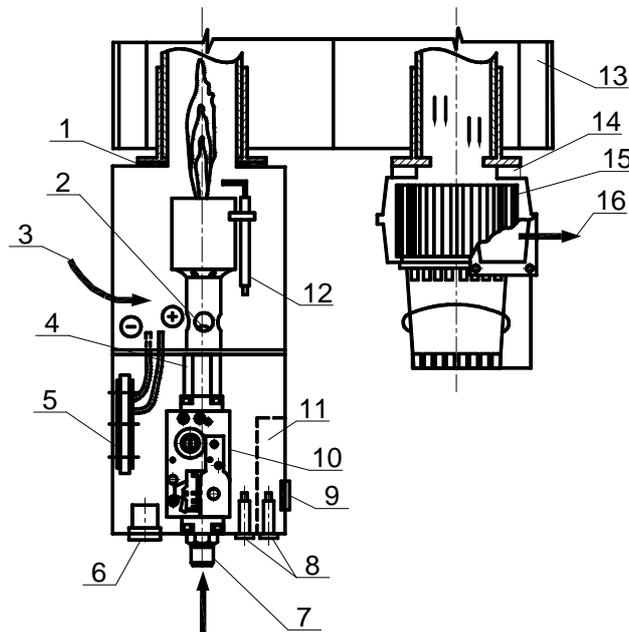


Рис. 7.15. Блок для приготовления горючей смеси и отвода продуктов сгорания излучающей горелки: 1, 14 – прокладка; 2 – сопло горелки;  
 3 – подача первичного воздуха; 4 – конфузор; 5 – дифманометр;  
 6 – электропитание; 7 – газовый штуцер; 8 – сигнальные лампочки;  
 9 – питание вентилятора; 10, 11 – блок автоматики; 12 – запальный электрод;  
 13 – отражатель; 15 – вентилятор; 16 – отвод продуктов сгорания

Кроме того, с целью обеспечения как можно меньшего контакта людей с продуктами сгорания, такие горелки оборудованы системой организованного отвода продуктов сгорания с собственным вентилятором.

Автоматизированные излучающие горелки обладают рядом преимуществ. Общий шкаф «моноблок» объединяет камеру горения и вентилятора. Конструкция блока горелки обеспечивает рекуперацию энергии и рециркуляцию продуктов горения газа, повышая эффективность прибора.

Горелка поставляется с жаропрочной трубой, легко решается проблема теплового расширения материала. Горелки оснащены надежной автоматикой безопасности и регулирования, отличаются высокой надежностью, стабильностью работы, малыми выбросами вредных веществ, простотой обслуживания.

### **Контрольные вопросы по разделу 7**

- 1. В чем отличие диффузионного и кинетического принципов сжигания газов?*
- 2. Каково значение коэффициента избытка первичного воздуха при диффузионном, кинетическом и смешанном сжигании газов?*
- 3. Каковы достоинства и недостатки диффузионного сжигания газов?*
- 4. Назовите особенности кинетического способа сжигания газов.*
- 5. В каких устройствах применяется пульсирующий метод сжигания газа и в чем его особенности?*
- 6. Приведите определения газовой горелки и газогорелочного устройства.*
- 7. Какие требования предъявляются к газовым горелкам?*
- 8. Какую величину называют тепловой мощностью горелки?*
- 9. Какими коэффициентами характеризуется возможность регулирования тепловой мощности?*

10. Каковы основные признаки классификации газовых горелок?
11. Приведите классификацию газогорелочных устройств по способу подачи воздуха в зону горения и коэффициенту избытка воздуха.
12. Какой тип горелок применяется в бытовых газовых приборах? По какому принципу сжигания газа они работают?
13. Назовите способы стабилизации горения газа в газогорелочных устройствах бытовых газовых плит.
14. Охарактеризуйте инжекционные горелки низкого и среднего давления для промышленных газоиспользующих установок.
15. Какими преимуществами и недостатками характеризуются горелки с принудительной подачей воздуха?
16. Приведите основные схемы смешения газа и окислителя в горелках с принудительной подачей воздуха.
17. Каковы конструктивные особенности излучающих газовых горелок?

## **8. ОХРАНА АТМОСФЕРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА**

При несовершенной организации горения в отходящих газах углеводородного топлива содержится некоторое количество оксида углерода, водорода, различных углеводородов и частиц сажи, являющихся продуктами неполного сгорания. Кроме этого, в продуктах сгорания всегда содержатся оксиды азота. Присутствие значительных количеств этих веществ в отходящих газах является недопустимым, поскольку вместе с дымовыми газами они попадают в атмосферу. Многие из этих веществ ядовиты или токсичны, следовательно, чрезвычайно опасны для человека и окружающей среды. Наличие продуктов неполного сгорания свидетельствует о снижении эффективности использования топлива в оборудовании, а их накопление в газоходах чревато возможностью взрыва. Поэтому задача снижения выбросов вредных веществ в атмосферу является одной из важнейших в теории и практике сжигания топлива.

### **8.1. ПРОДУКТЫ НЕПОЛНОГО СГОРАНИЯ**

Явление присутствия в отходящих газах продуктов неполного сгорания топлива называется химическим недожогом. Оксид углерода, водород, различные углеводороды и сажа содержатся в отходящих газах при сжигании газа с недостаточным количеством воздуха, при неудовлетворительном смешении газа и воздуха перед сжиганием или в процессе горения, а также при чрезмерном охлаждении пламени до завершения реакций горения.

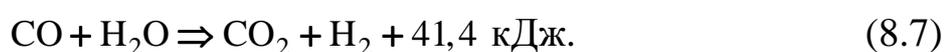
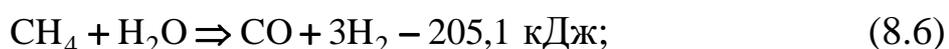
Известно, что при горении углеводородного топлива протекают как реакции полного стадийного высокотемпературного окисления углеводородов, так и процессы их газификации и термического разложения (пиролиза). Пиролиз происходит в условиях общего или

локального недостатка окислителя. При сжигании метана отмеченные реакции могут быть описаны следующими уравнениями:

- в окислительной зоне при избытке кислорода:



- в восстановительной зоне при недостатке кислорода:



Эти уравнения представляют итоговый результат реакций, то есть начальное состояние реагентов и конечное состояние продуктов сгорания. В действительности процессы горения более сложны и протекают в соответствии с цепным механизмом (см. п. 2.3).

Приведенные уравнения наиболее характерны для процессов горения однородных газозвушных смесей с недостатком окислителя ( $\alpha_1 < 0$ ). Догорание образующегося водорода и оксида углерода и сгорание еще не вступившего в реакцию метана может происходить только за счет дополнительного кислорода, диффундирующего из окружающей пламя атмосферы. В случае если условия для диффузии внешнего кислорода недостаточно благоприятны или пламя чрезмерно охлаждается, часть промежуточных продуктов горения вместе с продуктами завершеного сгорания остается в отходящих газах и попадает в окружающую среду.

Для протекания реакций газификации в смеси должно присутствовать определенное количество первичного воздуха, зависящее от вида топлива, геометрии и толщины газовых струй и режима горения. Если воздуха достаточно, то образуется прозрачное пламя, если же недостаточно, в пламени появляются характерные желтые «язычки», свидетельствующие о протекании не только реакций газификации, но и

реакций термического разложения углеводородов, приводящих к образованию сажи и различных углеводородов. Таким образом, сам внешний вид пламени характеризует протекающие в нем процессы.

На рис. 8.1 приведены экспериментальные данные, показывающие содержание первичного воздуха в смеси с различными газами,

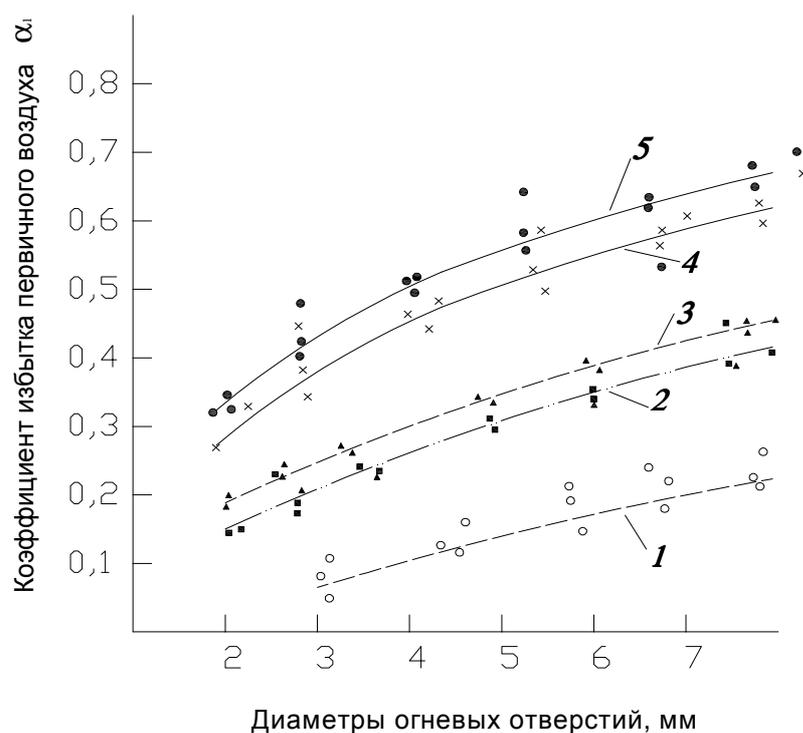


Рис. 8.1. Кривые образования желтых язычков пламени для различных газов:  
 1 – коксовый газ; 2 – природный газ газовых месторождений;  
 3 – газ нефтяных месторождений; 4 – технический пропан;  
 5 – технический бутан

которое предотвращает образование желтых язычков пламени в ламинарном пламени. На кривой и выше нее пламя прозрачно, а ниже кривых наблюдаются желтые язычки. Анализ данных показывает, что необходимое для полного сгорания содержание первичного воздуха в смеси растет при увеличении числа атомов углерода в молекуле и диаметра огневых каналов. Значение  $\alpha_1$  в газовой смеси, при котором исчезают желтые язычки пламени, в зависимости от указанных факторов, может быть описано следующим приближенным выражением (для малых диаметров каналов):

$$\alpha_1 = 0,13 \left( m + \frac{n}{4} \right)^{0,48} d^{0,23}, \quad (8.8)$$

где  $m$ ,  $n$  – число атомов, соответственно, углерода и водорода в молекуле или их среднее число для сложного газа;  $d$  – диаметр огневого канала горелки, мм.

При диффузионном горении всегда протекают как реакции полного окисления и восстановления, так и реакции термического разложения углеводородов, приводящие к появлению сажистых частиц. Образование этих частиц происходит в непосредственной близости от фронта пламени в результате нагрева газа диффундирующими в него раскаленными продуктами сгорания.

При этом предполагается, что сначала возникают радикалы в виде метила  $\dot{C}H_3$ , метена  $\dot{C}H_2$  и метина  $\dot{C}H$ , которые затем инициируют образование этана, этена, ацетилен и других углеводородов. Они, в свою очередь, подвергаются в предпламенной зоне дегидратации и циклизации с образованием в конечном итоге мелкодисперсной сажи. Раскаляясь в пламени, частицы сажи придают ему ярко-желтую окраску.

Процесс горения образовавшихся твердых частиц протекает стадийно и сравнительно медленно, поскольку эти частицы перемещаются со скоростью потока, и их контакт с окислителем осуществляется только за счет медленной молекулярной диффузии. Поэтому выгорание сажистых частиц затягивается и может полностью прекратиться при выходе в низкотемпературную область факела или контакте пламени с холодными поверхностями теплообмена.

Это нередко наблюдается в практике, когда, несмотря на наличие кислорода в отходящих газах, на поверхностях теплообмена обнаруживаются значительные отложения сажи. Следовательно, светящееся пламя всегда свидетельствует о протекании пиролитических процессов и возможности химического недожога. При этом в отходящих газах могут присутствовать не только частицы сажи, но другие продукты неполного сгорания.

### 8.1.1. Канцерогенные вещества

Особую опасность при неполном сгорании представляет образование полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), поскольку некоторые из них обладают подтвержденной канцерогенной активностью. Процесс их образования более сложен и еще менее исследован, чем образование сажи. Тем не менее, большое количество исследований подтверждает наличие в продуктах неполного сгорания различных топлив, включая сжиженный и природный газ, таких веществ как 3,4-бензпирен, пирен, перилен, 1,2-бензантрацен, 1,2-бензпирен и других ПАУ.

Экспериментально установлено также, что пиролиз ацетилена, его производных, бутадиена и других углеводородов приводит к образованию канцерогенного 3,4-бензпирена и других ПАУ. По литературным данным углеводороды типа ацетилена при высокой температуре подвергаются процессу образования и удлинения цепи, приводящему к образованию соединений с углеродными скелетами  $C_6C_4$ , которые в результате дегидратации и циклизации могут преобразоваться в 3,4-бензпирен и другие ПАУ. На рис. 8.2 показана одна из возможных схем таких преобразований.

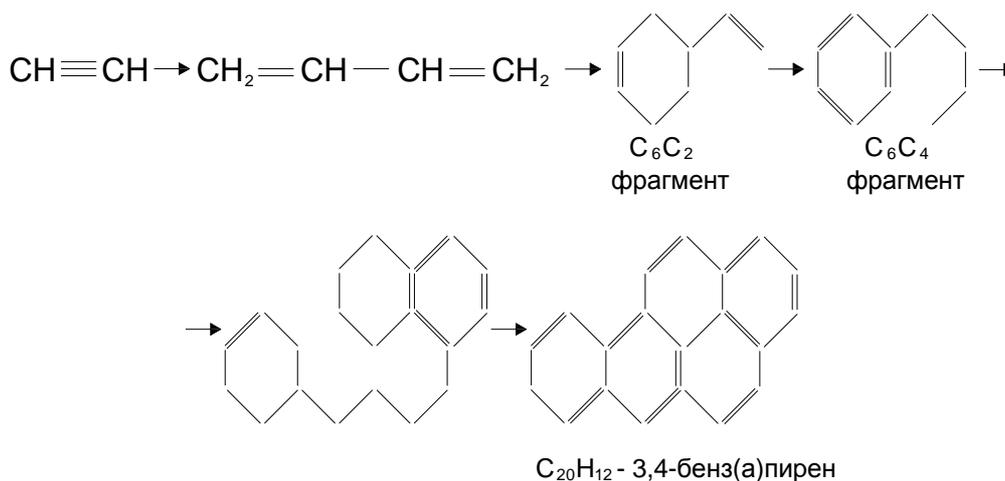


Рис. 8.2. Возможная схема образования 3,4-бензпирена

## 8.2. ОКСИДЫ АЗОТА

Оксиды азота занимают особое место в списке вредных компонентов продуктов сгорания органического топлива, поскольку они неизбежно образуются при вполне нормальном и хорошо организованном горении. Под широко применяемым наименованием «оксиды азота» (обозначение  $\text{NO}_x$ ) понимается суммарная концентрация оксида азота  $\text{NO}$  и диоксида азота  $\text{NO}_2$ , обычно в пересчете на  $\text{NO}_2$ .

На выходе из топки или по окончании процесса горения в отходящих газах содержится преимущественно  $\text{NO}$  (более 95 % общего количества оксидов азота). Попадая в атмосферу, оксид азота в течение нескольких часов окисляется до диоксида в результате фотохимических процессов. Дальнейшее сложное преобразование  $\text{NO}_2$  в атмосфере может занимать несколько суток с образованием еще более опасных химических соединений, входящих в состав так называемого смога.

В зависимости от источника происхождения азота и механизмов образования при сжигании топлива различают три группы оксидов азота:

- термические;
- топливные;
- фронтальные (или быстрые).

### 8.2.1. Термические оксиды азота

Теорию образования **термических оксидов азота** (термическая теория *Я. Б. Зельдовича*) можно представить в виде следующих положений:

1. Образование  $\text{NO}$  происходит за фронтом пламени в зоне максимальных температур по цепному механизму, формальную кинетику которого описывает уравнение



2. Выход  $\text{NO}$  определяется максимальной температурой горения и равновесными концентрациями азота и кислорода в зоне реакции, поэтому теория получила название термической.

3. Концентрация образовавшегося оксида азота не превышает ее равновесного значения при максимальной температуре в реакционной зоне.

4. При наличии свободного кислорода выход NO определяется максимальной температурой в зоне реакции, тогда как при недостатке кислорода — кинетикой распада NO, то есть скоростью охлаждения продуктов сгорания (так называемая закалка продуктов реакции).

5. При сжигании углеводородных или влажных топлив в процессе горения выделяется гидроксильный радикал, который принимает активное участие в образовании оксида азота.

### 8.2.2. Топливные оксиды азота

**Топливные оксиды азота**, как следует из самого названия, образуются с участием азотосодержащих химических соединений, входящих в состав топлива. Азот топлива входит в основном в состав соединений, легко подверженных термическому разложению и активно реагирующих с кислородом. Современное состояние теории в этой области можно изложить в виде следующих основных положений:

1. Конверсия азота топлива в NO происходит во фронте пламени при скорости, сравнимой со скоростью самих реакций горения.

2. Степень конверсии снижается с ростом содержания азота в топливе: от 20...80 % при  $N_T < 0,1$  % до 10...20 % при  $N_T = 0,1...1,0$  %.

3. Выход топливных оксидов азота слабо зависит от температуры пламени, незначительно повышаясь с ее увеличением.

4. Конверсия растет при увеличении коэффициента избытка воздуха.

5. Выход топливных оксидов азота практически не зависит от вида химического соединения, содержащего азот, а определяется исключительно содержанием в нем азота.

6. Доля топливных оксидов азота в их общем выходе тем больше, чем меньше плотность теплового потока и температура в топочном пространстве.

### 8.2.3. Фронтальные оксиды азота

**Фронтальные**, или **быстрые** (англ. *prompt*), **оксиды азота** образуются при сжигании любого вида топлива. Химически индуцированный механизм из синтеза близок по своему характеру к механизму образования топливных  $\text{NO}_x$ . Образование быстрых  $\text{NO}_x$  происходит с участием промежуточных продуктов и радикалов во фронте пламени со скоростью, близкой к скорости реакций горения. Теория образования быстрых оксидов азота постоянно развивается, а ее нынешнее состояние можно кратко представить в виде следующих положений:

1. Фронтальные  $\text{NO}_x$  образуются в зоне, характеризующейся как фронт пламени.
2. Время их образования ограничено временем протекания реакций горения.
3. Выход фронтальных оксидов азота слабо зависит от температуры и сильно — от избытка воздуха.
4. Доля фронтальных  $\text{NO}_x$  в суммарном выходе оксидов азота, в условиях, характерных для котлов и печей малой и средней мощности, невелика и уменьшается вместе с ростом тепловой мощности и температуры в топке.

### 8.3. ПОДАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Как следует из краткого представления теории образования вредных веществ в пламени горящего топлива, снижение их выбросов с отходящими газами в атмосферу в практике представляет собой очень сложную техническую задачу. Успех зависит не только от правильного применения рациональных принципов сжигания топлива, но и от условий развития пламени в объеме топки, интенсивности отвода теплоты и т. п.

### 8.3.1. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании газа в бытовых газовых плитах

Наиболее высокие требования по снижению содержания вредных веществ в продуктах сгорания предъявляются к бытовым газовым устройствам и другой аппаратуре, от которой продукты сгорания газа попадают непосредственно в рабочую зону (на высоте дыхания человека). В то же время именно в таких устройствах обеспечение полного сгорания затрудняется тем, что пламя горелок непосредственно контактирует с холодной поверхностью, отводящей теплоту, а также необходимостью естественной или искусственной стабилизации горения в очень широком диапазоне регулирования мощности горелок.

В газовых плитах применяются преимущественно многофакельные инжекционные горелки, работающие с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 < 1,0$  (см. рис. 7.2). Остальной воздух поступает в зону горения из окружающей атмосферы по периферии горелки (рис. 7.2, а, б) или по периферии и от центра (рис. 7.2, в).

Исследования сжигания газа в таких горелках показали, что полнота сгорания зависит от содержания первичного воздуха в смеси, расстояния от огневых отверстий горелок до дна посуды, способа подвода вторичного воздуха, вида горючего газа и мощности горелки. На рис. 8.3 представлены усредненные значения содержания оксида углерода в продуктах сгорания природного газа ( $\text{CH}_4 \geq 95\%$ ) и сжиженного углеводородного газа (содержание пропана 90...93%) при работе горелок газовых плит на номинальной мощности (около 1,8 кВт).

Анализ данных показывает, что увеличение как содержания первичного воздуха в смеси, так и расстояния от дна посуды приводит к снижению концентрации СО для обоих видов топлива и обоих типов горелок. Причем минимальное содержание СО в продуктах сгорания соответствует значению коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,6$  и более, а также расстоянию от дна посуды 30 мм.

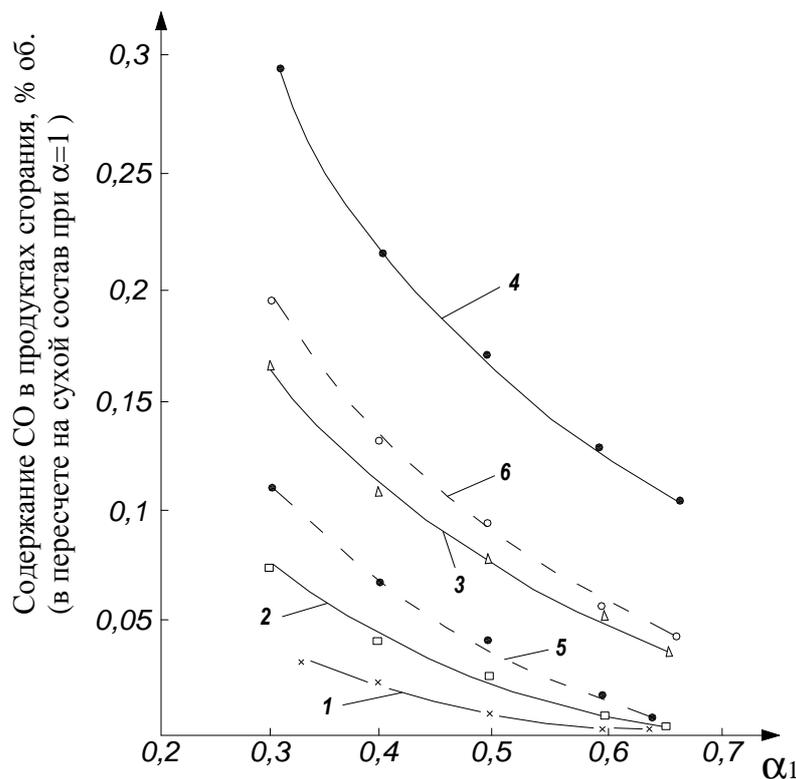


Рис. 8.3. Содержание СО в продуктах сгорания горелок газовых плит:  
 1 – природный газ, горелка с двусторонним подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 30 мм; 2 – природный газ, горелка с периферийным подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 30 мм;  
 3 – то же при расстоянии 20 мм; 4 – то же при расстоянии 10 мм;  
 5 – сжиженный газ, горелка с двусторонним подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 30 мм;  
 6 – то же при периферийном подводе вторичного воздуха

Максимальный выход СО наблюдается при  $\alpha_1 \leq 0,3$  и при расстоянии от дна посуды 10 мм. Объясняется это интенсивным охлаждением пламени при омывании дна посуды, а также затрудненным поступлением вторичного воздуха при малом расстоянии и его ухудшенным распределением между отдельными пламенами горелки.

Данные показывают несомненное преимущество горелок с двусторонним (периферийным и центральным) подводом вторичного воздуха, особенно в случае сжиженного газа. Например, минимальное содержание СО в продуктах сгорания сжиженного газа на горелках с периферийным поступлением вторичного воздуха составляет 0,05 % об.,

тогда как при двустороннем поступлении воздуха не превышает 0,005 % об.

Установлено также, что повышение нагрузки горелок на 15...20 % по сравнению с номинальной мощностью путем повышения давления газа приводит к росту содержания СО в 1,2...1,3 раза. При аналогичном повышении нагрузки за счет увеличения калорийности газа содержание СО в продуктах сгорания возрастает в 1,5...2,0 раза.

Объясняется это тем, что при увеличении теплоты сгорания газа кратность инъекции горелки практически не изменяется, что приводит к снижению коэффициента избытка первичного воздуха в смеси по сравнению с его теоретической потребностью для более калорийного газа. Наиболее ощутимо увеличение содержания оксида углерода на горелках с периферийным подводом вторичного воздуха, особенно при сжигании сжиженных углеводородных газов.

Положительной особенностью горелок с двусторонним подводом вторичного воздуха является также в 1,5 раза меньший выход оксидов азота. Концентрация  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания этих горелок (в пересчете на  $\text{NO}_2$ ) при фактическом избытке воздуха в пробах (около 3,0...3,5) составляла 20 мг/м<sup>3</sup>, тогда как для горелок с периферийным подводом воздуха — 30 мг/м<sup>3</sup>. Объясняется это, по-видимому, несколько более значительным охлаждением пламени при двустороннем поступлении воздуха без негативных последствий с точки зрения полноты сгорания.

Исследования выхода канцерогенных продуктов при сжигании природного газа показали, что при  $\alpha_1 = 0,3...0,7$  и расстоянии от дна посуды 30 мм образования 3,4-бензпирена не происходит. В некоторых пробах ничтожное количество этого вещества находилось в пределах точности измерений. Даже при уменьшении расстояния от горелки до дна посуды до 10 мм выход 3,4-бензпирена был очень незначителен и не превышал 0,005 мкг/м<sup>3</sup> газа.

При сжигании сжиженного газа на горелках с периферийным подводом вторичного воздуха при  $\alpha_1 = 0,6 \dots 0,7$  и расстоянии от дна посуды 30 мм выход 3,4-бензпирена находился в пределах  $0,01 \dots 0,07$  мкг/м<sup>3</sup> газа. В тех же условиях, но при значении коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,3 \dots 0,55$  выход 3,4-бензпирена резко возрастал до 1 мкг/м<sup>3</sup> газа и более.

При сжигании сжиженного газа на горелках с двусторонним подводом вторичного воздуха при  $\alpha_1 = 0,35 \dots 0,6$  и расстоянии от дна посуды 30 мм выход 3,4-бензпирена находился в пределах от следов до  $0,08$  мкг/м<sup>3</sup> газа. При этом увеличение содержания первичного воздуха приводит, как правило, к снижению концентрации 3,4-бензпирена в продуктах сгорания.

Количество сажистых частиц при сжигании природного газа с  $\alpha_1 \geq 0,3$  на обоих типах горелок было ничтожно. Это же наблюдалось при сжигании сжиженных углеводородных газов при  $\alpha_1 \geq 0,5$ .

Результаты комплексных исследований показали, что для сжигания природного газа можно применять горелки как с периферийным, так и с двусторонним подводом вторичного воздуха (с предпочтением, отдаваемым последним). Содержание первичного воздуха в смеси должно составлять  $\alpha_1 = 0,55 \dots 0,56$ , а расстояние от горелки до дна посуды должно быть около 30 мм.

При этих условиях образуется небольшое количество вредных веществ, которое можно считать безопасным. Горелки работают устойчиво, без отрыва пламени и, что особенно важно, без проскока пламени при любом снижении их тепловой нагрузки (см. формулу (6.2) и табл. 6.1). Коэффициент полезного действия горелок при номинальной тепловой нагрузке составляет около 60 %.

Для сжигания сжиженных углеводородных газов рекомендуются горелки с двусторонним подводом вторичного воздуха (периферийным и центральным). Содержание первичного воздуха в смеси перед сжиганием должно составлять не менее  $\alpha_1 = 0,6$ , а расстояние от

горелки до дна посуды должно быть около 30 мм. Поскольку при таком составе горючая смесь находится внутри концентрационных пределов воспламенения (см. табл. 4.7), то при уменьшении нагрузки горелки возможен проскок пламени. Чтобы предотвратить это явление, следует принимать размеры огневых каналов менее критических, а сами каналы должны быть более глубокими по сравнению с огневыми каналами горелок для сжигания природного газа. Для предотвращения отрыва пламени суммарная площадь огневых каналов должна быть несколько большей, чем для горелок, рассчитанных на природный газ. Все это, несмотря на близость нормальных скоростей распространения пламени, приводит к необходимости увеличения размеров огневой части горелок, работающих на сжиженном углеводородном газе.

### **8.3.2. Образование и подавление вредных выбросов при сжигании газа в котлах и промышленных печах**

Семейство горелок, служащих для сжигания газов отопительных котлах и промышленных агрегатах, несравнимо более разнообразно. Поэтому результаты исследований в области образования и подавления выбросов вредных веществ в атмосферу приводятся для отдельных групп горелок, рассмотренных в п. 7.2.

**Экологические характеристики инжекционных горелок.** Инжекционные горелки продольной формы, работающие при  $\alpha_1 < 1,0$  (рис. 7.3), применяются при переходе с твердого топлива на газ. Это простой и недорогой способ модернизации котлов, однако это горелки очень чувствительны к соблюдению оптимального расстояния между огневыми каналами. Самостоятельное воспламенение по всей длине горелки (так называемая «беглость» пламени) требует определенного (достаточно небольшого) расстояния между отверстиями. Однако чрезмерное сближение огневых отверстий приводит к слиянию отдельных пламен, что значительно ухудшает условия поступления вторичного воздуха к каждому пламени. Это приводит к увеличению высоты всего пламени, возможности контакта с поверхностью нагрева и возникновению химического недожога.

Например, при сжигании природного газа с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,5$  на горелке с однорядным расположением огневых отверстий, при расстоянии между их осями  $2d$  ( $d$  — диаметр огневого канала), содержание СО в продуктах сгорания составило  $0,15...0,19$  г/м<sup>3</sup>, а выход 3,4-бензпирена —  $0,05...0,13$  мкг/м<sup>3</sup> газа. При тех же условиях увеличение расстояния между отверстиями до  $3,2d$  обеспечило почти полное отсутствие в отходящих газах СО и 3,4-бензпирена. Причем пламя становилось прозрачным, а его высота уменьшалась почти в два раза.

Установлено, что оптимальное расстояние между отверстиями зависит от диаметра канала и содержания первичного воздуха в смеси, уменьшаясь с его увеличением. Минимальные (по условиям полноты сгорания) и максимальные (по условиям беглости пламени) расстояния между осями отверстий, в зависимости от указанных факторов, приведены в табл. 8.1

Таблица 8.1

**Расстояния между осями огневых отверстий однорядных горелок, в зависимости от их диаметра и коэффициента избытка первичного воздуха**

Диаметр отверстий $d$ , мм	$\alpha_1 = 0$	$\alpha_1 = 0,2$	$\alpha_1 = 0,3$	$\alpha_1 = 0,4$	$\alpha_1 = 0,5$	$\alpha_1 = 0,6$
	Расстояния между осями отверстий (мин./макс.), мм					
2,0	11/20	9/13	8/10	7/8	6/7	5/6
3,0	14/22	12/18	10/15	9/12	7/10	6/8
4,0	16/24	14/20	13/18	12/15	9/13	8/11
5,0	18/27	16/23	15/20	14/19	11/17	10/15
6,0	20/30	18/26	17/24	16/22	14/20	13/18

При расположении огневых отверстий в два ряда расстояния между ними следует принимать близкими к максимальным значениям. Отверстия должны быть расположены в шахматном порядке, а оптимальное расстояние между рядами должно, как правило, приниматься не меньше удвоенного расстояния между отверстиями в ряду.

Если технологические условия предусматривают установку горелок в атмосфере инертных газов или в среде, содержащей

менее 15 % кислорода, то коэффициент избытка первичного воздуха следует принимать на уровне  $\alpha_1 = 1,02 \dots 1,05$ . Размеры огневых отверстий должны быть меньше критических (см. п. 5.1.1), а расстояния между отверстиями и рядами — не более  $2d$ .

Работа инжекционной горелки среднего давления с кольцевым стабилизатором (см. рис. 7.4, *a* и 6.6, *a*) в открытой атмосфере была исследована в широком диапазоне изменения избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,0 \dots 1,05$ . При нулевом содержании первичного воздуха горелка работает по диффузионному принципу в полностью ламинарном режиме горения, образуя желтое светящееся пламя.

Анализы показали, что содержание СО в продуктах сгорания при этом невелико, а 3,4-бензпирен вообще не обнаружен. Однако установлено наличие значительного количества пирена в пределах  $2,8 \dots 3,6 \text{ мг/м}^3$  газа. Горение характеризуется образованием значительного количества частиц сажи преимущественно размерами до 3 мкм и очень редко до 10...15 мкм. Высокая сорбционная способность сажи может объяснять отсутствие 3,4-бензпирена в пробах, из-за чего эти измерения нельзя считать вполне достоверными.

Сжигание топлива на этой горелке при  $\alpha_1 = 0,5$  характеризуется образованием прозрачного пламени и полным отсутствием сажи в продуктах сгорания. Содержание СО в пробах было ничтожно, а выход 3,4-бензпирена составлял  $0,05 \dots 0,1 \text{ мгк/м}^3$  газа. Количество пирена по сравнению с диффузионным горением уменьшилось в 20...30 раз и составило в среднем  $0,1 \dots 0,2 \text{ мг/м}^3$  газа. Дальнейшее увеличение содержания первичного воздуха до  $\alpha_1 = 1,10 \dots 1,15$  приводило к образованию короткого прозрачного («жесткого») факела при полном отсутствии оксида углерода и сажистых частиц. Выход 3,4-бензпирена по сравнению со сжиганием при  $\alpha_1 = 0,5$  уменьшался незначительно.

Приведенные результаты исследования работы горелок в открытом пространстве имеют скорее теоретическое значение. Для изучения характеристик сжигания газа в условиях, близких к

промышленным, была исследована работа инжекционной горелки среднего давления с керамическим туннелем (см. рис. 7.4, б и 6.6, б), установленной в экспериментальной топочной камере.

Условия эксперимента исключали влияние вторичного воздуха, а пределы изменения избытка первичного воздуха составляли  $\alpha_1 = 0,75 \dots 1,15$ . Выход оксидов азота был исследован при избытке первичного воздуха до  $\alpha_1 = 1,45$ . Обобщенные результаты измерений качественно и количественно иллюстрируются графическими зависимостями, приведенными на рис. 8.4.

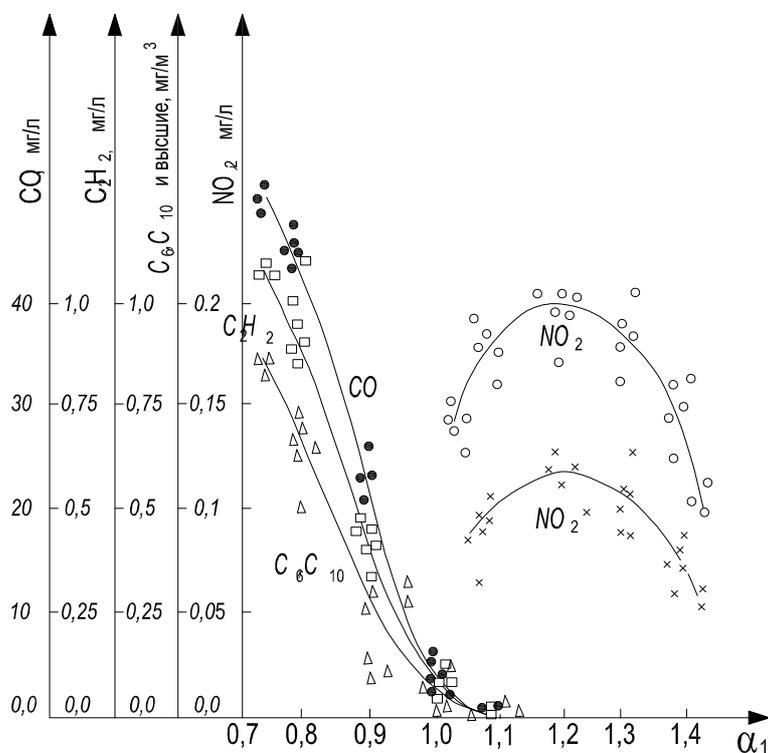


Рис. 8.4. Зависимость содержания продуктов неполного сгорания и оксидов азота от коэффициента избытка первичного воздуха (инжекционная горелка с керамическим туннелем)

Результаты исследований показывают, что полное сгорание однородной газовой смеси достигается только при избытке первичного воздуха не менее  $\alpha_1 = 1,05$ . При меньшем избытке начинается

вполне закономерный рост концентрации СО, ацетилена и полициклических ароматических углеводородов (С<sub>2</sub>, С<sub>6</sub>, С<sub>10</sub> и высших). Кроме компонентов, приведенных на графиках, в продуктах сгорания при  $\alpha_1 < 1,0$  обнаружены водород, этилен, метан и другие углеводороды.

Анализ продуктов сгорания на наличие 3,4-бензпирена показал, что его средний выход при  $\alpha_1 = 1,1$  ничтожен и не превышает 0,003 мкг/м<sup>3</sup> газа. При снижении  $\alpha_1$  до 0,75...0,8 средний выход 3,4-бензпирена возрастает в 250...270 раз и составляет 0,75...0,80 мкг/м<sup>3</sup> газа. При этом в отдельных пробах содержание канцерогена было еще большим и достигало 2,6 мкг/м<sup>3</sup> газа.

Приведенные графические зависимости подтверждают, что промежуточными веществами, принимающими участие в образовании 3,4-бензпирена и других соединений этого класса могут быть ацетилен, его производные и другие ненасыщенные углеводороды. Количественный характер зависимостей показывает также, что количество образующихся ПАУ очень мало по сравнению с количеством ацетилена.

Содержание оксидов азота в продуктах сгорания показано двумя кривыми. Верхняя кривая соответствует сжиганию газа в теплоизолированной камере при температуре 1250...1300 °С и объемной плотности теплового потока в топке 300...350 кВт/м<sup>3</sup>. Время пребывания газов в топке составляло примерно 2 секунды. Характер этой кривой свидетельствует, что максимальный выход NO<sub>x</sub> соответствует коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,2$  и быстро снижается при его увеличении или снижении.

Нижняя кривая получена при сжигании газа в неизолированной топке, когда сгорание происходит при температуре 850...900 °С и объемной плотности теплового потока в топочной камере 110...120 кВт/м<sup>3</sup>. Время пребывания газов в топке при этих условиях составляло 6...7 с. Значительное количество NO<sub>x</sub> в таких условиях можно объяснить тем, что на интенсивность их образования влияние

оказывает, прежде всего, уровень локальных температур во фронте пламени, который значительно превышает среднюю температуру в топочной камере.

Все представленные в графическом виде результаты исследований получены при установке инжекционных горелок в туннеле, длина и диаметр которого были равны  $2,5d$  ( $d$  — диаметр огневого канала горелки). Увеличение длины туннеля до  $(6...8,5)d$  при неизменном диаметре не приводило к существенному изменению картины горения и содержания компонентов в продуктах сгорания при одинаковых избытках воздуха. Таким образом, длина туннеля при кладке высокотемпературных печей определяется не условиями полноты сгорания, а только требованиями стабилизации пламени в отношении отрыва.

**Способы снижения вредных выбросов при сжигании газа в тепловых установках с дутьевыми горелками.** Горелки с принудительной подачей воздуха составляют другое большое, еще более разнообразное семейство устройств для сжигания газа в котлах и промышленных установках. Для ускорения смешения газа с воздухом в них применяется закрутка воздушного потока при помощи лопаточных регистров (см. рис. 7.6) или тангенциальная и улиточная подача воздуха в зону смешения (см. рис. 7.8).

Горелки среднего давления типа ГНП с лопаточным завихрителем воздуха широко используются в печах и сушилах. Горелка имеет раздачу газа в закрученный поток воздуха от центра к периферии (см. рис. 7.6, *a*) в виде мелких высокоскоростных струй. Горелка устанавливалась в экспериментальной топочной камере с туннелем длиной и диаметром  $2,5d$  ( $d$  — диаметр огневого канала горелки).

Работа горелки характеризуется образованием жесткого полупрозрачного факела. Анализ продуктов сгорания показал, что содержание оксида углерода и водорода в них ничтожно, средний выход 3,4-бензпирена составляет  $0,12 \text{ мкг/м}^3$  газа, в отдельных пробах возрастая до  $0,34 \text{ мкг/м}^3$  газа.

При оборудовании указанной горелки дополнительной камерой смешения (перед поступлением смеси в туннель) глубиной  $2d$  длина пламени сокращалась почти в два раза, причем факел становился прозрачным, аналогичным факелу инжекционной горелки, работающей с  $\alpha_1 = 1,1$ . В продуктах сгорания отсутствовали оксид углерода и водород, а средний выход 3,4-бензпирена уменьшался в 20...25 раз и составил  $0,005 \text{ мкг/м}^3$  газа. Выход оксидов азота на горелке с удлиненной камерой смешения по сравнению с серийной горелкой был несколько выше и при  $\alpha_1 = 1,2$  составлял от 0,2 до  $0,22 \text{ г/м}^3$ .

Снятие с серийной горелки завихрителя и замена многоструйной насадки осесимметричным соплом приводили к образованию длинного непрозрачного светящегося факела и наличию в продуктах сгорания большого количества сажистых частиц.

Особое внимание было уделено сравнению конструктивных и технологических характеристик дутьевых горелок: способу раздачи газа, длине участка смешения, угла наклона лопаток завихрителя и температуры воздуха. Исследования проводились на горелках ЦКТИ с центральной (рис. 7.6, *а*) и периферийной (рис. 7.6, *б*) раздачей газа в закрученный поток воздуха. Условия работы горелок в промышленной установке (например, в котле) симулировались при помощи цилиндрической топочной камеры с водоохлаждаемой рубашкой диаметром 800 мм и длиной 3 м. Закрутка воздуха осуществлялась сменными регистрами с углом наклона лопаток 30, 45 и 60°. Подогрев воздуха производился в электрическом калорифере.

Чтобы обеспечить достоверность оценки влияния вышеперечисленных факторов технологии сжигания газа, расход топлива и объемная плотность теплового потока в топочной камере поддерживались постоянными. При изменении одного из факторов влияния, например, способа раздачи газа, все остальные показатели сохранялись

неизменными (коэффициент избытка воздуха, интенсивность крутки, длина участка смешения и т. п.).

Полученные результаты показали, что полнота сгорания газа определяется: способом раздачи газа в воздушный поток, длиной участка смешения, коэффициентом избытка воздуха, его температурой и скоростью газовых струй.

На рис. 8.5 приведены обобщенные результаты исследования полноты сгорания в пересчете на показатель потерь теплоты от химического недожога  $q_3$ , используемого в тепловом балансе котельных агрегатов (см. разд. 9). Результаты получены на горелках с газовыпускными отверстиями диаметром 7,5 мм при угле наклона лопаток воздушного регистра  $60^\circ$ . Расход газа составлял  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а объемная плотность теплового потока в топочной камере около  $1,5 \text{ МВт}/\text{м}^3$ . Воздух подогревался до температуры  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пробы на анализ отбирались из сечения камеры, расположенного на расстоянии 2 м от амбразуры горелки.

Приведенные данные однозначно показывают, что удлинение участка предварительного смешения газа с воздухом снижает химический недожог для обоих типов горелок. При одинаковой длине участка смешения химнедожог у горелки с центральной раздачей газа значительно выше, чем у горелки с периферийной раздачей, причем эта разница растет при уменьшении длины камеры смешения.

Следует отметить, что даже при  $\alpha_1 = 1,2$  горелка с центральной раздачей газа не обеспечивает отсутствия химнедожога, несмотря на достаточно значительную длину участка предварительного смешения. Снижение избытка воздуха до  $\alpha_1 = 1,1$  при прочих равных условиях приводит в горелке с центральной раздачей газа к увеличению химнедожога до  $q_3 = 1,5 \%$ , тогда как на горелке с периферийным подводом газа он не превышает  $q_3 = 0,4\%$ .

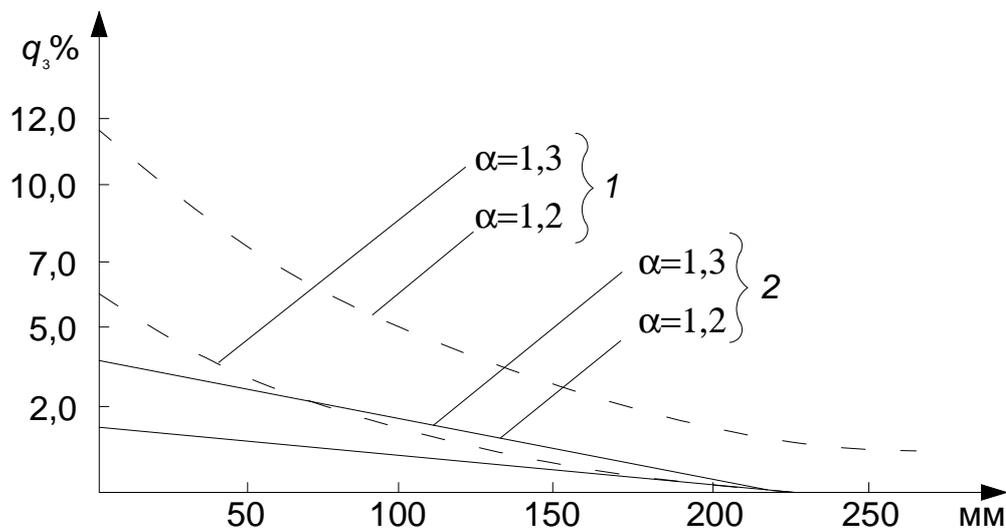


Рис. 8.5. Зависимость потерь теплоты от химнедожога  $q_3$  от длины камеры смешения и коэффициента избытка воздуха:  
 1 – горелка с центральной раздачей струй газа;  
 2 – горелка с периферийной раздачей струй газа

Отказ от крутки воздуха на обоих типах горелок (переход к его простой аксиальной подаче) приводит к недопустимому ухудшению полноты горения: до  $q_3 = 10,5\%$  в горелке с центральной и до  $q_3 = 1,2\%$  — с периферийной раздачей воздуха. Установлено также, что размеры и форма газораздающих отверстий в пределах 3...10 мм или эквивалентных им по площади щелевых отверстий не оказывает заметного влияния на характер горения и полноту сгорания газа.

Для изучения влияния скорости истечения газовых струй на полноту сгорания диаметры газовых отверстий, степень крутки (наклон лопаток) и скорость воздуха поддерживались постоянными и составляли соответственно 7,5 мм,  $60^\circ$  и 8 м/с.

Изменение скорости газа в пределах 30...105 м/с достигалось соответствующим изменением числа газовых отверстий. Исследования показали, что чрезмерное уменьшение и увеличение скорости газовых струй относительно оптимального значения приводит к росту химнедожога у обоих типов горелок. При этом увеличение скорости для

периферийной горелки сказывается незначительно, а для центральной — весьма сильно, повышая химнедожог в 2...3 раза.

Оптимальная скорость истечения газа для периферийной горелки (диаметр огневого канала 354 мм) составила 70...90 м/с, а для горелки с центральной раздачей газа (диаметр огневого канала 400 мм) — 60 м/с.

Повышение температуры дутьевого воздуха оказывало положительное влияние на обоих типах горелок, приводя к сокращению длины факела, уменьшению химического недожога и закономерному увеличению теплового потока, передаваемого через поверхность теплообмена (водоохлаждаемая рубашка камеры).

**Экологические показатели применения излучающих горелок.** Излучающие горелки (газовые излучатели) широко применяются в промышленности и для локального обогрева людей в больших помещениях или на открытом пространстве, где невозможно или нецелесообразно обогревать весь объем. Исследовалась стандартная инфракрасная горелка с керамической излучающей панелью (см. рис. 7.12) в вариантах с металлической сеткой над излучающей панелью (является защитным средством и способствует догоранию продуктов химнедожога), а также без сетки.

Особенностью этих горелок является инжекция воздуха в месте, приближенном к месту выхода продуктов сгорания. При направлении горелки под углом вниз возрастает вероятность попадания продуктов сгорания в эжектор горелки и значительного ухудшения показателей полноты сгорания. Поэтому анализ продуктов сгорания выполнялся при угле установки горелки 45 и 90° к горизонту.

Принцип работы излучающих горелок позволяют изменять коэффициент избытка первичного воздуха только в узком диапазоне  $\alpha_1 = 1,05...1,10$ . Условия отбора проб для газового анализа (из воздуха, окружающего горелку в непосредственной близости от панели)

неизбежно связаны с сильным разбавлением проб. Поэтому результаты всех анализов пересчитывались на стехиометрические условия ( $\alpha_1 = 1,0$ ).

Содержание оксида углерода в продуктах сгорания очень мало и не превышает 10...50 мг/м<sup>3</sup>. При этом, как правило, концентрация СО равномерно уменьшается при росте  $\alpha_1$  от 1,05 до 1,10. В продуктах сгорания не обнаружено ни 3,4-бензпирена, ни сажистых частиц. Выход оксидов азота по сравнению с обычными («пламенными») инжекционными горелками оказался существенно меньшим: в среднем 20...30 мг/м<sup>3</sup>.

Отдельно было проверено влияние металлической сетки на полноту сгорания. Результаты анализов убедительно показали, что снятие сетки не ухудшает показателей горения и не приводит к росту концентрации вредных веществ в выбросах.

Продукты сгорания излучающих горелок безопасны для людей, находящихся в обогреваемых помещениях. Наблюдаемое в практике повышенное содержание вредных веществ и продуктов неполного сгорания обычно вызвано применением горелок, несоответствующих данному виду газового топлива, чрезмерным уменьшением или увеличением тепловой нагрузки горелок и, прежде всего, неправильной установкой горелок, когда продукты сгорания инжектируются вместе с воздухом внутрь смесителей.

### **Контрольные вопросы по разделу 8**

*1. Какие вредные вещества могут содержаться в продуктах сгорания газообразного топлива?*

*2. Какие компоненты продуктов сгорания газа называют химическим недожогом?*

*3. Назовите причины появления химического недожога при сжигании газообразного топлива.*

*4. Какое влияние оказывают диаметр огневых отверстий и коэффициент избытка воздуха на появление химического недожога.*

*5. Какие канцерогенные вещества образуются в пламени?*

6. *Какие типы оксидов азота различают при сжигании топлива в зависимости от механизма их образования?*

7. *Опишите механизм образования термических оксидов азота.*

8. *Каковы источники и условия образования топливных оксидов азота?*

9. *В какой зоне, и при каких условиях образуются фронтальные (быстрые) оксиды азота?*

10. *От каких факторов зависит полнота сгорания газа в бытовых газовых плитах?*

11. *Как изменяется содержание оксидов азота в продуктах сгорания газа в бытовых газовых плитах при увеличении тепловой мощности горелок?*

12. *Какие виды газовых горелок предпочтительно применять в бытовых газовых плитах с учетом экологических показателей?*

13. *Перечислите методы подавления и снижения выбросов оксидов азота при сжигании газа в промышленных тепловых установках.*

14. *Опишите пути повышения экологических показателей излучающих газовых горелок.*

## 9. РАСЧЕТЫ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА

При эксплуатации самых различных устройств для сжигания газов специалисты должны уметь выполнять целый ряд расчетов, на основании которых можно судить об эффективности использования топлива, а также определять основные экономические, технологические и экологические показатели работы оборудования. Если эти показатели не соответствуют данным производителей оборудования, необходимо установить причины этого несоответствия и как можно быстрее предпринять действия по их устранению. От этого зависят не только эксплуатационные затраты, но и безопасность использования газа, а также влияние, оказываемое на здоровье людей и окружающую среду.

Расчеты некоторых характеристик сжигания газообразного топлива на основании данных о его химическом составе были рассмотрены ранее в разд. 3 и 5. В эксплуатации специалист располагает дополнительными данными измерений температуры отходящих газов и их состава, что дает возможности более точного определения требуемых показателей именно в том техническом состоянии, в котором оборудование находится в данный момент. Необходимо отметить, что рассматриваемые показатели использования топлива относятся к любым видам топлива (твердому, жидкому и газообразному топливу), используемым в тепловых установках.

### 9.1. МАКСИМАЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТРЕХАТОМНЫХ ГАЗОВ

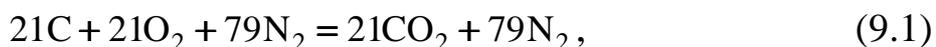
Сухие продукты полного сгорания углеводородных топлив наряду с азотом содержат так называемые трехатомные газы, то есть  $\text{CO}_2$ , а в случае содержания серы в топливе и  $\text{SO}_2$ . Суммарное содержание этих соединений в отходящих газах обозначается символом  $\text{RO}_2$ . Максимально возможное значение этого показателя  $\text{RO}_2^{\max}$

соответствует сжиганию топлива в стехиометрических условиях. Рассматриваемая величина является очень важным параметром в расчетах, связанных со сжиганием органических топлив. С точки зрения экологических задач она характеризует также эмиссию «парниковых» газов, поскольку именно трехатомные газы имеют свойство экранировать тепловое излучение планеты в атмосфере Земли.

### 9.1.1. Продукты полного сгорания

В большинстве случаев значение  $RO_2^{\max}$  зависит от состава горючей части топлива. Исключением являются топлива с высоким содержанием минеральных компонентов, особенно карбонатов. В этом случае необходимо учитывать рост концентрации  $RO_2$  в результате диссоциации карбонатов (обычно — при сжигании сланцев).

Материальный баланс полного стехиометрического сгорания углерода в воздухе можно представить уравнением



из которого следует, что  $RO_2^{\max}$  для углерода равно 21 % об. Для всех топлив с высоким содержанием углерода величина  $RO_2^{\max}$  близка к этому значению: для кокса — 20,6, для антрацита — 20,2 % об.

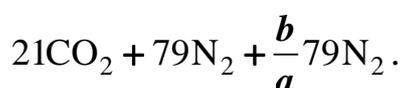
Наличие водорода в горючей части топлива снижает содержание  $RO_2$  не только во влажных, но и в сухих продуктах сгорания. Если соотношение водорода и углерода в горючей массе составляет  $b:a$ , то наряду с горением углерода в соответствии с уравнением:



будет протекать также горение водорода согласно уравнению:



После конденсации водяных паров, образовавшихся в результате сжигания водорода, сухие продукты сгорания будут иметь состав:



Таким образом, чем выше значение соотношения  $b:a$  в топливе, тем ниже величина  $RO_2^{\max}$ . Например для мазута (содержит около 12 % водорода)  $RO_2^{\max}$  составляет  $\approx 16$  % об., для сжиженного углеводородного газа (до 20 % водорода) — около 14, тогда как для метана (25 % водорода) — всего 11,8.

При известном составе газообразного топлива значение  $RO_2^{\max}$  определяется аналитически следующим образом. Сначала по выражению (3.8) определяем теоретический объем диоксида углерода в продуктах сгорания  $V_{CO_2}$ . Затем по формуле (3.14) вычисляем теоретический объем сухих продуктов сгорания  $V_{п.с}^{т.с}$ . Тогда  $RO_2^{\max}$ , % об., можно определить по выражению

$$RO_2^{\max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{п.с}^{т.с}} 100. \quad (9.3)$$

Газовый анализ состава продуктов сгорания позволяет определить значение  $RO_2^{\max}$  для топлива неизвестного состава. Поскольку в теоретическом (стехиометрическом) составе отходящих газов нет кислорода, то в этом случае сумма  $RO_2 + N_2 = 100$  % об. При сжигании топлива в практике с определенным избытком воздуха кислород из этого избытка целиком переходит в состав продуктов сгорания, причем каждому проценту кислорода сопутствует 3,76 % азота, то есть  $RO_2 + N_2 + 4,76O_2 = 100$  % об.

Это дает основание сформулировать закономерность:

$$RO_2^{\max} = \frac{100RO_2}{100 - 4,76O_2}. \quad (9.4)$$

При полном сжигании природного и сжиженного углеводородного газов это выражение имеет вид:

$$CO_2^{\max} = \frac{100CO_2}{100 - 4,76O_2}. \quad (9.4^*)$$

Это дает возможность определять  $RO_2^{\max}$  ( $CO_2^{\max}$ ) топлива неизвестного состава, имея в распоряжении только результаты анализа

отходящих газов. Значительно упрощает это использование таблицы, приведенной в Приложении 1. С другой стороны, имея данные о значении  $\text{CO}_2^{\max}$  топлива и результаты анализа содержания  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания, по выражению (9.4\*) можно легко определить содержание в них кислорода  $\text{O}_2$ .

### 9.1.2. Продукты неполного сгорания

Приведенные выше выражения справедливы в случае полного сгорания топлива. При неполном сгорании газового топлива в отходящих газах присутствуют метан, водород и оксид углерода. Однако содержание  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$  свидетельствует, скорее, о серьезном нарушении технического состояния горелочного и топочного оборудования.

При нормальной эксплуатации газоиспользующего оборудования необходимо предусматривать только контроль содержания  $\text{CO}$  в продуктах сгорания. В этом случае в числителе выражений (9.4) и (9.4\*) учитывается не действительная, а так называемая потенциальная концентрация трехатомных газов, то есть сумма  $\text{RO}_2 + \text{CO}$ , тогда как в знаменателе — не действительная концентрация кислорода, а его содержание за минусом того количества, которое необходимо для окисления оксида углерода, т. е. значение разности  $\text{O}_2 - 0,5\text{CO}$ :

$$\text{RO}_2^{\max} = \frac{100(\text{RO}_2 + \text{CO})}{100 - 4,76(\text{O}_2 - 0,5\text{CO})}; \quad (9.5)$$

$$\text{CO}_2^{\max} = \frac{100(\text{CO}_2 + \text{CO})}{100 - 4,76(\text{O}_2 - 0,5\text{CO})}. \quad (9.5^*)$$

Следует подчеркнуть, что выражения (9.4) и (9.4\*) справедливы стехиометрически, но не учитывают уменьшения объема продуктов сгорания при окислении  $\text{CO}$  в соответствии с уравнением  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ . Если учесть этот факт, то точные выражения для определения  $\text{RO}_2^{\max}$  или  $\text{CO}_2^{\max}$  на основании газового анализа продуктов сгорания будут иметь вид:

$$RO_2^{\max} = \frac{100(RO_2 + CO)}{100 - 4,76(O_2 - 0,4CO)}; \quad (9.6)$$

$$CO_2^{\max} = \frac{100(CO_2 + CO)}{100 - 4,76(O_2 - 0,4CO)}. \quad (9.6^*)$$

В практике эксплуатации котельных агрегатов может возникнуть также необходимость определения содержания СО в отходящих газах на основании информации о содержании СО<sub>2</sub> и кислорода (такие анализаторы нередко входят в состав систем автоматизации современных котлов). Если значение  $RO_2^{\max}$  было предварительно определено на основании известного состава топлива или результатов газового анализа (в условиях, когда котел находился в нормальном техническом состоянии), то по показаниям анализаторов СО<sub>2</sub> и О<sub>2</sub> в текущем состоянии котла можно определить наличие СО в продуктах сгорания по выражению

$$CO = \frac{21 \left( 1 - \frac{RO_2}{RO_2^{\max}} \right) - O_2}{\frac{21}{RO_2^{\max}} - 0,4}. \quad (9.7)$$

**Примечание.** Для природных и сжиженных углеводородных газов всегда вместо  $RO_2^{\max}$  подставляется  $CO_2^{\max}$ , а вместо действительной суммарной концентрации трехатомных газов  $RO_2$  пишется  $CO_2$ .

Обратим внимание, что соотношение  $21/RO_2^{\max}$  является характеристикой топлива. Например, для природного газа значение этого соотношения составляет 1,78, для сжиженных газов — в среднем 1,50. Используя эти значения, выражение (8.7) можно модифицировать следующим образом:

- для природного газа:

$$CO = \frac{21 - 1,78CO_2 - O_2}{1,38}; \quad (9.7^*)$$

- для сжиженных газов:

$$CO = \frac{21 - 1,5CO_2 - O_2}{1,1}. \quad (9.7^{**})$$

Подобным образом выражение (9.7) можно модифицировать и для других распространенных видов топлива. С этой целью можно использовать данные, приведенные в табл. 9.1.

Таблица 9.1

**Значения, необходимые для модификации формулы (9.7)**

Топливо	$RO_2^{\max}$	$21/RO_2^{\max}$	Топливо	$RO_2^{\max}$	$21/RO_2^{\max}$
1	2	3	1	2	3
Коксовый газ	10,5	2,0	Каменный уголь	18,7	1,12
Природный газ	11,8	1,78	Бурый уголь	19,5	1,08
Нефтяной газ	13,0	1,61	Торф	19,5	1,08
Сжиженный газ	14,0	1,5	Генераторный газ	20,0	1,05
Бензин	14,8	1,42	Антрацит	20,2	1,04
Дизельное топливо	15,4	1,36	Дерево	20,5	1,02
Мазут	16,0	1,31	Кокс	20,6	1,02
Тяжелый мазут	16,5	1,27	Доменный газ	24,5	0,86

## 9.2. КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Как известно (см. п. 3.2), с целью обеспечения полного сгорания топлив воздух в зону горения доставляется не в стехиометрическом количестве, а с определенным избытком, величину которого отражает коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , в соответствии с выражением (3.7). Однако это выражение отражает только физический смысл величины  $\alpha$ , а не способ его аналитического определения в практических расчетах. В то же время, значение коэффициента избытка воздуха очень важно при решении задач, связанных с эффективностью, экологичностью и безопасностью сжигания топлива.

### 9.2.1. Продукты полного сгорания

При известных результатах газового анализа отходящих газов значение  $\alpha$  можно определить при помощи «азотной» формулы в различных ее вариантах:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76O_2} \quad (9.8)$$

или

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O_2}{N_2}}, \quad (9.8^*)$$

или

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}}. \quad (9.8^{**})$$

Вышеприведенные формулы справедливы при сжигании сжиженных газов и природных газов с высоким содержанием метана. Сильно забалластированный природный газ содержит заметное количество азота  $N_2^r$ , % об. С учетом этого факта выражение (9.8) модифицируется следующим образом ( $V_{п.с}^c$  — объем сухих продуктов сгорания,  $m^3/m^3$  газа, см. п. 3.2):

$$\alpha = \frac{N_2 - \frac{N_2^r}{V_{п.с}^c}}{N_2 - \frac{N_2^r}{V_{п.с}^c} - 3,76O_2}. \quad (9.9)$$

### 9.2.2. Продукты неполного сгорания

Как выше было сказано, наличие метана и водорода в продуктах сгорания традиционных котлов и печей свидетельствует о существенном нарушении технического состояния горелок или топок. Однако существует ряд технологических промышленных печей, где сознательно создается так называемая защитная среда, цель которой

заключается в предотвращении окисления и обезуглероживания металлов. В таких устройствах газ сжигается при значениях  $\alpha$ , существенно меньших 1,0 (в среднем около 0,5). В таких особых случаях предпочтителен термин «коэффициент расхода воздуха».

Отходящие газы таких печей содержат значительное количество продуктов неполного сгорания: не только CO, но и метана и водорода. По окончании технологического процесса, в целях снижения экономического и экологического ущерба осуществляется их дожигание. Чтобы определить значение  $\alpha$  в отходящих газах такого оборудования, необходимо модифицировать формулу (9.8), т. е. от измеренного содержания кислорода отнять его количество, необходимое для окисления горючих компонентов:

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76(O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4)}. \quad (9.10)$$

Аналогичным образом при неполном сгорании изменяется формула (9.9) для забалластированного азотом газа:

$$\alpha = \frac{N_2 - \frac{N_2^r}{V_{п.с}^c}}{N_2 - \frac{N_2^r}{V_{п.с}^c} - 3,76(O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4)}. \quad (9.11)$$

**Примечание.** Выражения (9.8)...(9.11) применимы только для случая сжигания топлива с воздухом, не обогащенным кислородом. Если же поступающий на горение воздух обогащается кислородом (в некоторых металлургических процессах), в этих выражениях достаточно заменить значения 21 и 79 на действительное процентное содержание кислорода и азота в дутьевом воздухе. При этом важной является газоплотность газоздушного тракта, гарантирующая отсутствие присосов атмосферного, небогащенного кислородом воздуха.

Разработана также упрощенная методика расчета значения  $\alpha$  по результатам газового анализа продуктов сгорания, которая не требует

определения содержания кислорода в дутьевом воздухе. Если отношение объема кислорода, израсходованного на сжигание топлива с образованием  $RO_2$  и  $H_2O$ , к объему  $RO_2$  в составе отходящих газов составляет

$$n = (RO_2 + 0,5H_2O):RO_2, \quad (9.12)$$

то значение коэффициента избытка воздуха (кислорода, обогащенного кислородом воздуха) можно определить выражением:

$$\alpha = \frac{O_2 + nRO_2}{nRO_2}. \quad (9.13)$$

Данные о значениях коэффициента  $n$  для некоторых видов топлива приведены в табл. 9.2.

При неполном сгорании топлива универсальное выражение (9.13) можно модифицировать, учитывая баланс кислорода следующим образом (для газов, не содержащих серы):

$$\alpha = \frac{O_2 - (0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4) + n(CO_2 + CO + CH_4)}{n(CO_2 + CO + CH_4)}. \quad (9.14)$$

Таблица 9.2

**Значения коэффициента  $n$  некоторых топлив  
для выражения (9.13)**

Топливо		$n$	Топливо		$N$
1	2		1	2	
Коксовый газ	2,28	Каменный уголь	1,15		
Природный газ	2,00	Бурый уголь	1,10		
Нефтяной газ	1,85	Торф	1,09		
Сжиженный газ	1,65	Генераторный газ	0,75		
Бензин	1,52	Антрацит	1,05		
Дизельное топливо	1,45	Дерево	1,03		
Мазут малосернистый	1,35	Кокс	1,05		
Мазут сернистый	1,40	Доменный газ	0,41		

### 9.3. КОЭФФИЦИЕНТ РАЗБАВЛЕНИЯ СУХИХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Профессионалы в текущих расчетах нередко ориентировочно подсчитывают коэффициент избытка воздуха по так называемой «кислородной» формуле

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - O_2}. \quad (9.15)$$

Для топлив со значением  $RO_2^{\max}$  близким к 21 % (дерево, антрацит, генераторный газ), эта формула действительно дает достаточно точный результат. Однако в действительности эта формула определяет так называемый *коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания* (*коэффициент изменения объема сухих продуктов сгорания*), который обозначается символом  $h$ . Логика его названия указывает на сравнение действительного и теоретического (стехиометрического) объема продуктов сгорания:

$$h = \frac{V_{п.с}^c}{V_{п.с}^{т.с}}. \quad (9.16)$$

Из баланса углерода в продуктах полного сгорания следует:

$$h = \frac{CO_2^{\max}}{CO_2}. \quad (9.17)$$

Вместе с «кислородной» формулой это наиболее часто используемое выражение для подсчета значения  $h$  на основе данных анализа отходящих газов.

При неполном сгорании топлива коэффициент  $h$  определяется с учетом потенциального содержания  $CO_2$  в отходящих газах, то есть суммы  $CO_2 + CO + CH_4$ , что дает выражение

$$h = \frac{CO_2^{\max}}{CO_2 + CO + CH_4}. \quad (9.18)$$

**Примечание.** Как всегда, для топлив, содержащих серу, вместо  $CO_2^{\max}$  применяется значение  $RO_2^{\max}$ .

При неполном сгорании значение  $h$  может быть меньше 1,0. Именно поэтому название «коэффициент изменения объема» является более точным, поскольку термин «разбавление» в случае  $h < 1,0$  при неполном сгорании звучит некорректно.

### **9.3.1. Связь между коэффициентом избытка воздуха и коэффициентом разбавления продуктов сгорания**

В случае если объем сухих продуктов сгорания мало отличается от потребности в воздухе на горение, значения  $\alpha$  и  $h$  также очень близки между собой. Такое положение вещей характерно для антрацита, кокса и других видов топлива с высоким содержанием углерода к горючей массе и со сравнительно малой потребностью в воздухе (кислороде) на горение.

Значения  $\alpha$  и  $h$  также близки при сжигании дерева, которое в составе своей горючей массы содержит кислород в количестве, почти эквивалентном стехиометрическому, по отношению к содержанию водорода.

При сжигании топлива, у которого объем сухих продуктов сгорания  $V_{п.с}^{т.с}$  существенно отличается от теоретической потребности в воздухе  $V_B^{т.с}$ , значения  $\alpha$  и  $h$  также сильно отличаются. Например, при сжигании доменного газа с избытком воздуха значение  $h$  значительно меньше  $\alpha$ , так как вследствие высокого содержания азота в этом топливе объем продуктов сгорания значительно превышает теоретическую потребность в воздухе для сжигания. Для генераторных газов соотношение между  $h$  и  $\alpha$  имеет похожий характер по тем же причинам.

Напротив, при сжигании газов с высоким содержанием углеводов или молекулярного водорода (природный, сжиженный, коксовый и нефтяной газ, мазут, керосин, бензин) объем сухих продуктов сгорания меньше объема воздуха, расходуемого на горение. Поэтому

значение  $h$  при сжигании таких топлив с избытком воздуха всегда превышает величину  $\alpha$ .

Применяя приведенные выше зависимости и понятия можно вывести формулу, устанавливающую зависимость между  $\alpha$  и  $h$ :

$$\alpha = 1 + (h - 1) \frac{V_{\text{п.с}}^{\text{т.с}}}{V_{\text{в}}^{\text{т.с}}}. \quad (9.19)$$

Отношение между теоретическим объемом сухих продуктов сгорания  $V_{\text{п.с}}^{\text{т.с}}$  и теоретической потребностью в сухом воздухе при полном сгорании в стехиометрических условиях  $V_{\text{в}}^{\text{т.с}}$  зависит исключительно от состава топлива и является его характеристикой. Принимая обозначение

$$Y = \frac{V_{\text{п.с}}^{\text{т.с}}}{V_{\text{в}}^{\text{т.с}}}, \quad (9.20)$$

выражение (9.19) можно записать в виде

$$\alpha = 1 + (h - 1)Y. \quad (9.21)$$

Значения величины  $Y$  для распространенных видов топлива и соотношение объема влажных и сухих продуктов сгорания  $B$  (с учетом влажности рабочей массы топлива) приведены в табл. 9.3.

### 9.3.2. Влажные продукты сгорания

Расчеты с учетом влажности очень важны для определения фактического объема продуктов сгорания, поскольку именно в таком состоянии они проходят через боровы и дымовые трубы. Суммарный объем влажных продуктов сгорания всегда больше, чем сухих, на величину объема водяного пара, образовавшегося при горении (см. формулы (3.12) и (3.13)).

Таблица 9.3

Значения коэффициентов  $Y$  и  $B$  для различных топлив

Топливо	Влажность по массе, %	$B$	$Y$	Топливо	Влажность по массе, %	$B$	$Y$
1	2	3	4	1	2	3	4
Углерод	0	1,00	1,00	Природный газ	0	1,10	0,90
Антрацит	5	1,03	0,99	Сланцы	15	1,16	0,97
Полуантрацит	5	1,04	0,98	Коксовый газ	0	1,20	0,90
Каменный уголь	6	1,06	0,97	Водород	0	1,21	0,79
Бурый уголь	32	1,20	0,98	Торф кусковой	40	1,28	0,99
Мазут	3	1,07	0,95	Дерево	40	1,33	0,99
Сжиженный газ	0	1,10	0,92	Торф фрезерный	50	1,36	0,99
Нефтезав. газ	0	1,10	0,92	Доменный газ	0	2,10	2,00

Аналогично величине  $Y$ , отношение между объемом сухих продуктов сгорания  $V_{п.с}^{т.с}$  и объемом влажных продуктов сгорания  $V_{п.с}^{т.вл}$  в стехиометрических условиях является характеристикой самого топлива, которая обозначается символом  $B$ :

$$B = \frac{V_{п.с}^{т.с}}{V_{п.с}^{т.вл}}, \quad (9.22)$$

что дает возможность определить объем влажных продуктов сгорания по выражению:

$$V_{п.с}^{т.вл} = \frac{V_{п.с}^{т.с}}{B}. \quad (9.22^*)$$

Информация о значениях показателя  $V$  для распространенных видов топлива приведена в табл. 9.3.

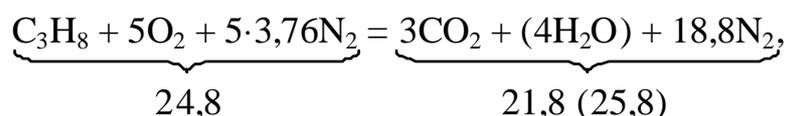
### Пример 9.1

Сухие продукты полного сгорания пропана содержат 6,6 %  $\text{CO}_2$ , 11,0 %  $\text{O}_2$  и 82,4 %  $\text{N}_2$ . Определить значения  $\alpha$  и  $h$  при этих условиях.

#### Решение

1. При помощи таблицы Приложения 1 устанавливаем значение  $\text{CO}_2^{\max} = 13,9\%$ .

2. Более точно значение  $\text{CO}_2^{\max}$  можно определить по стехиометрическому уравнению реакции горения пропана



откуда следует, что  $\text{CO}_2^{\max} = \frac{3}{21,8} 100 = 13,8\%$ .

3. По «азотной» формуле (9.8) определяем коэффициент избытка воздуха в отходящих газах:

$$\alpha = \frac{82,4}{82,4 - 3,76 \cdot 11} = 2,0.$$

3. По выражению (9.17) определяем коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания:

$$h = \frac{13,8}{6,6} = 2,09.$$

### Пример 9.2

Сухие продукты полного сгорания природного газа содержат 10,0 %  $\text{CO}_2$ . Определить значения  $\alpha$  и  $h$ , используя различные методы.

## Решение

*Расчет коэффициента избытка воздуха по «азотной» формуле.*

1. По табл. 9.1 находим для природного газа  $\text{CO}_2^{\text{max}} = 11,8 \%$ .
2. Преобразуя формулу (9.4\*) определяем содержание кислорода:

$$\text{O}_2 = \frac{100(\text{CO}_2^{\text{max}} - \text{CO}_2)}{4,76\text{CO}_2^{\text{max}}} = \frac{100(11,8 - 10,0)}{4,76 \cdot 11,8} = 3,2 \text{ \% об.}$$

3. Определяем содержание азота в сухих продуктах сгорания:

$$\text{N}_2 = 100 - 10,0 - 3,2 = 86,8\% \text{ об.}$$

3. По формуле (8.8) окончательно определяем

$$\alpha = \frac{86,8}{86,8 - 3,76 \cdot 3,2} = 1,16.$$

*Расчет  $\alpha$  по упрощенному методу.*

1. По табл. 9.2. для природного газа находим  $n = 2,0$ .
2. По выражению (8.13) определяем:

$$\alpha = \frac{3,2 + 2 \cdot 10,0}{2 \cdot 10,0} = 1,16.$$

*Расчет коэффициента разбавления сухих продуктов сгорания.*

1. По «кислородной» формуле

$$h = \frac{21}{21 - 3,2} = 1,18.$$

2. По выражению (9.17)

$$h = \frac{11,8}{10,0} = 1,18.$$

*Расчет  $\alpha$  по известному значению  $h$ .*

1. По табл. 9.3 для природного газа находим

$$Y = 0,9.$$

2. По выражению (9.21) определяем:

$$\alpha = 1 + (1,18 - 1)0,9 = 1,16.$$

## 9.4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА

### 9.4.1. Методы составления теплового баланса

С математической точки зрения определение к. п. д. теплового агрегата  $\eta$ , %, заключается в сравнении полезно использованного в этом устройстве количества теплоты  $Q_1$  с полным количеством теплоты, подведенным к нему  $Q$ :

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} \cdot 100 \quad \text{или} \quad \eta = q_1 \cdot 100. \quad (9.23)$$

Этот метод определения к. п. д. называется методом составления «прямого» теплового баланса агрегата. Однако только на первый взгляд метод выглядит простым.

Для ряда распространенных агрегатов определение полезно использованной теплоты  $Q_1$  не связано с особыми трудностями. Например, для водогрейного котла всегда известна температура воды на входе и выходе из котла и расход воды через котел.

В случае паровых котлов на выходе из котла учитывается температура и давление выработанного пара. Но эта задача практически неразрешима для большинства промышленных печей.

Значительные трудности вызывает точное определение теплоты  $Q$ , которым мы располагаем, сжигая топливо. Даже в случае газового и жидкого топлива, когда расход топлива точно измеряется, невозможно уследить за текущими изменениями его калорийности (это требует постоянного анализа состава топлива и лабораторного определения теплоты его сгорания).

Расход твердого топлива в принципе невозможно измерить для целей составления прямого баланса. Кроме того, в располагаемую теплоту входит физическое тепло самого топлива (снова проблема с измерением

расхода твердого топлива), а также воздуха, поступающего в топку на горение. Отметим, что расход воздуха никогда не измеряется в распространенных тепловых агрегатах (контролируется только его давление).

Все это приводит к тому, что прямой баланс редко используется в практике сжигания топлива в промышленных и отопительных тепловых агрегатах. Более распространен метод обратного теплового баланса:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100 \%. \quad (9.24)$$

Метод предусматривает определение не теплоты, использованной в агрегате, а всех потерь теплоты:

$q_2$  — с отходящими газами;

$q_3$  — от химического недожога;

$q_4$  — от физического недожога;

$q_5$  — в окружающую среду через ограждения.

В этом случае к. п. д. теплового агрегата, %, определяется как

$$\eta = q_1 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5). \quad (9.24^*)$$

#### 9.4.2. Обратный тепловой баланс при сжигании топлива

Как видно из вышесказанного, метод обратного баланса не требует измерения расхода топлива и даже данных о его калорийности. При сжигании газов нет потерь теплоты от физического недожога, поэтому применение метода сводится к по возможности более точному определению значений  $q_2$ ,  $q_3$  и  $q_5$ .

**Потери теплоты с отходящими газами.** Физика этой задачи очень проста: чем выше избыток воздуха и температура отходящих газов, тем более высока их энтальпия, и, что из этого следует, тем выше потери теплоты с отходящими газами. Однако точное определение теплоты  $q_2$ , уносимой с отходящими газами, представляет

собой достаточно сложную задачу, поскольку это связано с использованием значений средней теплоемкости всех компонентов отходящих газов в рассматриваемом диапазоне температур. Другим способом определения  $q_2$  является использование значения жаропроизводительности топлива (см. п. 4.1.2).

Оба способа вряд ли могут быть рекомендованы для широкого использования в практике эксплуатации тепловых агрегатов. Поэтому была разработана методика, значительно упрощающая расчеты с сохранением удовлетворительной точности получаемых результатов.

В эксплуатации специалист обычно располагает результатами текущего анализа продуктов сгорания по двум компонентам: кислороду и двуокиси углерода. Другим результатом измерений, который всегда под рукой, является температура отходящих газов.

На основании газового анализа всегда легко проверить, является ли сгорание полным. Для этого можно использовать данные табл. 9.4, которая взаимосвязано представляет все основные параметры сгорания природного газа. Если результаты частичного анализа не соответствуют данным таблицы, то это свидетельствует о неполном сгорании и необходимости выполнения ремонтных и наладочных работ для устранения причин недожога и, возможно, дополнительного анализа продуктов неполного сгорания.

В обоих случаях потери теплоты с отходящими газами  $q_2$  определяются по выражению

$$q_2 = 0,01Z(t_{п.с} - t_{в}), \quad (9.25)$$

где  $t_{п.с}$  – температура отходящих газов, °С;  $t_{в}$  – температура воздуха, поступающего на горение, °С;  $Z$  – комплексный показатель, обобщающий информацию о теплоемкости продуктов сгорания природного газа (Приложение 2).

Таблица 9.4

## Характеристики продуктов полного сгорания природного газа

Состав, % об.			Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания $h$	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Температура горения, °С		Состав, % об.			Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания $h$	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Температура горения, °С	
CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			Калориметрическая	Теоретическая	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			Калориметрическая	Теоретическая
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
11,8	0,0	88,2	1,00	1,00	2010	1920	6,2	10,0	83,8	1,90	1,82	1260	—
11,6	0,4	88,0	1,02	1,02	1960	1900	6,0	10,3	83,7	1,96	1,87	1230	—
11,4	0,7	87,9	1,03	1,03	1970	1880	5,8	10,7	83,5	2,03	1,94	1200	—
11,2	1,1	87,7	1,05	1,05	1940	1870	5,6	11,0	83,4	2,11	2,00	1170	—
11,0	1,4	87,6	1,07	1,06	1920	1860	5,4	11,4	83,2	2,18	2,07	1140	—
10,8	1,8	87,4	1,09	1,08	1900	1850	5,2	11,8	83,0	2,26	2,15	1100	—
10,6	2,1	87,3	1,11	1,10	1880	1840	5,0	12,1	82,9	2,36	2,22	1070	—
10,4	2,5	87,1	1,13	1,12	1850	1820	4,8	12,5	82,7	2,46	2,31	1040	—
10,2	2,8	87,0	1,15	1,14	1820	1790	4,6	12,8	82,6	2,56	2,41	1000	—
10,0	3,2	86,8	1,18	1,16	1800	1770	5,4	13,2	82,4	2,68	2,51	960	—
9,8	3,6	86,6	1,20	1,18	1780	—	4,2	13,5	82,3	2,81	2,62	930	—
9,6	3,9	86,5	1,23	1,20	1760	—	4,0	13,9	82,1	2,94	2,75	900	—
9,4	4,2	86,4	1,25	1,22	1730	—	3,8	14,2	82,0	3,11	2,90	—	—
9,2	4,6	86,2	1,28	1,25	1700	—	3,6	14,6	81,8	3,28	3,05	—	—
9,0	5,0	86,0	1,31	1,28	1670	—	3,4	15,0	81,6	3,47	3,20	—	—
8,8	5,3	85,9	1,34	1,30	1650	—	3,2	15,3	81,5	3,69	3,40	—	—
8,6	5,7	85,7	1,37	1,33	1620	—	3,0	15,7	81,3	3,94	3,65	—	—
8,4	6,1	85,5	1,40	1,36	1600	—	2,8	16,0	81,2	4,21	3,90	—	—
8,2	6,4	85,4	1,44	1,40	1570	—	2,6	16,4	81,0	4,54	4,20	—	—
8,0	6,8	85,2	1,47	1,43	1540	—	2,4	16,7	80,9	4,92	4,50	—	—
7,8	7,1	85,1	1,51	1,46	1510	—	2,2	17,1	80,7	5,36	4,90	—	—
7,6	7,5	84,9	1,55	1,50	1470	—	2,0	17,4	80,6	5,90	5,40	—	—
7,4	7,8	84,8	1,59	1,53	1440	—	1,8	17,8	80,4	6,55	6,00	—	—
7,2	8,2	84,6	1,64	1,57	1410	—	1,6	18,2	80,2	7,38	6,70	—	—
7,0	8,5	84,5	1,68	1,61	1380	—	1,4	18,5	80,1	8,43	7,70	—	—
6,8	8,9	84,3	1,73	1,66	1350	—	1,2	18,9	79,9	9,83	8,90	—	—
6,6	9,2	84,2	1,79	1,71	1320	—	1,0	19,2	79,8	11,8	10,70	—	—
6,4	9,6	84,0	1,85	1,76	1290	—							

### Пример 9.3

По данным частичного анализа сухие продукты сгорания природного газа содержат 9,1 %  $\text{CO}_2$  и 4,8 %  $\text{O}_2$ . Температура отходящих газов 300 °С. Температура воздуха 20 °С. Определить потери теплоты с отходящими газами.

#### Решение

1. При помощи табл. 9.4 проверяем полноту сгорания газа. Поскольку данные анализа сходятся с данными таблицы, сгорание считается полным.

2. По таблице Приложения 2 для температуры газов 300 °С получаем значение  $Z = 5,10$ .

3. По выражению (9.25) определим

$$q_2 = 0,01 \cdot 5,10(300 - 20) = 14,28 \%$$

### Пример 9.4

По данным полного газового анализа сухие продукты сгорания природного газа содержат: 9,1 %  $\text{CO}_2$ , 0,2 %  $\text{CO}$  и 0,5 %  $\text{CH}_4$ . Температура отходящих газов 300 °С. Температура воздуха 20 °С. Определить потери  $q_2$ .

#### Решение

1. Отходящие газы содержат продукты неполного сгорания, поэтому использование табл. 9.4 не требуется. Сумма продуктов сгорания, содержащих углерод, составляет

$$\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 = 9,8 \%$$

2. Для этой суммы при температуре 300 °С по таблице Приложения 2 получаем значение  $Z = 4,83$ .

3. По формуле (9.25) определяем

$$q_2 = 0,01 \cdot 4,83(300 - 20) = 13,52 \%$$

**Потери теплоты от химического недожога.** Сравнение результатов, полученных в примерах 9.3 и 9.4, приводит к неизбежному вопросу: почему при таких близких параметрах потери теплоты с

отходящими газами во втором случае меньше? Можно ли результаты сжигания топлива во втором случае признать лучшими?

В действительности сгорание во втором случае имеет значительно худшие показатели эффективности. Это связано с так называемым химическим недожогом, то есть присутствием в отходящих газах продуктов неполного сгорания. Это явление резко снижает эффективность использования топлива. Специалисты по эксплуатации придерживаются неукоснительного принципа: лучше решиться на повышение избытка воздуха и вытекающий из этого некоторый рост  $q_2$ , чем допустить химнедожог, негативные последствия которого будут на порядок выше.

Значение  $q_3$  можно определить по выражению

$$q_3 = h(3CO + 2,5H_2 + 8,5CH_4) \% . \quad (9.26)$$

Если значение коэффициента разбавления сухих продуктов сгорания не определялось, то при сжигании природного газа можно использовать выражение

$$q_3 = \frac{35CO + 30H_2 + 100CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} \% . \quad (9.27)$$

### Пример 9.5

Сравнить показатели эффективности сжигания топлива для примеров 9.3 и 9.4 с учетом потерь теплоты от химнедожога.

#### Решение

1. При сжигании по данным примера 9.3 явление химического недожога не имеет места, то есть  $q_{3(9.3)} = 0$ , а сумма  $(q_2 + q_3)_{(9.3)} = 14,28 \%$ .

2. При сжигании по данным примера 9.4 потери теплоты от химнедожога определим по выражению (9.27):

$$q_{3(9.4)} = \frac{35 \cdot 0,2 + 100 \cdot 0,5}{9,1 + 0,2 + 0,5} = 5,82 \%$$

3. Сумма потерь теплоты во втором случае составляет:

$$(q_2 + q_3)_{(9,4)} = 13,52 + 5,82 = 19,34 \%,$$

то есть сжигание во втором случае имеет значительно меньшую эффективность.

**Потери теплоты в окружающую среду.** Любой тепловой агрегат часть располагаемой теплоты неизбежно теряет через ограждающие конструкции в окружающую среду. Обычно это незначительная часть общих потерь теплоты, которая вместе с развитием техники постоянно уменьшается. Прежде всего, это связано с совершенствованием тепловой изоляции агрегатов. Принято определять приблизительное значение потерь  $q_5$  на основании единичной тепловой мощности котла, печи и т. п.

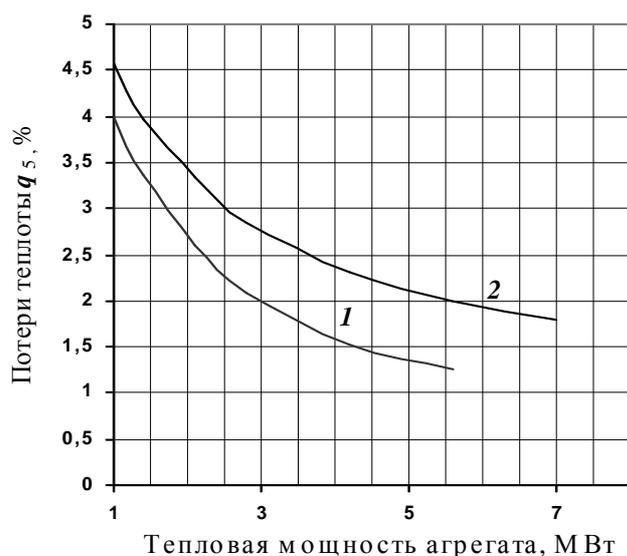


Рис. 9.1. График для ориентировочного определения потерь теплоты в окружающую среду: 1 – котел; 2 – котельный агрегат

Для этого можно использовать данные графика на рис. 9.1. На нем приведена величина потерь  $q_5$ , характерная для паровых котлов. Кривая 1 представляет потери теплоты самого котла, а кривая 2 — всего котельного агрегата, вместе с так называемыми хвостовыми поверхностями нагрева (экономайзер и воздухонагреватель).

Для других устройств можно ориентироваться на их тепловую мощность, используя данные, полученные по кривой 1. На основании данных производителя об улучшенной тепловой изоляции устройства, полученные значения  $q_5$  можно уменьшать на 10...15 %.

### 9.4.3. Коэффициент эффективности сжигания топлива

На основании полученных значений потерь теплоты  $q_2$ ,  $q_3$  и  $q_5$  по выражению (9.24) определяется коэффициент полезного действия теплового агрегата или его к. п. д., полученный на основании метода обратного теплового баланса.

Однако наименее достоверным параметром работы устройства остаются значение потерь теплоты в окружающую среду  $q_5$ , особенно для агрегатов малой единичной мощности. Для них рекомендуется использование метода прямого теплового баланса (см. п. 9.4.1), но это не всегда возможно в эксплуатации.

В то же время именно значение потерь теплоты через ограждения в наименьшей мере поддается уменьшению при эксплуатации, поскольку определяется самой конструкцией теплового агрегата. Величины потерь теплоты с отходящими газами  $q_2$  и от химнедожога  $q_3$ , наоборот, относятся к параметрам, которые могут и должны уменьшаться соответствующим уровнем эксплуатации и применением устройств и энергосберегающих технологий, повышающих эффективность всего агрегата.

Поэтому в практике сжигания топлива принято также определять качество эксплуатации агрегата по величине другого показателя, который не включает в себя потерь теплоты в окружающую среду. Это так называемый коэффициент использования топлива или к. п. д. горения:

$$\text{к.и.т.} = \eta_{\Gamma} = 100 - (q_2 + q_3) \%. \quad (9.28)$$

Формула показывает, почему параметр называется к. п. д. горения. Эксплуатируя любое устройство для сжигания топлива, следует минимизировать потери теплоты от химнедожога. В случае газового топлива обеспечивается полное сгорание, то есть  $q_3 = 0$ . Точно также должны быть максимально снижены потери теплоты с отходящими газами. Соответствующая эксплуатация агрегата должна обеспечить

минимально возможный избыток воздуха и как можно более низкую температуру отходящих газов, что обеспечивает соблюдение условия  $q_2 \Rightarrow \min$ . Поскольку, как выше сказано, трудно влиять на потери теплоты в окружающую среду, величина  $\eta_r$  позволяет судить о том, насколько сам технологический процесс сжигания топлива совершенен и насколько оптимально он организован.

### **Контрольные вопросы по разделу 9**

- 1. Какие трехатомные газы содержатся в продуктах полного сгорания газообразного топлива?*
- 2. Какое соотношение влияет на содержание трехатомных газов?*
- 3. Опишите метод определения значения  $RO_2^{\max}$  для топлива неизвестного состава по анализу состава продуктов сгорания.*
- 4. Как определяется количество оксида углерода в продуктах неполного сгорания газа по результатам анализа продуктов сгорания?*
- 5. Как определить действительный коэффициент избытка воздуха по результатам анализа продуктов сгорания?*
- 6. Какой коэффициент называют коэффициентом разбавления сухих продуктов сгорания?*
- 7. Какая связь существует между коэффициентом избытка воздуха и коэффициентом разбавления продуктов сгорания?*
- 8. Назовите методы составления теплового баланса газоиспользующего оборудования.*
- 9. Определение потерь теплоты при составлении прямого и обратного теплового баланса.*
- 10. Что такое коэффициент использования топлива?*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воликов А. Н., Шкаровский А. Л. Методы подавления выбросов оксидов азота при сжигании газа и мазута в котлах малой и средней мощности. – М.: ИРЦ Газпром, 1993. – 29 с.
2. Богомоллов А. И., Вигдорчик Д. Я., Маевский М. А. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение. – М.: Стройиздат, 1967. – 255 с.
3. ГОСТ 21204-97\*. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 35 с.
4. ГОСТ 25696—83\*. Горелки газовые инфракрасного излучения. Общие технические требования и приемка. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
5. ГОСТ17356—89. Горелки на газообразном и жидком топливах. Термины и определения. – М., 1989. – 13 с.
6. ГОСТ29134—97\*. Горелки газовые промышленные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 24 с.
7. Ионин А. А. Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1989. – 440 с.
8. Колиенко А. Г., Шкаровский А. Л. Использование природного газа для термического обезвреживания парогазовых выбросов // Серия: Природный газ и охрана окружающей среды. Вып. 2. – М.: ВНИИЭГазпром., 1989. – 48 с.
9. Комина Г. П., Шкаровский А. Л., Мариненко Е. Е. Газоснабжение. Горение газов: Учебное пособие. – Волгоград: ВолГАСУ, 2010. – 124 с.
10. Мариненко Е. Е., Ефремова Т. В. Газоснабжение: Учебное пособие. Волгоград: ВолГАСУ, 2008. – 68 с.
11. Равич М. Б. Топливо и эффективность его использования. – М.: Наука, 1971. – 358 с.
12. Скафтымов Н. А. Основы газоснабжения. – Л.: Недра, 1975. – 343 с.
13. СНиП 42-01-2002. Газораспределительные системы. – М.: Госстрой, 2002. – 80 с.

14. Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986. – 543 с.
15. Стаскевич Н. Л., Комина Г. П. Газоснабжение. Горение газов: Текст лекций. – Л.: ЛИСИ, 1973. – 56 с.
16. Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Л.: Недра, 1990. – 760 с.
17. Фоминцева Н. И. Сборник задач и упражнений по курсу «Газоснабжение». – Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2002. – 86 с.
18. Шкаровский А. Л. Охрана окружающей среды / СПбГАСУ. – СПб., 1999. – 86 с.
19. Шкаровский А. Л., Шаврин В. И. Основы современного теплоснабжения. – СПб: СПбГАСУ, 2011. – 384 с.
20. Szkarowski A. Spalanie gazów. – Kozalin: Politechnika Koszalińska, 2009. – 152 s.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Значения  $RO_2^{\max}$  в зависимости от содержания  $O_2$  и  $RO_2$  в продуктах полного сгорания

Таблица П1

RO <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %													O <sub>2</sub> , %											RO <sub>2</sub> , %	
	15	14,5	14	13,5	13	12,5	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5		3
6,0	21,0	19,5	18,1	16,8	15,8	14,8	14,0	13,2	12,6	12,0	11,5	11,0	10,5	10,1	9,7	9,3	9,0	8,7	8,4	8,1	7,9	7,7	7,4	7,2	7,0	6,0
6,2	21,6	20,1	18,7	17,4	16,3	15,3	14,5	13,7	13,0	12,4	11,8	11,3	10,8	10,3	10,0	9,6	9,3	9,0	8,7	8,4	8,2	7,9	7,6	7,4	7,2	6,2
6,4	22,4	20,7	19,3	18,0	16,8	15,8	14,9	14,1	13,4	12,8	12,2	11,7	11,2	10,7	10,3	9,9	9,6	9,3	9,0	8,7	8,4	8,2	7,9	7,7	7,5	6,4
6,6	23,0	21,4	19,8	18,5	17,4	16,3	15,4	14,6	13,9	13,2	12,6	12,1	11,5	11,1	10,6	10,2	9,9	9,6	9,3	9,0	8,7	8,5	8,2	7,9	7,7	6,6
6,8	23,8	22,0	20,5	19,1	17,9	16,8	15,9	15,1	14,2	13,6	13,0	12,4	11,9	11,4	11,0	10,6	10,2	9,9	9,6	9,2	8,9	8,8	8,4	8,2	7,9	6,8
7,0	24,4	22,7	21,0	19,7	18,4	17,3	16,4	15,6	14,7	14,0	13,4	12,7	12,2	11,7	11,3	10,9	10,5	10,2	9,9	9,5	9,2	9,0	8,7	8,4	8,1	7,0
7,2	25,2	23,4	21,6	20,2	19,0	17,8	16,8	16,0	15,1	14,4	13,8	13,2	12,6	12,1	11,6	11,2	10,8	10,4	10,1	9,8	9,5	9,2	8,9	8,7	8,4	7,2
7,4	25,8	24,0	22,2	20,8	19,5	18,3	17,3	16,4	15,5	14,8	14,2	13,5	12,9	12,4	12,0	11,5	11,1	10,7	10,4	10,1	9,7	9,5	9,2	9,0	8,7	7,4
7,6	—	24,6	22,8	21,4	20,0	18,8	17,7	16,8	15,9	15,2	14,5	13,8	13,2	12,7	12,3	11,8	11,4	11,0	10,7	10,4	10,0	9,7	9,4	9,2	8,9	7,6
7,8	—	25,2	23,4	21,9	20,5	19,3	18,3	17,3	16,4	15,6	14,9	14,2	13,6	13,0	12,6	12,1	11,7	11,3	11,0	10,7	10,2	10,0	9,7	9,4	9,1	7,8
8,0	—	26,0	24,0	22,4	21,0	19,8	18,7	17,7	16,8	16,0	15,3	14,6	14,0	13,4	12,9	12,4	12,0	11,6	11,2	10,9	10,5	10,2	9,9	9,6	9,3	8,0
8,2	—	26,6	24,7	23,0	21,6	20,3	19,2	18,1	17,2	16,4	15,7	15,0	14,4	13,7	13,2	12,7	12,3	11,9	11,5	11,2	10,7	10,4	10,1	9,8	9,5	8,2
8,4	—	—	25,3	23,6	22,1	20,8	19,7	18,5	17,6	16,8	16,0	15,3	14,7	14,1	13,5	13,0	12,6	12,2	11,8	11,4	11,0	10,7	10,4	10,1	9,8	8,4
8,6	—	—	25,9	24,1	22,6	21,3	20,1	19,0	18,0	17,2	16,4	15,7	15,0	14,4	13,8	13,3	12,9	12,5	12,1	11,7	11,3	10,9	10,6	10,3	10,0	8,6
8,8	—	—	26,4	24,7	23,1	21,8	20,6	19,5	18,5	17,6	16,8	16,0	15,3	14,7	14,2	13,7	13,2	12,7	12,3	11,9	11,5	11,2	10,8	10,5	10,2	8,8
9,0	—	—	—	25,2	23,6	22,3	21,0	19,9	18,9	18,0	17,2	16,4	15,6	15,0	14,5	14,0	13,5	13,0	12,6	12,2	11,8	11,5	11,0	10,8	10,4	9,0
9,2	—	—	—	25,8	24,2	22,8	21,5	20,4	19,4	18,4	17,6	16,8	16,0	15,3	14,8	14,3	13,8	13,3	12,8	12,4	12,0	11,7	11,2	11,0	10,7	9,2
9,4	—	—	—	26,4	24,7	23,2	22,0	20,8	19,7	18,8	18,0	17,2	16,4	15,8	15,2	14,7	14,2	13,6	13,2	12,9	12,3	12,0	11,6	11,3	11,0	9,4
9,6	—	—	—	—	25,2	23,8	22,5	21,2	20,2	19,2	18,4	17,5	16,8	16,2	15,5	15,0	14,6	13,9	13,5	13,0	12,6	12,3	11,8	11,6	11,2	9,6
9,8	—	—	—	—	25,7	24,2	23,0	21,7	20,6	19,6	18,7	18,0	17,1	16,4	15,8	15,3	14,8	14,2	13,7	13,3	12,8	12,6	12,1	11,8	11,4	9,8
10,0	—	—	—	—	26,4	24,8	23,4	22,2	21,0	20,0	19,1	18,4	17,5	16,8	16,2	15,6	15,1	14,5	14,0	13,6	13,1	12,9	12,4	12,1	11,7	10,0
10,2	—	—	—	—	—	25,3	23,9	22,6	21,4	20,4	19,5	18,8	17,9	17,1	16,5	15,9	15,4	14,8	14,3	13,9	13,4	13,1	12,6	12,3	11,9	10,2
10,4	—	—	—	—	—	25,8	24,4	23,0	21,8	20,8	19,9	19,2	18,2	17,5	16,8	16,2	15,7	15,1	14,6	14,2	13,7	13,4	12,9	12,5	12,1	10,4
10,6	—	—	—	—	—	26,3	24,8	23,4	22,2	21,2	20,3	19,4	18,5	17,8	17,1	16,5	16,0	15,4	14,9	14,4	13,9	13,6	13,1	12,7	12,4	10,6
10,8	—	—	—	—	—	—	25,2	23,8	22,6	21,6	20,6	19,7	18,8	18,1	17,4	16,8	16,3	15,6	15,1	14,6	14,2	13,8	13,3	12,9	12,6	10,8

RO <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %													O <sub>2</sub> , %											RO <sub>2</sub> , %	
	15	14,5	14	13,5	13	12,5	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5		3
11,0	—	—	—	—	—	—	25,7	24,3	23,1	22,0	21,0	20,1	19,2	18,5	17,8	17,1	16,5	15,9	15,4	14,8	14,5	14,1	13,6	13,2	12,8	11,0
11,2	—	—	—	—	—	—	26,2	24,8	23,6	22,4	21,4	20,5	19,6	18,8	18,1	17,4	16,8	16,2	15,7	15,1	14,7	14,3	13,8	13,4	13,0	11,2
11,4	—	—	—	—	—	—	—	25,2	24,0	22,8	21,8	20,9	20,0	19,1	18,4	17,7	17,1	16,5	16,0	15,4	15,0	14,6	14,1	13,7	13,3	11,4
11,6	—	—	—	—	—	—	—	25,6	24,4	23,2	22,2	21,2	20,3	19,4	18,7	18,0	17,4	16,8	16,3	15,7	15,2	14,8	14,3	13,9	13,5	11,6
11,8	—	—	—	—	—	—	—	26,1	24,8	23,6	22,6	21,6	20,6	19,7	19,0	18,3	17,7	17,1	16,6	16,0	15,5	15,1	14,6	14,2	13,8	11,8
12,0	—	—	—	—	—	—	—	—	25,2	24,0	23,0	22,0	21,0	20,1	19,4	18,7	18,0	17,4	16,9	16,3	15,7	15,3	14,8	14,4	14,0	12,0
12,2	—	—	—	—	—	—	—	—	25,6	24,4	23,4	22,3	21,3	20,4	19,7	19,0	18,3	17,7	17,2	16,6	16,0	15,6	15,1	14,6	14,2	12,2
12,4	—	—	—	—	—	—	—	—	26,0	24,8	23,7	22,7	21,6	20,7	20,0	19,3	18,6	18,0	17,5	16,8	16,2	15,8	15,3	14,8	14,4	12,4
12,6	—	—	—	—	—	—	—	—	26,4	25,2	24,1	23,0	22,0	21,1	20,4	19,6	18,9	18,3	17,8	17,1	16,5	16,1	15,6	15,1	14,7	12,6
12,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,6	24,5	23,4	22,4	21,4	20,6	19,9	19,2	18,6	18,0	17,3	16,8	16,3	15,8	15,3	14,9	12,8
13,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,0	24,9	23,8	22,7	21,8	21,0	20,2	19,5	18,9	18,2	17,5	17,0	16,5	16,0	15,5	15,1	13,0
13,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,4	25,3	24,1	23,0	22,1	21,3	20,5	19,8	19,2	18,5	17,8	17,3	16,8	16,3	15,8	15,4	13,2
13,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,6	24,5	23,3	22,4	21,6	20,8	20,1	19,4	18,7	18,1	17,5	17,1	16,6	16,1	15,6	13,4
13,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,0	24,8	23,6	22,7	22,0	21,1	20,4	19,7	19,0	18,4	17,8	17,3	16,8	16,3	15,8	13,6
13,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,4	25,2	24,0	23,0	22,3	21,4	20,7	20,0	19,3	18,7	18,1	17,5	17,0	16,5	16,0	13,8
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,8	25,6	24,4	23,4	22,6	21,8	21,0	20,3	19,6	19,0	18,4	17,8	17,3	16,8	16,3	14,0
14,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,0	24,8	23,8	23,0	22,1	21,3	20,6	19,9	19,3	18,6	18,0	17,5	17,0	16,5	14,2
14,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,3	25,2	24,1	23,3	22,4	21,6	20,8	20,2	19,5	18,8	18,3	17,8	17,3	16,8	14,4
14,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,7	25,6	24,5	23,6	22,7	21,9	21,2	20,5	19,8	19,1	18,5	18,0	17,5	17,0	14,6
14,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,0	24,8	23,9	23,0	22,2	21,5	20,8	20,0	19,4	18,8	18,2	17,7	17,2	14,8
15,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,3	25,2	24,2	23,3	22,5	21,7	21,0	20,2	19,7	19,1	18,5	18,0	17,5	15,0
15,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,8	25,5	24,5	23,6	22,8	22,0	21,3	20,5	19,9	19,3	18,7	18,2	17,7	15,2
15,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,8	24,8	23,9	23,1	22,3	21,6	20,8	20,2	19,6	19,0	18,5	18,0	15,4
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,2	25,2	24,2	23,4	22,6	21,9	21,2	20,5	19,9	19,2	18,7	18,2	15,6
15,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26,5	25,4	24,5	23,7	22,9	22,2	21,4	20,8	20,1	19,4	18,9	18,4	15,8
16,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,7	24,8	24,0	23,2	22,4	21,6	21,0	20,3	19,7	19,2	18,7	16,0

Значения коэффициента  $Z$  для природного газа

Таблица П2

Содержание $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$ в продуктах сгорания, % об.	Интервал температуры, °С							
	0...250	250...350	350...500	500...700	700...900	900...1100	1100...1300	1300...1600
11,8	4,13	4,16	4,28	4,37	4,47	4,57	4,67	4,77
11,7	4,15	4,21	4,31	4,40	4,50	4,60	4,70	4,80
11,6	4,18	4,25	4,33	4,43	4,53	4,63	4,73	4,83
11,5	4,21	4,28	4,37	4,47	4,57	4,67	4,77	4,87
11,4	4,24	4,30	4,40	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90
11,3	4,26	4,32	4,43	4,53	4,63	4,73	4,83	4,93
11,2	4,28	4,34	4,46	4,56	4,66	4,76	4,86	4,96
11,1	4,30	4,37	4,48	4,58	4,68	4,78	4,88	4,98
11,0	4,35	4,40	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00
10,9	4,40	4,43	4,53	4,63	4,73	4,83	4,93	5,03
10,8	4,43	4,47	4,57	4,67	4,77	4,87	4,97	5,07
10,7	4,45	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10
10,6	4,48	4,53	4,65	4,75	4,85	4,95	5,05	5,15
10,5	4,50	4,56	4,67	4,78	4,88	4,98	5,08	5,18
10,4	4,53	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10	5,20
10,3	4,57	4,63	4,75	4,85	4,95	5,05	5,15	5,25
10,2	4,60	4,65	4,78	4,88	4,98	5,08	5,18	5,28
10,1	4,63	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10	5,20	5,30
10,0	4,67	4,75	4,85	4,95	5,05	5,15	5,25	5,35
9,9	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10	5,20	5,30	5,40
9,8	4,75	4,83	4,93	5,03	5,13	5,23	5,33	5,43
9,7	4,80	4,87	4,97	5,07	5,17	5,27	5,37	5,47
9,6	4,84	4,90	5,00	5,10	5,20	5,30	5,40	5,50
9,5	4,88	4,95	5,05	5,15	5,25	5,35	5,45	5,55
9,4	4,93	5,00	5,10	5,20	5,30	5,40	5,50	5,60
9,3	4,97	5,05	5,15	5,25	5,35	5,45	5,55	5,65
9,2	5,02	5,07	5,20	5,30	5,40	5,50	5,60	5,70
9,1	5,07	5,10	5,25	5,35	5,50	5,60	5,70	5,80
9,0	5,10	5,15	5,30	5,40	5,55	5,65	5,75	5,85
8,9	5,13	5,22	5,33	5,45	5,60	5,70	5,80	-
8,8	5,17	5,26	5,35	5,50	5,65	5,75	5,85	-
8,7	5,22	5,30	5,40	5,55	5,70	5,80	5,90	-
8,6	5,27	5,35	5,45	5,60	5,75	5,85	5,95	-
8,5	5,30	5,40	5,50	5,65	5,80	5,90	6,00	-
8,4	5,35	5,45	5,55	5,70	5,85	5,95	6,05	-
8,3	5,40	5,50	5,60	5,75	5,90	6,00	6,10	-
8,2	5,45	5,55	5,65	5,80	5,95	6,05	6,15	-
8,1	5,50	5,60	5,70	5,85	6,00	6,10	6,20	-
8,0	5,57	5,67	5,77	5,90	6,05	6,15	6,30	-
7,9	5,62	5,72	5,85	5,95	6,10	6,20	-	-
7,8	5,68	5,80	5,90	6,00	6,15	6,25	-	-
7,7	5,75	5,85	5,97	6,08	6,25	6,35	-	-
7,6	5,80	5,90	6,05	6,15	6,32	6,42	-	-
7,5	5,85	6,00	6,10	6,25	6,40	6,50	-	-
7,4	5,90	6,05	6,20	6,30	6,45	6,60	-	-
7,3	6,00	6,10	6,25	6,35	6,50	6,65	-	-
7,2	6,05	6,15	6,50	6,40	6,55	6,70	-	-
7,1	6,10	6,25	6,40	6,50	6,65	6,80	-	-

Содержание CO <sub>2</sub> + CO + CH <sub>4</sub> в продуктах сгорания, % об.	Интервал температуры, °С							
	0...250	250...350	350...500	500...700	700...900	900...1100	1100...1300	1300...1600
7,0	6,22	6,32	6,45	6,60	6,75	6,90	-	-
6,9	6,35	6,40	6,55	6,70	6,85	-	-	-
6,8	6,45	6,50	6,65	6,75	6,90	-	-	-
6,7	6,50	6,60	6,70	6,85	7,00	-	-	-
6,6	6,55	6,65	6,80	6,95	7,10	-	-	-
6,5	6,65	6,75	6,85	7,05	7,20	-	-	-
6,4	6,70	6,85	6,95	7,15	7,30	-	-	-
6,3	6,80	6,95	7,05	7,25	7,40	-	-	-
6,2	6,95	7,05	7,15	7,35	7,50	-	-	-
6,1	7,05	7,15	7,25	7,45	7,60	-	-	-
6,0	7,15	7,25	7,35	7,55	7,70	-	-	-
5,9	7,25	7,35	7,50	7,65	7,80	-	-	-
5,8	7,40	7,45	7,60	7,75	7,90	-	-	-
5,7	7,45	7,55	7,70	7,85	8,05	-	-	-
5,6	7,55	7,65	7,80	7,95	8,15	-	-	-
5,5	7,70	7,80	7,95	8,10	8,25	-	-	-
5,4	7,85	7,95	8,05	8,25	8,40	-	-	-
5,3	7,95	8,05	8,20	8,35	8,50	-	-	-
5,2	8,05	8,20	8,35	8,50	8,65	-	-	-
5,1	8,20	8,35	8,50	8,65	8,80	-	-	-
5,0	8,35	8,50	8,65	8,80	9,00	-	-	-
4,8	8,65	8,75	8,95	9,15	-	-	-	-
4,6	9,00	9,10	9,25	9,50	-	-	-	-
4,4	9,35	9,50	9,65	9,90	-	-	-	-
4,2	9,75	9,90	10,05	10,30	-	-	-	-
4,0	10,20	10,3	10,5	10,7	-	-	-	-
3,8	10,7	10,8	11,0	11,2	-	-	-	-
3,6	11,2	11,4	11,6	11,8	-	-	-	-
3,4	11,8	12,0	12,2	-	-	-	-	-
3,2	12,5	12,7	12,9	-	-	-	-	-
3,0	13,2	13,4	13,6	-	-	-	-	-
2,8	14,1	14,3	14,5	-	-	-	-	-
2,6	15,2	15,4	15,6	-	-	-	-	-
2,4	16,4	16,6	-	-	-	-	-	-
2,2	16,8	18,0	-	-	-	-	-	-
2,0	19,5	19,7	-	-	-	-	-	-
1,8	21,4	21,7	-	-	-	-	-	-
1,6	24,0	-	-	-	-	-	-	-
1,4	27,3	-	-	-	-	-	-	-
1,2	31,7	-	-	-	-	-	-	-
1,0	37,9	-	-	-	-	-	-	-

Пр и м е ч а н и е. Использование продуктов сгорания с пониженным содержанием CO<sub>2</sub> характерно для сушильных установок, где теплоносителем являются продукты сгорания, разбавленные воздухом