

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

А. Н. СТАРИКОВ

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Учебное пособие



Владимир 2019

УДК 662.1/.6  
ББК 24.54  
С77

Рецензенты:

Доктор химических наук, доцент  
профессор кафедры химии  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*Н. Н. Смирнова*

Кандидат технических наук  
генеральный директор ООО «Рарок»  
*А. В. Власов*

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Стариков, А. Н.** Основы теории горения и взрыва : учеб.  
С77 пособие / А. Н. Стариков ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г.  
Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 148 с. – ISBN  
978-5-9984-1046-8.

Рассмотрены вопросы теории горения, баланс химических реакций, характеристики горения и его устойчивости, конструктивные элементы газоиспользующих устройств, вопросы эффективности использования топлива. Приведены примеры отдельных расчетов.

Предназначено для студентов вузов очной и заочной форм обучения направления подготовки 08.03.01 – Строительство (профиль «Теплогасоснабжение»).

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 19. Ил. 36. Библиогр.: 20 назв.

УДК 662.1/.6  
ББК 24.54

ISBN 978-5-9984-1046-8

© ВлГУ, 2019

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие систем генерации топлива – важная задача современного общества. Один из её элементов – проектирование систем газоснабжения и установок для сжигания газа. Принятые проектировщиком решения могут отразиться не только на здоровье, но и на жизни потребителей газа. Именно на этапе расчета или подбора оборудования и устройств, в которых газ непосредственно используется (горелок, котлов, печей и т. п.), решаются вопросы эффективности его сжигания, безопасности для человека и окружающей среды. 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.

В *первой* главе пособия рассматривается газообразное топливо, приводятся его классификация, состав горючих газов, их свойства и способы получения.

*Вторая* глава посвящена теории горения: в ней описываются тепловой и температурный эффекты горения, кинематика процесса горения, его цепной механизм. Анализ ведётся с позиций стехиометрических уравнений.

В *третьей* главе описывается материальный баланс реакции горения; даётся представление о коэффициенте смещения смеси топливо – окислитель для идеального горения; рассматриваются продукты сгорания, состояние и результаты горения при переизбытке и недостатке воздуха (окислителя), бедные и богатые смеси.

В *четвёртой* главе описываются качественные характеристики процесса горения, такие как жаропроизводительность, температура воспламенения, калориметрическая температура, пределы воспламенения.

В *пятой* главе процесс горения рассматривается как динамическая система; определяются понятия горения в ламинарном и турбулентном потоках, нормального и детонационного горения, горения в неподвижной среде.

*Шестая* глава посвящена вопросам стабильности пламени, явлениям отрыва, проскока пламени; в ней даны примеры и рекомендации по стабилизации процесса горения и достижению его устойчивости.

*В седьмой* главе рассматриваются конструктивные элементы теплогенерирующих установок, в частности газовых горелок, принципы безопасного и эффективного горения, конструкции и классификации горелок.

*Восьмая* глава посвящена вопросам охраны окружающей среды. В ней описываются канцерогенные вещества, их влияние на атмосферу, оксиды азота (топливные, термические, фронтальные); даются рекомендации по снижению вредного воздействия и указываются перспективы проектирования энергоэффективных и экологически безопасных систем сжигания топлива.

Глава *девятая* знакомит с возможностями экономического анализа эффективности использования топлива; в ней определяются продукты полного и неполного сгорания, указывается их взаимосвязь с коэффициентом избытка воздуха. Приводятся расчеты с учетом влажности продуктов сгорания. Рассматриваются методы практического составления прямого и обратного теплового баланса, методы определения КПД процесса сжигания топлива.

При работе над пособием автор опирался на труды классиков, в частности А. Л. Шкаровского. Строгость, выдержанность методического стиля, глубина, достаточная лаконичность и сбалансированность теоретических и практических моментов в его работах заслуживают уважения.

## Глава 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 – балласт газового топлива, ухудшающий 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 – основной горючий компонент 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 скоплении 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, малотоксичен, 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 – высокотоксичных компонентов 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, образуют 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*, накапливаясь 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 применяют газы, различающиеся по происхождению, химическому составу и физическим свойствам. По происхождению горючие газы разделяют на естественные (природные) и искусственные, вырабатываемые из твердого и жидкого топлива. *Природные газы* добывают 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 %), в небольшом количестве содержат тяжелые углеводороды и негорючие примеси. Они характеризуются относительным постоянством состава и теплотой сгорания.

Газы газоконденсатных месторождений представляют собой смеси различных 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 газ обрабатывается и перерабатывается (выделение тяжелых фракций) на промысле; применяются дорогостоящие аппаратура и трубопроводы из-за высокого давления, необходимого для вытеснения газа и транспортировки. В газах газонефтяных место-

рождений 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. Характерное свойство углеводородных газов и их смесей – 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.

Основной источник получения сжиженных газов – попутные нефтяные газы, которые подвергаются переработке с целью получения из них бензина и сжиженных газов. Последние также получают на заводах 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 эксплуатационные работы 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 путем нагрева-

ния твердого или жидкого топлива без доступа воздуха. Этот способ основан на пирогенетическом разложении топлива под воздействием температуры. К искусственным горючим газам относятся газы коксохимических, коксогазовых, газосланцевых, сланце- и нефтеперерабатывающих заводов. Горючую часть этих газов составляет водород (40...60 %).

### ***Контрольные вопросы***

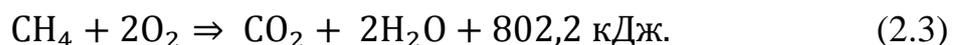
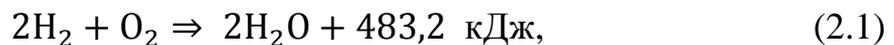
1. Назовите основные горючие компоненты газообразного топлива.
2. Какие балластные и вредные примеси входят в состав природных газов?
3. По каким основным признакам классифицируют горючие газы, используемые в системах газораспределения и газопотребления населенных пунктов?
4. Назовите виды природных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

## Глава 2. РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ

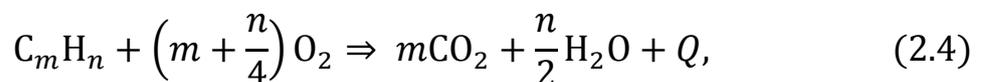
### 2.1. Стехиометрические уравнения

*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, т. е. 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 таблице.

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

Газ	Стехиометрическое уравнение горения	Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	
		$Q_B$	$Q_H$
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:

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

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 непрерывно поступают топливо и окислитель. 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, что приводит 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 це-

пи 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 ввиду очень высокой энергии диссоциации молекулярного кислорода. Схема дальнейшего развития цепной реакции приведена на рис. 2.1.

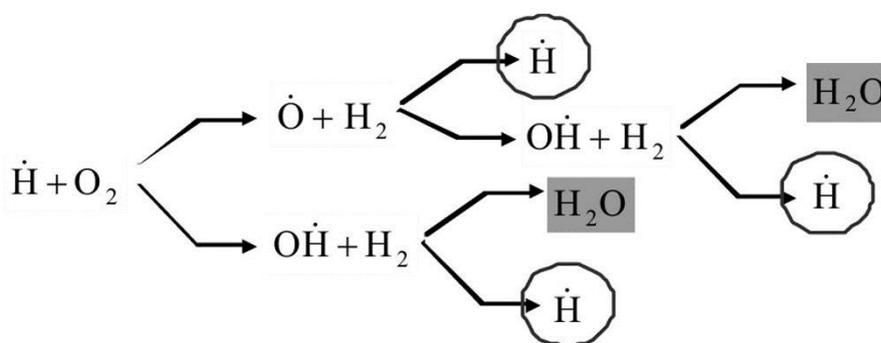
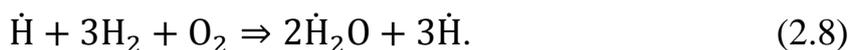


Рис. 2.1. Единичный цикл цепного механизма взаимодействия водорода с кислородом

Итог такого единичного цикла – следующая 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 так же вероятно неблагоприятное столкновение двух радикалов, приводящее к образованию стабильной молекулы водорода:



Свойство любого газообразного топлива состоит в том, 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. Как и в случае горения водорода, зарождение цепи начинается от столкновения образовавшегося при диссоциации атома водорода со стабильной молекулой кислорода:



Образовались сразу два радикала, которые легко реагируют как с молекулами оксида углерода согласно схеме, показанной на рис. 2.2, так и с молекулами водорода (см. рис. 2.1).

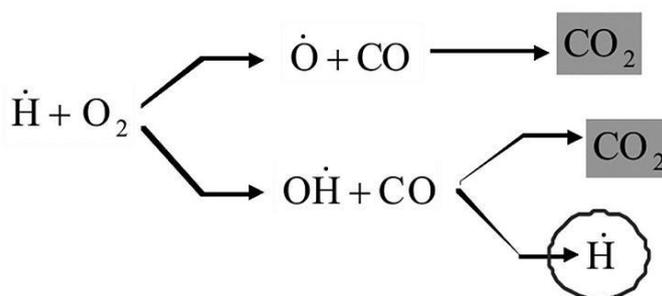
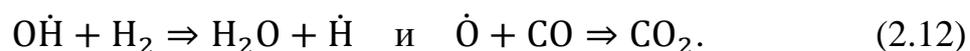
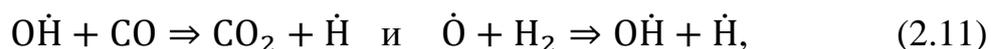


Рис. 2.2. Возможный единичный цикл цепного механизма реакции оксида углерода с кислородом

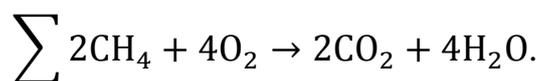
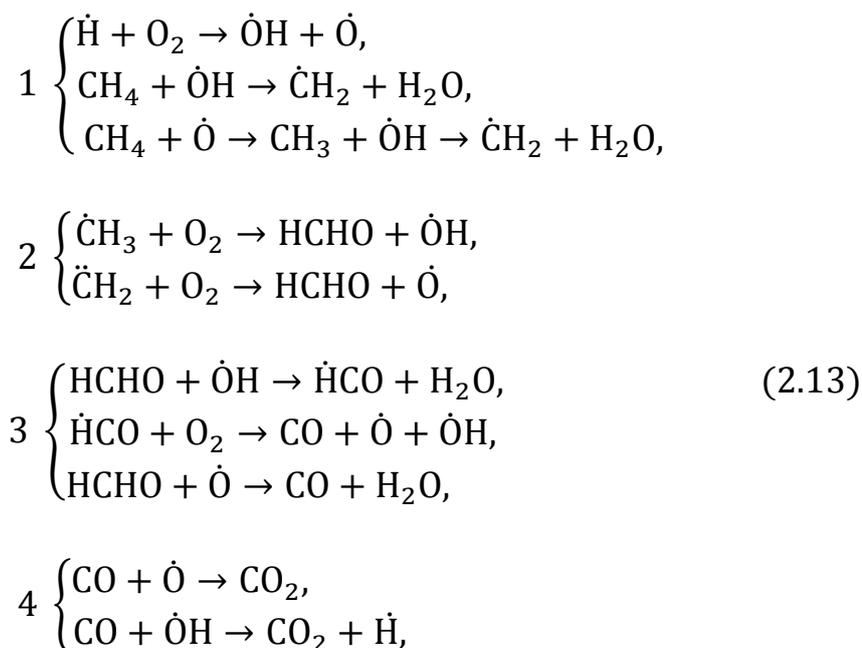
Возможны и другие варианты развития цепи, которые в итоге приводят к образованию стабильной молекулы диоксида углерода:



Механизм высокотемпературного окисления углеводородов имеет еще более сложный цепной характер и связан с промежуточным образованием атомарного водорода, кислорода и различных ра-

дикалов. 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  $\ddot{\text{C}}\text{H}$  и  $\text{C}_2$ , что делает дальнейшее протекание цепных реакций еще более разнообразным.

## 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). Та-

кой единицей может быть 1 моль (молярная теплота сгорания  $Q_\mu$ , МДж/моль), 1 кг (массовая теплота сгорания  $Q$ , МДж/кг), 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; 101 325 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:

$$\begin{cases} Q_\mu = Q \cdot \mu = Q' \cdot V_\mu, \\ Q' = \frac{Q_\mu}{V_\mu} = Q \cdot \rho, \end{cases} \quad (2.14)$$

где  $\mu$  – масса моля газа, кг/моль;  $V_\mu$  – 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;  $\rho$  – плотность газа при нормальных физических условиях, кг/м<sup>3</sup>.

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 образования (конденсации) водяных паров, возникших 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 таблице на с. 11. 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 аддитивности (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 для нормальных физических условий на таковую для действительных условий. Для определения значения теплоты сгорания влажного газа  $Q_{н(T, p)}^B$ , МДж/м<sup>3</sup>, при абсолютном давлении  $p$ , Па, и температуре  $T$ , К, используется выражение

$$Q_{н(T, p)}^B = Q_n \frac{273,15p}{101\,325T} \left[ 1 + \frac{\varphi p_{H_2O}}{p} \left( 1 + \frac{3,475}{Q_n} \right) \right], \quad (2.16)$$

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

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

**Пример.** Объемный состав природного газа, %:  $CH_4=97$ ;  $C_2H_6=2$ ;  $C_3H_8=0,3$ ;  $C_4H_{10}=0,2$ ;  $N_2=0,3$ ;  $CO_2=0,2$ . Определите низшую теплоту сгорания.

Решение. Используя выражение (2.15) и данные таблицы на с. 11 для отдельных компонентов, получим  $Q_H$ , МДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_H = 35,83 \cdot 0,97 + 63,77 \cdot 0,02 + 91,27 \cdot 0,003 + 118,68 \cdot 0,002 = 36,54.$$

### ***Контрольные вопросы***

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?

## Глава 3. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ

### 3.1. Теоретический объем воздуха для горения

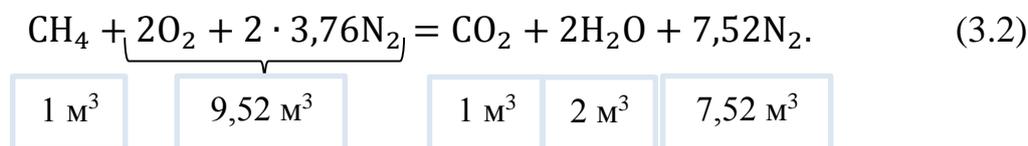
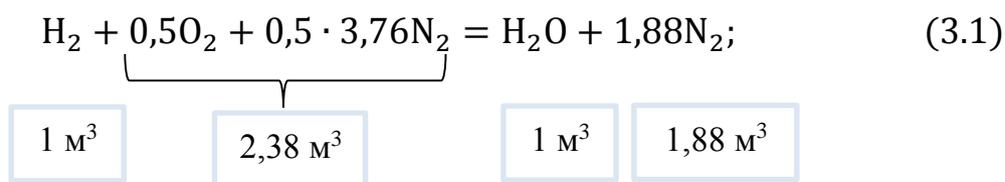
Стехиометрические уравнения учитывают теоретическое взаимодействие горючих компонентов непосредственно с кислородом. В реальных условиях кислород в зону реакции подается с воздухом как его составная часть. Если пренебречь незначительным содержанием диоксида углерода и инертных газов в составе сухого воздуха, то можно считать, что воздух представляет собой смесь кислорода и азота в соотношении, указанном 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  $100 : 21 = 4,76$  м<sup>3</sup> воздуха, поскольку каждому 1 м<sup>3</sup> кислорода сопутствует  $79 : 21 = 3,76$  м<sup>3</sup> азота, не принимающего участия в горении. Поскольку 1 моль любого газа (если считать его идеальным) 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 следующем 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  $V_{\text{в}}^{\text{т.с}}$ , 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):

$$V_{\text{в}}^{\text{т.с}} = \frac{4,76}{100} (0,5\text{H}_2 + 0,5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 4,5\text{C}_3\text{H}_6 + 6\text{C}_4\text{H}_8 - \text{O}_2), \quad (3.4)$$

где  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_4\text{H}_8$  – содержание в газе горючих компонентов, % об.;  $\text{O}_2$  – 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>	Воздух	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
Оксид 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
Пропилен	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 газов. Согласно ГОСТ 5542-87 «Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения», 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 м<sup>3</sup>. Таким образом, если абсолютная влажность воздуха равна  $d_B$ , кг/м<sup>3</sup>, то требуемый объем влажного воздуха для горения  $V_B^{т.вл}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, можно определить по выражению

$$V_B^{т.вл} = V_B^{т.с} + 1,24d_B V_B^{т.с} = (1 + 1,24d_B)V_B^{т.с}. \quad (3.5)$$

Если состав топлива неизвестен, однако известна его низшая теплота сгорания  $Q_H$ , МДж/м<sup>3</sup>, то теоретический объем воздуха для горения можно ориентировочно определить по выражению

$$V_B^{т.с} = 0,27Q_H \quad (3.6)$$

### 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  $V_B^{вл}$ , доставляемого в зону горения, должно быть несколько больше, чем теоретическое:

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

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.

Таким образом, залог совершенного сжигания топлива в большинстве технологических процессов – условие  $\alpha > 1$ , поскольку в противном случае неизбежен химический недожог. Вместе с тем избыток воздуха снижает эффективность использования топлива, поскольку увеличивает потери теплоты с отходящими газами (см. п. 9.2), 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 технологическая задача состоит в создании в рабочих камерах теплотехнических устройств нейтральной или слабоокислительной среды. Таковы металлургические процессы и высокотемпературная обработка металлов.

Парадоксален тот 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.** Определите теоретический и действительный объем воздуха для сжигания природного газа, имеющего состав, приведенный в примере на с. 17. Температура воздуха 20 °С, а относительная влажность  $\varphi = 60 \%$ . Используемая горелка работает с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ .

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

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

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

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

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

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

5. С целью сравнения методов расчета определим объем воздуха для горения по приближенному выражению (3.6), учитывая, что теплота сгорания топлива, определенная в примере на с. 17, составляет  $Q_H = 36,54 \text{ МДж}/\text{м}^3$ :

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

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. 3.2. 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 объемное содержание соответствующих компонентов горючего газа, %.

*Диоксид углерода:*

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

*Водяной пар:*

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

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

*Азот:*

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

*Кислород:*

$$V_{O_2} = 0,01O_2 + 0,21(\alpha - 1)V_B^{T.c}. \quad (3.11)$$

Суммарный объем влажных продуктов сгорания,  $m^3/m^3$  газа,

$$V_{п.с}^{вл} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (3.12)$$

Суммарный объем сухих продуктов сгорания,  $m^3/m^3$  газа, после конденсации водяных паров, являющихся продуктом горения,

$$V_{п.с}^c = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (3.13)$$

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

$$V_{п.с}^{T.c} = V_{CO_2} + V_{N_2}^{\alpha=1} + V_{O_2}^{\alpha=1}. \quad (3.14)$$

**Пример 3.2.** Определите объем сухих и влажных продуктов сгорания природного газа. Состав газа и условия сжигания приведены в примере на с. 17 и примере 3.1.

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

$$V_{CO_2} = 0,01(0,2 + 97 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2) = 1,03 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

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

$$V_{H_2O} = 0,01(2 \cdot 97 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,2) + \\ + 1,24 \cdot 1,1 \cdot 0,01 \cdot 9,77 = 2,15 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

3. Объем азота определяем по формуле (3.10):

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot 0,3 + 0,79 \cdot 1,1 \cdot 9,7 = 8,43 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

4. Объем кислорода определяем по формуле (3.11):

$$V_{O_2} = 0,21(1,1 - 1)9,7 = 0,20 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

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

$$V_{п.с}^c = 1,03 + 8,43 + 0,20 = 9,66 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

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

$$V_{п.с}^{вл} = 1,03 + 2,15 + 8,43 + 0,20 = 11,81 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа.}$$

### ***Контрольные вопросы***

1. По какому принципу составляется материальный баланс реакций горения?
2. Приведите алгоритм определения теоретически необходимого объема сухого воздуха для горения топлива. То же – для действительного объема сухого воздуха. То же – для 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?

## Глава 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 при сжигании газообразных топлив.

#### 4.1.1. Жаропроизводительность

Жаропроизводительность, или 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 температуре топлива и воздуха перед горением, равной 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 – чисто теоретическое понятие, определяется аналитически на основании расчета объемов продуктов сгорания при помощи выражений (3.8)...(3.10). При этом необходимо использовать метод последовательных приближений, поскольку определяемая температура влияет на среднюю теплоемкость.

Взаимосвязь значений температуры сгорания, объемов продуктов сгорания, их теплоемкостей и выделяемой теплоты (при сгорании) определяется зависимостью (4.1). При этом имеется в виду такая их комбинация, при которой наблюдается пиковое значение температуры  $t_{\max}$ . Ее можно найти или путем аналитических расчетов, если для этого имеются исходные данные, или эмпирически. Второй способ зачастую более прост и точен.

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

Таблица 4.1

Жаропродуктивность простых и сложных газов  
в сухом воздухе

Газ	Жаропродуктивность $t_{\max}, ^\circ\text{C}$	Газообразное топливо среднего состава	Жаропродуктивность $t_{\max}, ^\circ\text{C}$
Водород	2235	Природный газ газовых месторождений	2040
Оксид углерода	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 % $\text{C}_3\text{H}_8$ и 50 % $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )	2115
Бутилен	2203	Водяной газ	2210
Пентилен	2189	Доменный газ из кокса	1470
Ацетилен	2620		

#### 4.1.2. Калориметрическая температура

Калориметрическая температура отличается от жаропродуктивности тем, что учитывает действительные температуры топлива и воздуха, их влажность, а также значение коэффициента избытка воздуха. С этой целью в составе продуктов сгорания рассматривают 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, т. е. 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  $V_B^{\text{вл}}$  и в соответствии с выражением

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

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

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

$$t_k = \frac{Q_H \cdot 10^3 + V_B^{\text{вл}} c'_{p_B} t_B + V_G c'_{p_G} t_G}{V_{\text{CO}_2} c'_{p_{\text{CO}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}} c'_{p_{\text{H}_2\text{O}}} + V_{\text{N}_2} c'_{p_{\text{N}_2}} + V_{\text{O}_2} c'_{p_{\text{O}_2}}}. \quad (4.4)$$

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), т. е. 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 калориметрическую температуру 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 всех составов сжиженных углеводородных газов.

Таблица 4.2

Калориметрическая и теоретическая температуры горения природного газа в воздухе температурой  $0\text{ }^\circ\text{C}$  и влажностью  $1\text{ \%}$  мас. в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура $t_{\text{к}},\text{ }^\circ\text{C}$	Теоретическая температура $t_{\text{т}},\text{ }^\circ\text{C}$	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура $t_{\text{к}},\text{ }^\circ\text{C}$
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

*Примечание.* Для сухого воздуха приведенные значения следует увеличить на  $25\text{...}30\text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблица 4.3

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

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметри- ческая температура $t_{\text{к}}, \text{°C}$	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметри- ческая температура $t_{\text{к}}, \text{°C}$
1,00	2110	1,45	1580
1,02	2080	1,48	1560
1,03	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

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

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.

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 КПД печей, котлов и других газоиспользующих установок применяется предварительный подогрев воздуха, что приводит к соответствующему росту калориметрической температуры горения.

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

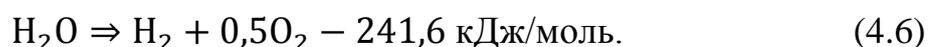
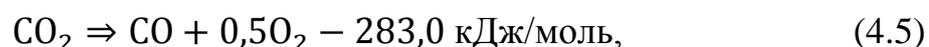
Таблица 4.4

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

### 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 со следующими выражениями:



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

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

$$t_{\text{Г}} = \frac{Q_{\text{н}} + Q_{\text{физ}} - Q_{\text{дис}}}{\sum V_i c'_{pi}}, \quad (4.7)$$

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 теоретическая температура горения обычно определяется при помощи упрощенной методики. В ее основе положение о том, что значения 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 положения теоретическую температуру горения можно определить, модифицируя формулу (4.7):

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

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

Степень диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  растет с увеличением температуры и уменьшением их парциального давления в составе продуктов сгорания. Значения степени диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  при атмосферном давлении приведены в табл. 4.5 и 4.6. Из них следует, что при температурах до  $1500^\circ\text{C}$  степень диссоциации ничтожна и может не учитываться, т. е. теоретическая температура принимается равной калориметрической.

Таблица 4.5

Степень диссоциации диоксида углерода  $b$ , %

$t, ^\circ\text{C}$	$b$ при парциальном давлении $\text{CO}_2$ , 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	72,6	70,2	68,9	67,8	66,7	64,9	63,4	62,0	60,8	59,7	57,3	55,5
2700	84,4	82,5	81,0	79,8	78,6	77,6	76,6	75,5	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  $a$ , %

$t, ^\circ\text{C}$	$a$ при парциальном давлении $\text{H}_2\text{O}$ , 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	1,45	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 изменение значения  $t_T$  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, обратимы.

При последующем достаточно медленном охлаждении продукты диссоциации ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  и  $OH$ ) снова вступают 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: от интенсивности теплоотдачи факела излучения, от потерь теплоты в окружающую среду, а также от организации процессов смешения топлива с воздухом, определяющих растянутость процесса горения. Из этого следует, что точное определение действительной температуры горения возможно только при тепловом расчете 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 температурам горения (в зависимости от температурного уровня топочного процесса), используя выражение

$$t_d = \eta_{\Pi} t_K, \quad (4.9)$$

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

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

К последнему типу агрегатов относят 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 то же время нюансы, отличающие эти два понятия в теории горения, для технических специалистов могут выглядеть несколько расплывчатыми, что приводит к смешению и неправильному применению понятий. Уделим данному вопросу 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 топливо 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.

Второй важный момент – четкое различие энергии, необходимой для предварительного испарения горючего вещества, и энергии активации самой реакции горения, приводящей к инициированию цепного механизма образования необходимого количества радикалов.

*Температура воспламенения* – это минимальная температура вещества, при которой оно выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблю-

дается 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 горючему веществу сообщают 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 к 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 сжигания газообразного топлива понятия температур воспламенения и самовоспламенения практически совпадают. Этот вид топлива уже находится в газообразном состоянии (что соответствует температуре воспламенения), и любое иницирующее воздействие (искра, раскаленное тело, открытое пламя) сразу вызывает воспламенение. Таким образом, понятие «температура воспламенения» более точное.

Температура самовоспламенения – прежде всего характеристика самого газа. Но в то же время ее значение 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.

Таким образом, температура самовоспламенения определяется 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.

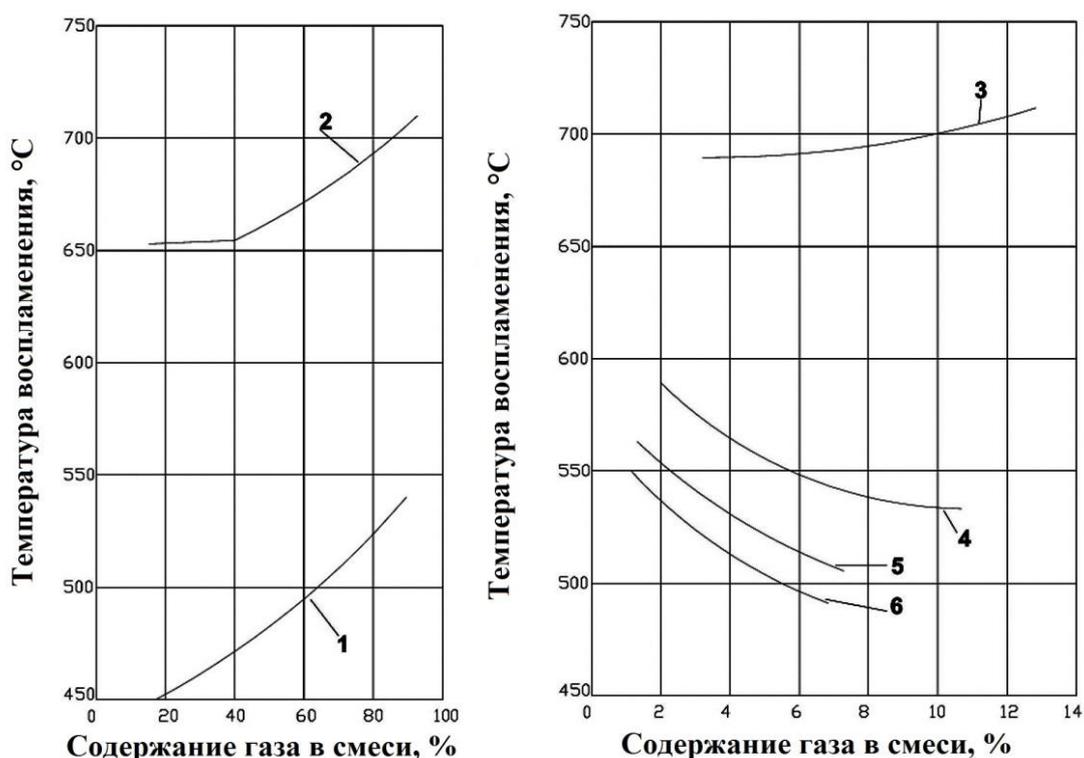


Рис. 4.1. Зависимость температуры самовоспламенения от содержания газа в газовой смеси: 1 – водород; 2 – оксид углерода; 3 – метан; 4 – этан; 5 – пропан; 6 – *n*-бутан

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 тем-

пературой воспламенения снижает температуру самовоспламенения всей газовой смеси.

На практике для 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 подогревается 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 осуществляется запальником (электроразрядник, раскаленная спираль, специальная небольшая горелка), находящимся поблизости от места вылета газа или газозооушной смеси (в зависимости от конструкции горелки) в топочное устройство или в открытое пространство (как в случае бытовых газовых плит). После воспламенения запальник удаляется или выключается, а устойчивое горение поддерживается за счет очень сложного процесса, который определяется терминами распространения и стабилизации пламени (см. гл. 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. Рисунок 4.2 схематически иллюстрирует поведение газозвушных смесей при их зажигании раскаленной электрической спиралью в зависимости от содержания газа в смеси.

Если содержание газа в газозвушной 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 гл. 1, следует, что в этом случае количество неблагоприятных столкновений «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 в месте выхода из него, причем даже после удаления источника зажигания (рис. 4.2, б). Отметим, что внутри сосуда происходит очень быстрое распространение пламени в смеси, т. е. взрыв. В этом случае в газозвушной смеси наблюдается наиболее выгодное для развития цепи реакции соотношение молекул горючего и окислителя.

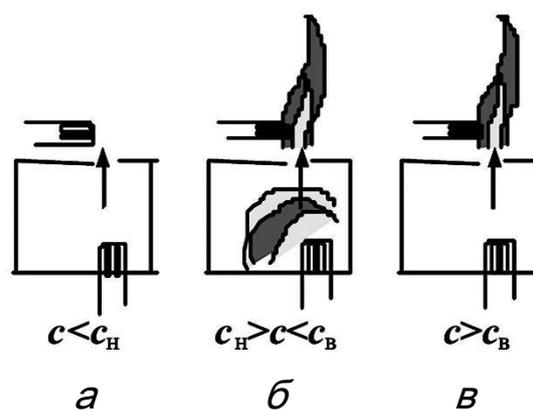


Рис. 4.2. К понятию пределов воспламенения

При концентрации горючего газа выше  $c_v$  (рис. 4.2, в) в смеси не хватает молекул кислорода (слишком богатая смесь). Самопроизвольное (после зажигания спиралью) горение будет в месте истечения смеси благодаря ее разбавлению воздухом из окружающей среды. В объеме смеси окисление будет происходить только на поверхности спирали во время ее раскаливания.

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

Замена воздуха чистым кислородом практически не влияет на нижнюю границу распространения пламени, тогда как верхняя граница значительно возрастает (табл. 4.8).

Таблица 4.7

Концентрационные пределы воспламенения газов и паров в смеси с воздухом при температуре 20 °С и под давлением 101 325 Па

Газ	Содержание газа в газозоудушной 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
Оксид углерода	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

Таблица 4.8

Концентрационные пределы воспламенения газов в смеси  
с кислородом ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $p = 101\,325 \text{ Па}$ )

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
Оксид углерода	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

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 неблагоприятны и ничего не меняют. В богатой 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.

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.

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

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

где  $r_i$  – содержание отдельных компонентов в составе сложного газообразного топлива, % об., причем  $\sum_{i=1}^n r_i = 100$  %;  $L_i$  – верхний или нижний предел воспламенения отдельных компонентов, % об., в газовой или газокислородной смеси согласно данным табл. 4.7 и 4.8.

Для газообразных топлив, содержащих небольшое количество негорючих примесей, значения пределов воспламеняемости  $L^b$ , % об., можно ориентировочно определить по выражению

$$L^b = L \frac{\left(100 + \frac{C_b}{100 - C_b}\right)}{100 + \frac{L C_b}{100 - C_b}}, \quad (4.11)$$

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

Другая часто встречаемая задача в практике сжигания топлива – 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

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

где  $V_B^{\text{т.с}}$  – теоретическая потребность в воздухе,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  газа, определенная по формуле (3.4).

Значение 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 максимального давления 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, можно определить по следующим приближенным выражениям:

- при стехиометрическом соотношении простого газа с сухим воздухом

$$p_{вз} = p(1 + \beta t_k) \frac{m}{n}; \quad (4.13)$$

- при любом соотношении сложного газообразного топлива с влажным воздухом

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

где  $p$  – давление в сосуде (топке, печи и т. п.) перед взрывом, бар абс.;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения газов, принимаемый равным  $\frac{1}{273}$ ;  $t_k$  – калориметрическая температура горения, °С;  $m$  – число молекул продуктов взрыва, определяемое по реакции сгорания газа в воздухе;  $n$  – число молекул исходных продуктов перед взрывом;  $V_{п.с}^{вл}$  – объем влажных продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, определяемый по формуле (3.12);  $V_B^{вл}$  – действительная потребность во влажном воздухе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, при фактическом значении коэффициента избытка воздуха в соответствии с выражениями (3.5), (3.6).

**Пример 4.1.** Определите нижний и верхний пределы воспламенения в воздухе для природного газа следующего объемного состава:

$CH_4 = 93 \%$ ;  $C_2H_6 = 3,1 \%$ ;  $C_3H_8 = 0,7 \%$ ;  $C_4H_{10} = 0,6 \%$ ;  $CO_2 + N_2 = 2,6 \%$ .

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

$$CH_4 = \frac{93}{97,4} 100 = 95,48; \quad C_2H_6 = \frac{3,1}{97,4} 100 = 3,18;$$

$$C_3H_8 = \frac{0,7}{97,4} 100 = 0,72; \quad C_4H_{10} = \frac{0,6}{97,4} 100 = 0,62.$$

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

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

3. Аналогично определяем верхний предел воспламенения 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 найти нижний предел воспламенения с учетом балластных примесей, используя выражение (4.11):

$$L_H^b = 4,8 \frac{100 + \frac{100 \cdot 2,6}{100 - 2,6}}{100 + 4,8 \frac{2,6}{100 - 2,6}} = 4,9 \text{ \% об.}$$

5. Верхний предел воспламенения с учетом забалластированности газа по выражению (4.11) составит

$$L_B^b = 14,7 \frac{100 + \frac{100 \cdot 2,6}{100 - 2,6}}{100 + 14,7 \frac{2,6}{100 - 2,6}} = 15 \text{ \% об.}$$

**Пример 4.2.** Определите коэффициент избытка воздуха, соответствующий нижнему и верхнему пределам воспламенения в сухом воздухе, для природного газа того же состава.

Решение. 1. Теоретическую потребность в сухом воздухе определяем по выражению (3.4):

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

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

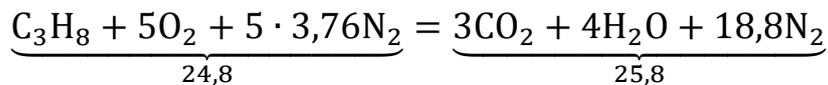
$$\alpha_n = \left( \frac{100}{4,9} - 1 \right) \frac{1}{9,7} = 1,99.$$

3. По выражению (4.12), с использованием результатов примера 4.1 определяем значение  $\alpha$  на верхнем пределе воспламенения:

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

**Пример 4.3.** Определите 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 калориметрической температуре горения 2110 °С (по табл. 4.3) определяем по выражению (4.13):

$$p_{вз} = 1,0 \left( 1 + \frac{2110}{273} \right) \frac{25,8}{24,8} = 9,08 \text{ бар абс.}$$

### ***Контрольные вопросы***

1. Приведите определения жаропроизводительности, калориметрической 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 ее зажигании 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?

## Глава 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 значение 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 увеличение диаметра трубки сопровождается интенсификацией конвективных потоков и способствует 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 соотношение его периметра и площади поперечного сечения, что означает рост соотношения поверхности пламени, контактирующей с холодной стенкой, и объема пламенной зоны, являющейся источником энергии. Увеличение теплоотвода от зоны горения и рост количества неблагоприятных столкновений радикалов со стенкой канала (см. п. 2.3) приводят к невозможности дальнейшего развития цепной реакции горения.

Размер трубок, каналов, отверстий, щелей, при котором не происходит распространения пламени, называется *критическим*. Он 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 метановоздушной смеси при максимальной скорости распространения пламени равна 1,17 мм.

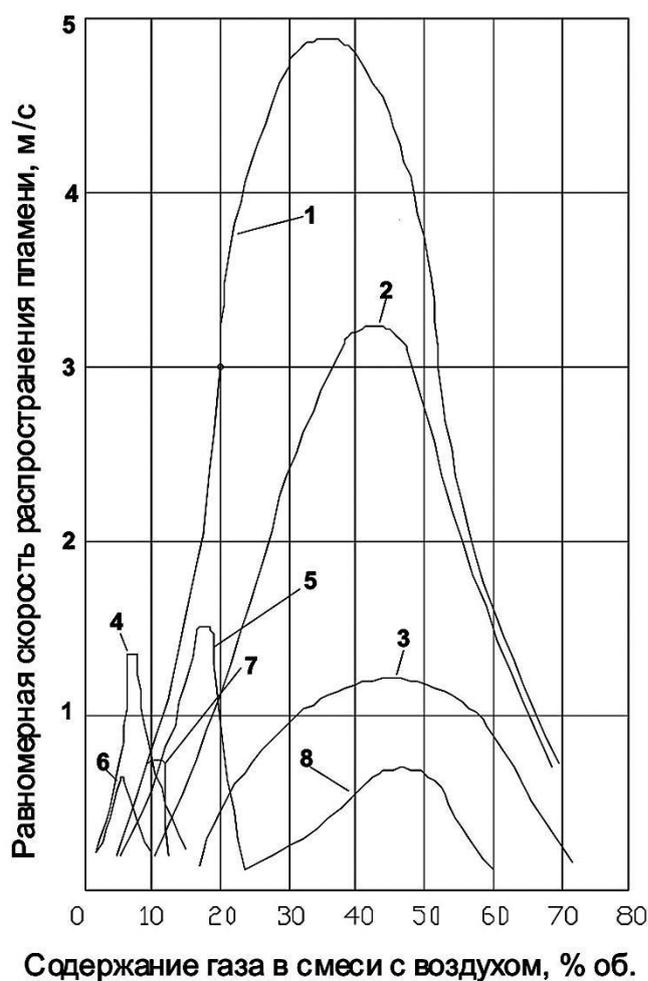


Рис. 5.1. Равномерная скорость распространения пламени: 1 – водород; 2 – водяной газ; 3 – оксид углерода; 4 – этилен; 5 – коксовый газ; 6 – этан; 7 – метан; 8 – генераторный газ

Явление погасания пламени в каналах критического размера широко используется в технике. При сжигании газов в различных конструкциях газовых горелок применение каналов критического сечения – гарантия защиты 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.

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 (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.), 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.

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

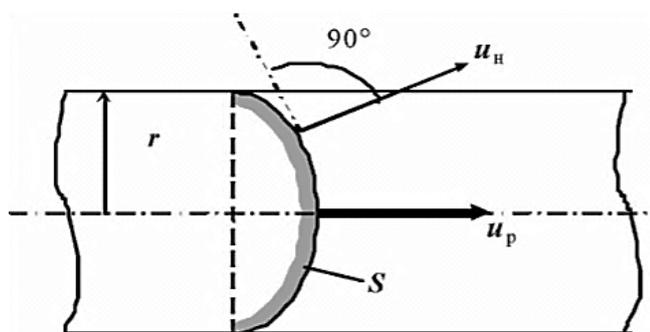


Рис. 5.2. К понятию нормальной скорости распространения пламени

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

где  $S$  – фактическая площадь поверхности искривленного фронта пламени,  $m^2$ , определяемая методом фотографирования и последующими геометрическими расчетами.

Поскольку поверхность искривленного фронта пламени всегда больше геометрической поверхности поперечного сечения канала,

нормальная скорость всегда меньше, чем равномерная скорость распространения пламени. Например, для метана в трубке диаметром 5 см равномерная скорость распространения пламени может в 3...6 раз превышать нормальную скорость. Нормальная скорость – прежде всего характеристика горючего газа. Значения нормальной скорости распространения пламени для чистых газов в смеси с воздухом, содержание газа, соответствующее максимальной скорости, и аналогичные характеристики для стехиометрического состава смеси приведены в таблице.

Значения максимальной нормальной скорости распространения пламени в газоздушных смесях при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $p = 101\,325\text{ Па}$

Газ	Содержание газа в газоздушной 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 смеси – 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  $u_{\text{H}}^{\text{max}}$ , м/с, для газа, состоящего из нескольких компонентов:

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

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

где  $r_i$  – содержание отдельных компонентов, % об., в составе газообразного топлива, при этом  $\sum_{i=1}^n r_i = 100$  %;  $C_i^{\text{max}}$  – содержание отдельных компонентов в сложном газе, % об., соответствующее максимальному значению нормальной скорости распространения пламени (по таблице на с. 50);  $u_{\text{H}i}$  – максимальное значение нормальной скорости распространения пламени, м/с, для отдельных горючих компонентов сложного газа в смеси с воздухом (по таблице на с. 50).

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. Не пригодны они также для газов, содержащих значительные количества балластных примесей (азот и двуокись углерода), которые снижают скорость распространения пламени. Для забалластированных газов при известном содержании  $N_2$  и  $CO_2$ , % об., нормальную скорость распространения пламени  $u_{\text{H}}^{\text{б}}$ , м/с, следует определять по выражению

$$u_{\text{H}}^{\text{б}} = u_{\text{H}}^{\text{max}}(1 - 0,01N_2 - 0,012CO_2). \quad (5.4)$$

Значительное влияние на скорость распространения пламени оказывает предварительный подогрев газозвушной смеси. Используя экспериментальные данные, значение нормальной скорости  $u_{\text{H}}^{T_2}$  при абсолютной температуре смеси  $T_2$  можно приблизительно определить по квадратичной зависимости

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

где значение нормальной скорости распространения пламени  $u_n^{293}$  при температуре 20 °С принимается по таблице на с. 50.

Поскольку при предварительном подогреве смеси ее плотность уменьшается обратно пропорционально абсолютной температуре, а скорость распространения пламени в соответствии с выражением (5.5) растет пропорционально квадрату температуры, то так называемая массовая скорость потока (произведение  $u_n \rho$ ) увеличивается пропорционально абсолютной температуре. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете газовых горелок, работающих на однородной 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 сосудом большого объема, как минимум в сто раз превышающего объем трубки). В этом случае воспламенение свежей смеси, т. е. 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 сопровождается 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 и 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. Возникающее при детонации давление может в 2...3 раза превышать давление обычного теплового взрыва.

**Пример 5.1.** Определите 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  $100 - (3 + 7) = 90$  % об.

2. Состав горючей части газа без учета балласта следующий:

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

3. Содержание горючей части в смеси с воздухом, имеющей максимальную скорость распространения пламени, определим по выражению (5.2), используя данные таблицы на с. 50:

$$C^{\max} = \frac{94,4 + 5,6}{\frac{94,4}{10,5} + \frac{5,6}{6,3}} \cong 10,12 \text{ \%}.$$

4. Максимальную нормальную скорость распространения пламени для смеси горючей части газа с воздухом определим по выражению (5.3), используя данные таблицы на с. 50:

$$u_{\text{н}}^{\max} = 10 \frac{\frac{94,4}{10,5} 0,37 + \frac{5,6}{6,3} 0,4}{94,4 + 5,6} = 0,369 \text{ м/с}.$$

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

$$u_{\text{н}}^{\text{б}} = 0,369(1 - 0,01 \cdot 7 - 0,012 \cdot 3) = 0,33 \text{ м/с}.$$

## 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 газовой смеси.

Теоретически фронт пламени может быть остановлен, если поток самой газовой смеси будет двигаться навстречу пламени со скоростью, равной нормальной скорости распространения пламени:

$w_{\text{пот}} = u_n$ . Однако только в опытной трубке фронт пламени можно считать условно плоским, и для него справедливо приведенное 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).

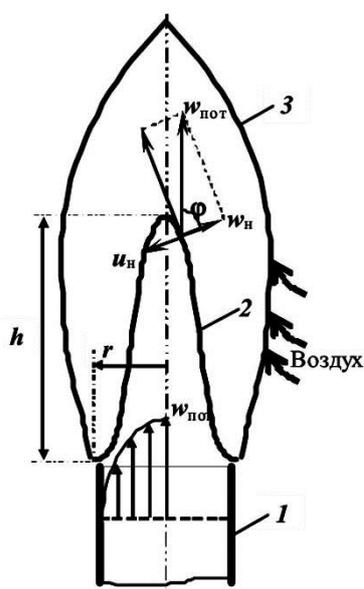


Рис. 5.3. Схема конусного фронта пламени при ламинарном течении

Она представляет собой вертикальный цилиндрический канал 1, по которому течет предварительно подготовленная газозвушная смесь с первичным коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_1 = 0,5 \dots 0,6$ .

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 запаль-

ника, а само ламинарное пламя проявляет способность к самостабилизации (см. гл. 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 внутри пламени. Поскольку фронт неподвижен относительно среза горелки, это означает, что нормальная скорость распространения пламени  $u_{\text{п}}$  в точности компенсирована нормальной составляющей осевой скорости потока  $w_{\text{пот}}$  (см. рис. 5.3). Математически это явление описывает уравнение Гюи – Михельсона (закон косинусов):

$$w_{\text{п}} = w_{\text{пот}} \cos \varphi = u_{\text{п}}. \quad (5.6)$$

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  $u_{\text{н}}$  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 площадь поверхности конусного фронта пламени  $S$ , м<sup>2</sup>:

$$u_{\text{н}} = \frac{V}{S}. \quad (5.7)$$

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):

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

Поскольку в действительности фронт горения не является правильным геометрическим конусом, для точного определения нор-

мальной скорости распространения пламени его фотографируют. Полученное изображение фронта пламени графически разбивают на ряд усеченных конусов с минимальной кривизной образующих. Суммируя площади их поверхностей, можно найти площадь поверхности конусного фронта пламени, весьма близкую к действительной. Этот метод определения нормальной скорости распространения пламени называется *методом горелки*.

Значения нормальной скорости, полученные как методом горелки, так и другими достоверными экспериментальными методами, близки между собой и равны значениям, полученным методом запаянной трубки (см. таблицу на с. 50).

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 газоздушных 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;  $n$  – количество каналов многоканальной горелки.

### 5.3. Горение в турбулентном потоке

Рассмотренное выше горение в ламинарном потоке происходит 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 большого количества 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, т. е. в результате турбулентной диффузии. При переходе ламинарного режима в турбулентный гладкий конусный фронт пламени вследствие вихревого движения и пульсаций начинает размываться и теряет четкое конусное очертание. Возрастает толщина зоны горения, которая перестает быть поверхностью и становится объемной. При этом наблюдаются две разновидности горения, соответствующие мелкомасштабной и крупномасштабной турбулентности.

При мелкомасштабной турбулентности, не превышающей толщины зоны ламинарного горения, конусный фронт пламени сохраняет 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 наблюдаются как бы 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 – характеристика газа, не зависящая от скорости потока. Характер процессов в турбулентном пламени определяет его важнейшее свойство: турбулентная скорость распространения пламени  $u_T$  является функцией степени его турбулентности, т. е. критерия Рейнольдса. Эту зависимость можно выразить через соотношение турбулентной и нормальной скоростей пламени:

$$\frac{u_T}{u_H} = f(Re). \quad (5.11)$$

Наглядная иллюстрация относительного изменения турбулентной скорости распространения пламени в зависимости от критерия Рейнольдса – результаты экспериментальных исследований (смесь городского газа с воздухом), представленные на рис. 5.4. Примерно до значения  $Re = 2000$  сохраняется ламинарное течение и скорость распространения пламени не зависит от скорости потока (от числа Рейнольдса). В переходной зоне скорость горения резко возрастает, а после достижения развитой турбулентности возрастает равномерно.

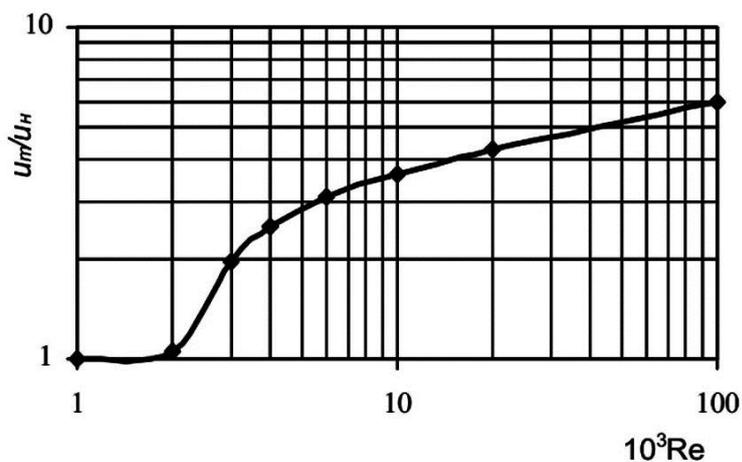


Рис. 5.4. Зависимость турбулентности распространения пламени от числа Рейнольдса

сохраняется ламинарное течение и скорость распространения пламени не зависит от скорости потока (от числа Рейнольдса). В переходной зоне скорость горения резко возрастает, а после достижения развитой турбулентности возрастает равномерно.

При развитой крупномасштабной турбулентности, когда ее масштаб значительно превышает толщину зоны горения, пульсации имеют такую интенсивность, что от пламени 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 очагов горения.

Таким образом, при крупномасштабной турбулентности (вызванной как турбулентностью потока, так и самим процессом горения) поверхность фронта пламени, состоящая из поверхностей всех горящих частиц, растет, что приводит 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  $B$  – безразмерный коэффициент, зависящий от физико-химических свойств газа, близкий к 1,0;  $w'$  – среднеквадратичная пульсационная скорость, зависящая от средней скорости потока, см/с.

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, т. е. 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 в бунзеновских горелках в диапазоне значений критерия Рейнольдса 3000...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.

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

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

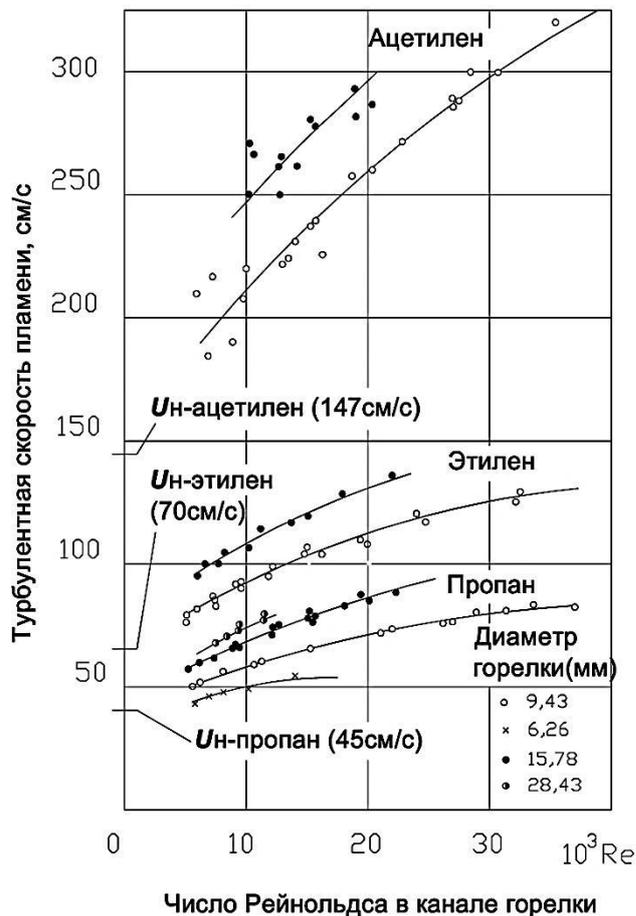


Рис. 5.5. Значения турбулентной скорости горения в зависимости от вида газа, диаметра горелки и числа Рейнольдса

ближенными данными, полученными из практики или отдельных экспериментов.

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

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 чрезвычайно сложна и все еще недостаточно разработана, поэтому приходится часто пользоваться при-

### *Контрольные вопросы*

1. Что понимают под фронтом пламени?
2. Какую скорость называют равномерной скоростью распространения пламени? 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 турбулизации потока?
11. Какое уравнение связывает турбулентную и нормальную скорости распространения пламени?
12. Почему при турбулентном сжигании газов необходимы устройства, обеспечивающие стабилизацию процесса горения?

## Глава 6. УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ

### 6.1. Основные понятия устойчивости горения

Стабилизация всего пламени в топочном пространстве – очень сложная задача. В то же время она лежит в основе разработки высокоэффективных и безопасных в эксплуатации горелок самого различного назначения.

При ламинарном горении полностью устойчива 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. 5.3), что, в принципе, определяет форму всего фронта пламени (рис. 6.1).

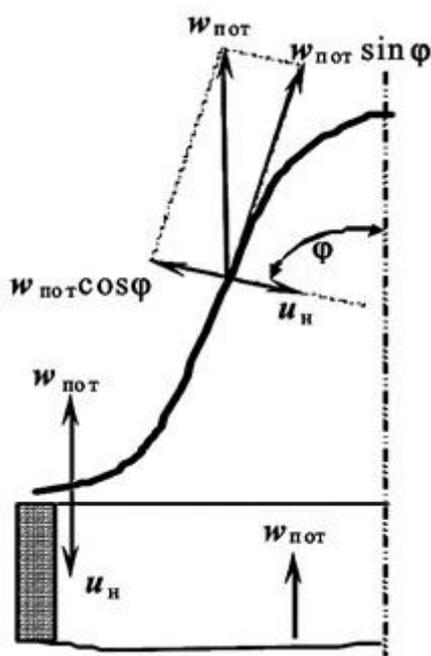


Рис. 6.1. Схема прямой компенсации скоростей в ламинарном пламени

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.

Отсюда 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:

$$\cos \varphi = 1,0; w_{\text{н}} = w_{\text{пот}}$$

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 приводит к увеличению 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 постоянным источником 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 устойчив диффузионный факел, когда по каналу горелки подается чистый газ, а воздух, необходимый для горения, поступает из атмосферы. По существу, диффузионный факел обладает способностью полной самостабилизации.

По мере повышения форсировки горелки, т. е. при постепенном переходе от ламинарного горения к турбулентному, ширина воспламеняющего пояса начинает сначала уменьшаться, а затем становится ничтожно малой. Вместе с тем тепловая мощность горелки уменьшается 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 – проскока пламени, или обратного удара пламени.

## 6.2. Явление отрыва пламени

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

- полный срыв пламени с горелки, вызывающий его погасание;
- отрыв от кромки огневого канала и достижение 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.

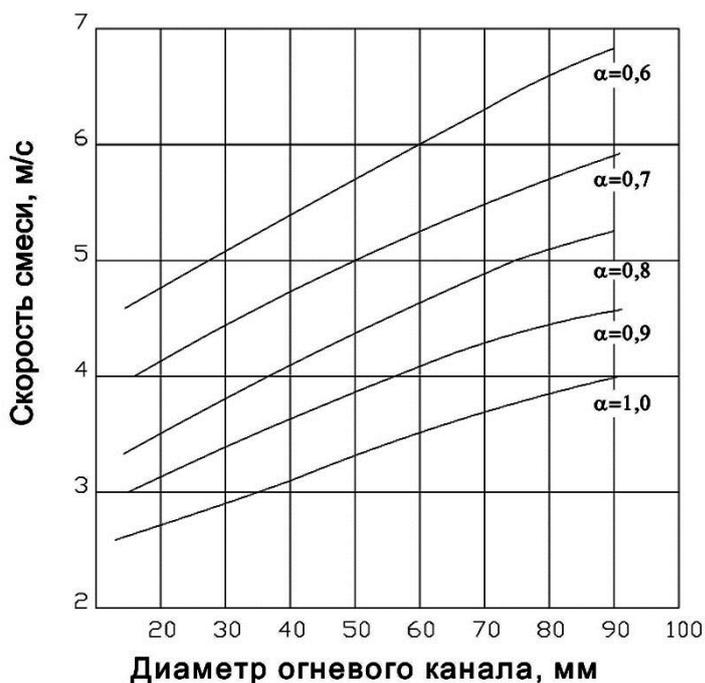


Рис. 6.2. Скорость отрыва одиночного пламени в открытой атмосфере для смесей природного газа с воздухом в зависимости от диаметра горелки и содержания первичного воздуха

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. гл. 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 линиях этих кривых наблюдаются первые признаки неустойчивого горения, при более высоких скоростях – отрыв пламени, а ниже этих кривых – устойчивое горение.

Графики показывают, что увеличение диаметра горелки приводит к росту скорости отрыва, т. е. горение становится более устойчивым. А увеличение содержания первичного воздуха в смеси (более бедная смесь) снижает скорость отрыва пламени. Причина этого – резкое разбавление газозвушной смеси на срезе канала воздухом из окружающей атмосферы. В случае бедной смеси значение коэффициента избытка воздуха 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 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

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

где  $d$  – диаметр огневых каналов, м;  $T$  – абсолютная температура стенок огневых каналов, К;  $V_B^{T.c}$  – теоретическая потребность в воздухе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа;  $\alpha_1$  – коэффициент избытка первичного воздуха.

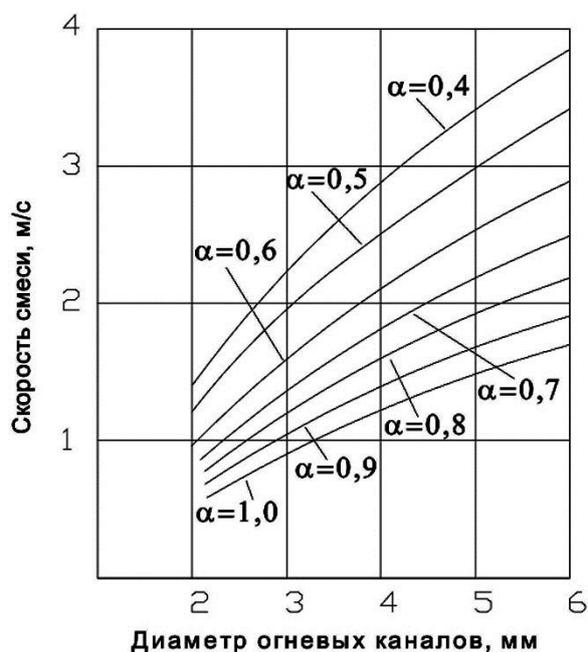


Рис. 6.3. Скорость отрыва многофакельного пламени в открытой атмосфере для смесей природного газа с воздухом в зависимости от диаметра огневых каналов и содержания первичного воздуха

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.

Особенность многопламенных горелок – повышение устойчивости горения в результате взаимного воспламеняющего воздействия факелов соседних каналов.

Графики (см. рис. 6.3) и формулу (6.1) можно с достаточной для инженерных расчетов точностью использовать при сжигании не только 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 различающихся условиях наружного давления, например инжектор горелки – 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 опасно и поэтому недопустимо 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 топку устройства, что грозит последующим взрывом;
- горение внутри канала горелки или непосредственно на выходе из газового сопла, что резко ухудшает условия поступления пер-

вичного воздуха и смешения его 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 газозоудушной 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 газозоудушных смесей (для природных и сжиженных углеводородных газов), при которых наблюдается проскок пламени внутрь смесителей инжекционных горелок.

*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	Скорость смеси при коэффициенте 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

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.

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	Скорость смеси при коэффициенте 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

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

- для природного газа

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

- для сжиженных углеводородных газов

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

**Результаты экспериментальных исследований.** В практике инженерных расчетов максимальные значения скорости истечения газозоудушной 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 изучения 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

$$w_{\text{пр}}^{\text{откр}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-3} u_{\text{н}}^2 d}{a}; \quad (6.4)$$

- при сжигании в топке с керамическим туннелем

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

где  $w_{\text{пр}}^{\text{откр}}$ ,  $w_{\text{пр}}^{\text{топк}}$  – скорость проскока пламени, м/с, соответствующая коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,0$ ;  $u_{\text{н}}$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;  $d$  – диаметр огневого канала горелки, м;  $a$  – коэффициент температуропроводности газовой смеси, м/с.

Например, для смеси природного газа с воздухом (при  $\alpha_1 = 1,0$ ,  $t = 20$  °С) значение коэффициента температуропроводности составляет примерно 10...20 м/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,

$$w_{\text{пр}}^{\text{откр}} \approx 30d; \quad (6.6)$$

- для горелок без водоохлаждаемых насадок, установленных в туннеле топки,

$$w_{\text{пр}}^{\text{топк}} \approx 50d. \quad (6.7)$$

На рис. 6.4 приведены приближенные значения скорости проскока пламени для стехиометрических смесей природного и сжиженного углеводородного газа с воздухом. Опыты проводились на серийных прямых неохлаждаемых инжекционных горелках, уста-

навливаемых в открытой атмосфере и в тщательно выполненных туннелях, предотвращающих перегрев торцов и стенок огневых каналов горелок.

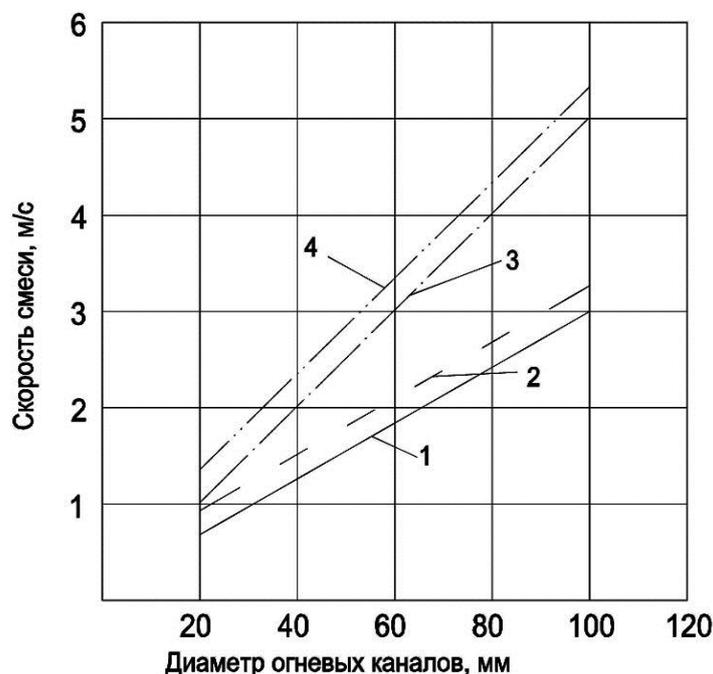


Рис. 6.4. Максимальная скорость проскока пламени ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 101\,325\text{ Па}$ ) в инжекционных однофакельных горелках для газозвушной смеси при  $\alpha = 1,0$ : 1, 3 – природный газ; 2, 4 – сжиженный газ; 1, 2 – сжигание в открытой атмосфере; 3, 4 – горелка установлена в туннеле

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.

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 с графиками (см. рис. 6.4). 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.

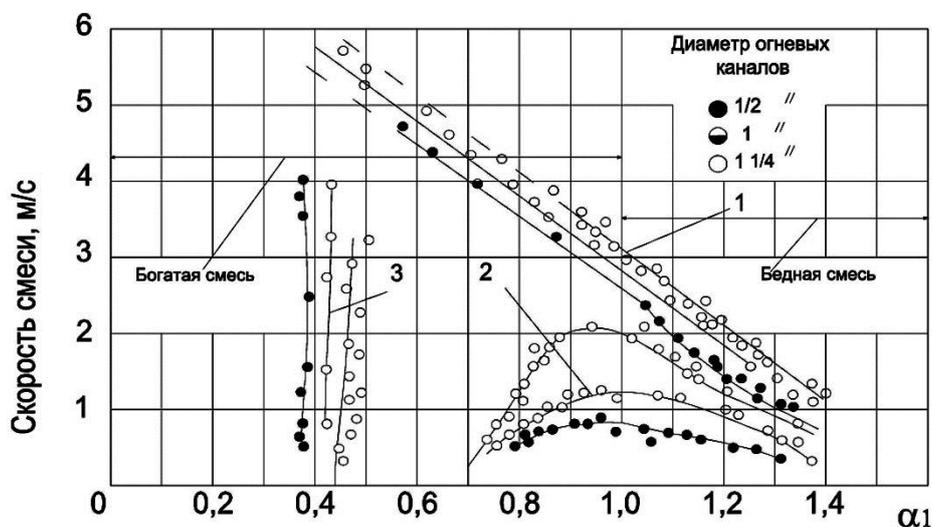


Рис. 6.5. Область устойчивого и полного сгорания:  
 1 – кривые отрыва пламени; 2 – кривые проскока пламени;  
 3 – кривые появления желтых краев пламени

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

Как следует из данных рис. 6.5, область устойчивого горения резко сужается при увеличении содержания первичного воздуха в смеси по сравнению со стехиометрическим соотношением ( $\alpha_1 = 1,0$ ). И наоборот, обогащение смеси увеличивает устойчивость горения, и при  $\alpha_1 = 0$  горение становится диффузионным.

Однако в большинстве случаев такое горение недопустимо, 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 значения верхнего предела воспламенения [см. формулу (4.11)].

Предотвращение проскока пламени при большом содержании первичного воздуха в смеси (в том числе при  $\alpha > 0$ ) 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.

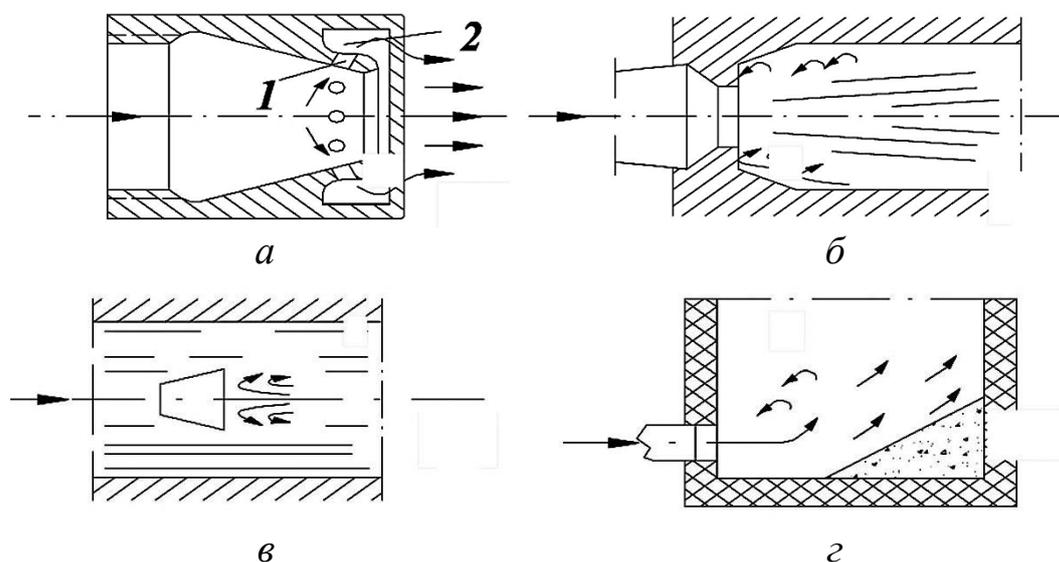


Рис. 6.6. Схемы стабилизаторов горения в отношении отрыва пламени: а – кольцевой стабилизатор; б – стабилизирующий туннель; в – центральный конический стабилизатор; г – шамотная горка

В стабилизаторе, показанном на рис. 6.6, а, часть газоздушной смеси (5...10 % от ее общего расхода) через отверстия 1 отводится в

кольцевой канал 2, окружающий головку инжекционной горелки. Благодаря 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 в подогреве и зажигании основного потока смеси по всей его периферии. Диаметры боковых отверстий стабилизатора, формирующих кольцевое пламя, принимаются несколько меньше критических значений (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 – источник стабильного зажигания вдоль факела в случае кратковременных неблагоприятных флуктуаций скорости или состава смеси. Конструкция стабилизирующих туннелей и их оптимальные размеры могут существенно различаться в зависимости от типа горелки и способа ее установки в топке.

В тех случаях, когда установка кольцевых стабилизаторов и расширяющихся туннелей невозможна или нежелательна, применяют осесимметричные стабилизаторы в виде плохобтекаемых 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 газовой смеси (к корню факела). Однако в случае туннелей воспламенение происходит по периметру потока, а в случае осесимметричных стабилизаторов – в его центральной части (изнутри факела). Простейший способ такой стабилизации – 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, з). Этот способ характерен для камерных топок, работающих без отвода теплоты (так называемые предтопки), назначение которых – приготовление потока теплоносителя для его последующего использования в сушильных установках, термических и нагревательных печах и т. п.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие условия необходимы для создания устойчивой зоны горения?
2. Какие явления называют отрывом и проскоком (обратным ударом) пламени?
3. Какие факторы влияют на диаметр огневых отверстий газовых горелок?
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 газоздушном смеси?
8. Какие способы стабилизации пламени применяют 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 плохобтекаемой формы?

## Глава 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 весьма условны, поскольку каждый процесс сжигания – это реализация 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 газозвушная 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. Недостатки кинетического принципа сжигания: малая устойчивость пламени в отношении его отрыва и проскока, невозможность регулирования скорости сгорания смеси и трудность сжигания газа с предварительно нагретым воздухом. Обычно для сжигания газа по этому принципу применяют специальные смесители или инжекционные горелки, обеспечивающие приготовление однородной газозвушной смеси с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,02 \dots 1,05$ .

Если содержание первичного воздуха в газозвушной смеси меньше стехиометрического значения ( $\alpha_1 < 1,0$ ), 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, т. е. по диффузионному принципу сжигания.

Особенность пламени при сжигании смеси с  $\alpha_1 < 1,0$  – два видимых фронта горения: внутренний, образующийся за счет первичного воздуха, и наружный, 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) зависят 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  $\alpha_1 < 1,0$  – промежуточный между кинетическим и диффузионным принципами, его называют смешанным принципом сжигания. Он широко используется в большинстве бытовых и коммунальных газовых приборов, а также в 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 в виде турбулентной диффузии. В соответствии с этим различаются 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. Грани-

ца 4 между зонами 2 и 3 представляет собой гладкий конусный фронт пламени, к которому изнутри диффундируют молекулы газа, а снаружи – молекулы воздуха.

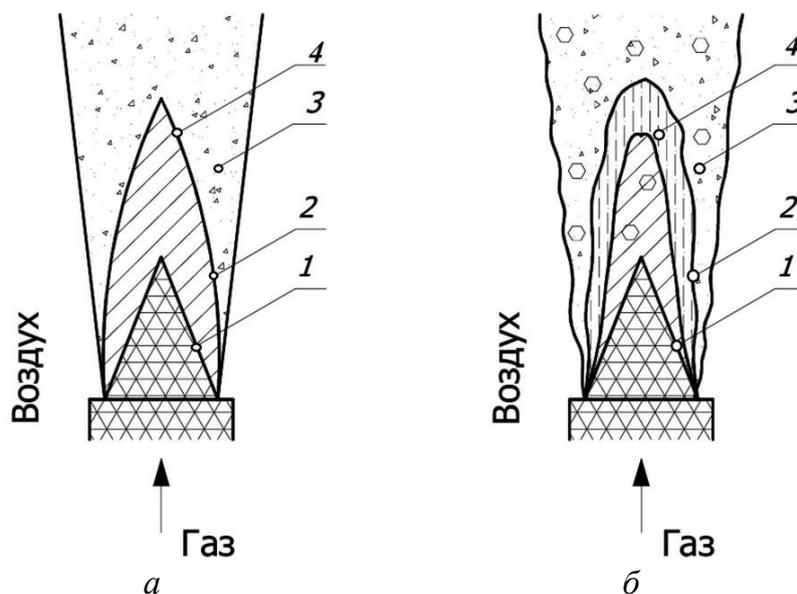


Рис. 7.1. Структура свободного диффузионного пламени: а – ламинарное пламя; б – турбулентное пламя

Образовавшиеся во фронте пламени продукты сгорания диффундируют частично 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.

Достоинства диффузионного способа сжигания:

- высокая устойчивость пламени при изменении тепловых нагрузок от нуля до максимально возможных;
- 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;

- низкую интенсивность горения;
- недопустимость омывания пламенем поверхностей теплообмена;
- необходимость в большом объеме топок, обеспечивающем 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 теплообменники 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.

Характерные особенности турбулентного диффузионного горения по сравнению с ламинарным: 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 применяют 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. На практике это достигается созданием 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 доказывают эффективность этого способа улучшения процессов смешения и снижения химического недожога. Перенос процессов смешения и горения 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 могут быть позитивным фактором в котлах с экранированными топками. В соответствии с законом Стефана – Больцмана лучистый поток,  $W_t$ , от пламени определяется выражением

$$q_0 = \varepsilon \delta_0 T^4,$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты пламени;  $\delta_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $\delta_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ;  $T$  – абсолютная температура пламени, К.

Однако, анализируя вышеприведенную формулу, 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. Значит, обоснованы только такие способы «подсветки» пламени, которые не вызывают заметного снижения 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 газозооудшной смеси близок к верхнему пределу воспламеняемости. При сгорании газозооудшной 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. Опишем общие требования к газогорелочным устройствам, приведем классификацию газовых горелок и систематизируем сведения 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 тому подобным, 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;
- пределы регулирования, не меньшие, 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 – это 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) – это отношение максимальной тепловой мощности горелки к минимальной.

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

*Давление газа и воздуха перед горелкой*, Па, подразделяется на номинальное, максимальное и минимальное. Они соответствуют номинальной, максимальной и минимальной тепловой мощности.

*Удельная металлоемкость*, кг/кВт, – это 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* – это расстояние по оси факела от выходного сечения горелки, измеренное при работе с номинальной тепловой мощностью в калибрах выходного сечения, до точки, в которой концентрация оксида углерода при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$  составляет 95 % от максимального значения.

*Давление (разрежение) в камере сгорания*, Па, – это 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 подразделить 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 при объединении процессов смешения и горения;
- горелки без предварительного смешения газа с воздухом, реализующие турбулентный и диффузионный принципы сжигания.

По способу подачи воздуха в зону горения и коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1$  различают следующие 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;
- с принудительной подачей воздуха (дутьевые), в которые воздух подается при помощи вентилятора.

Способ подачи воздуха 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 распространенный тип газовых горелок – горелки бытовых газовых плит (рис. 7.2). В большинстве случаев это инжекционные горелки с предварительным смешением газа с частью воздуха, необходимого для полного сгорания, 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 отдельные 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 воздух может поступать только по периферии горелки (см. рис. 7.2, а, б) или по периферии и по центру через специальный канал (см. рис. 7.2, в). Второй способ рекомендуется для горелок на сжиженный газ, чтобы обеспечить полное сгорание топлива (см. гл. 8).

Стабилизация пламени в рассматриваемых горелках осуществляется по двум вариантам. Во-первых, стабилизация каждого отдельного пламени происходит способом, характерным для двухконтурного пламени горелки Бунзена, т. е. путем естественной самостабилизации.

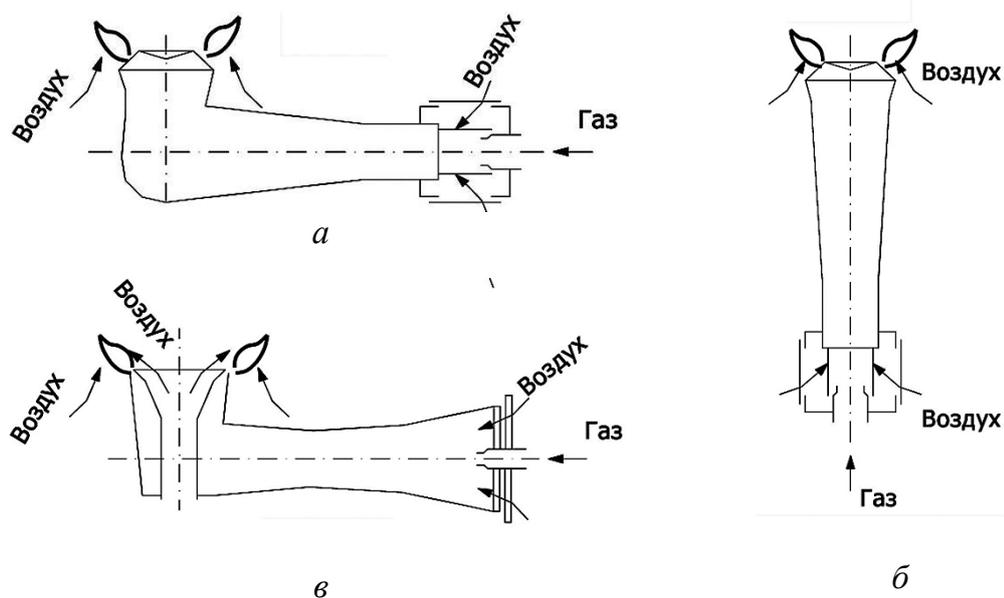


Рис. 7.2. Схемы горелок бытовых газовых плит:  
а, б – с периферийным подводом вторичного воздуха;  
в – с двусторонним подводом вторичного воздуха

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 газовой смеси. Этим способом достигается 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).

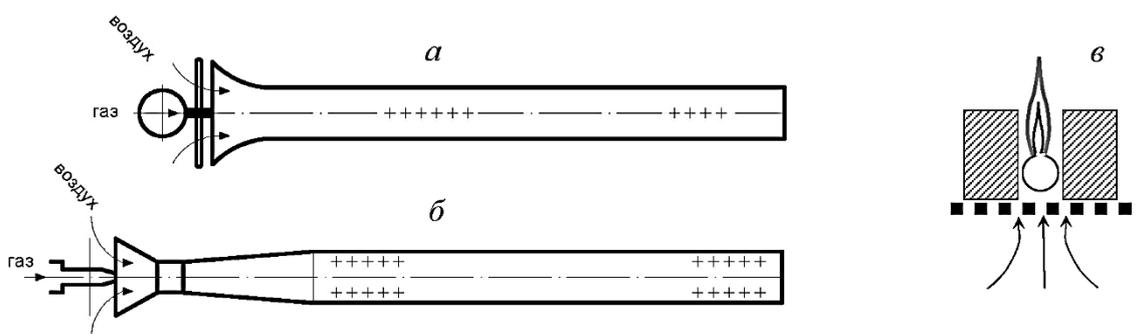


Рис. 7.3. Конструкция щелевых инжекционных горелок:  
*а* – однорядная горелка; *б* – двухрядная горелка;  
*в* – устройство щели на колосниковой решетке

Форма горелок способствует сохранению равномерного теплового восприятия 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  $\alpha_1 = 0,5...0,6$ , а через отверстия в решетке за счет разрежения в топке в зону горения поступает вторичный воздух (см. 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  $\alpha_1 = 1,0...1,15$ . При этом образуется короткий прозрачный (так называемый «жесткий») факел. Исключение составляют установки, которые по своей технологии требуют более растянутого и «мягкого» факела.

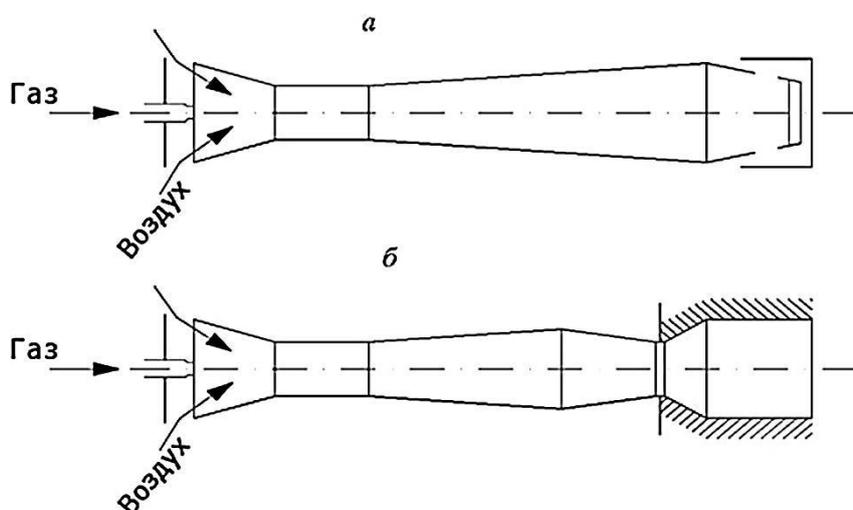


Рис. 7.4. Инжекционные горелки среднего давления:  
 а – с кольцевым стабилизатором;  
 б – со стабилизирующим керамическим туннелем

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

**Дутьевые горелки.** Дутьевые горелки, или горелки с принудительной подачей воздуха, составляют весьма разнообразную группу устройств для сжигания газов в котлах и промышленных печах. В них воздух, необходимый для горения, нагнетается 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 подается через

насадку к месту сжигания. Такие горелки, как и инжекционные, работающие с  $\alpha_1 > 1$ , оснащены стабилизаторами пламени.

К особенностям горелок этого типа относят:

- устойчивую работу в широком диапазоне применения тепловой мощности;
- возможность использовать теплоту предварительно подогретого (подаваемого для горения) воздуха;
- возможность обеспечить сжигание газа по кинетическому или промежуточному принципу (в зависимости от вида смесителя);
- работу горелки вне зависимости от давления в топке;
- необходимость устанавливать клапан блокировки, отключающий подачу газа при прекращении подачи воздуха;
- необходимость в рабочем режиме регулирования соотношения расхода газа и воздуха для поддержания заданного коэффициента избытка воздуха;
- меньшую удельную металлоемкость по сравнению с инжекционными горелками;
- 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. Они 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, изменяя качество смешения газа с воздухом. Чтобы сократить длину пламени, надо обеспечить хорошее предварительное смешение. Это достигается путем удлинения участка смешения, путем увеличения разности скоростей газа и воздуха, а также поверхности соприкосновения газовых струй с воздушным потоком, путем направления потоков газа и воздуха под углом, путем выдачи газовых струй в закрученный поток воздуха.

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

По схеме 7.5, а газ и воздух к месту сгорания подаются отдельно, широкими параллельными потоками с примерно равными скоро-

стями. Смешение происходит крайне медленно. Горение близко к диффузионному. Пламя длинное, при сжигании углеводородных газов светящееся, имеет невысокую температуру.

По схеме 7.5, б поверхность соприкосновения потоков газа и воздуха увеличена за счет подачи газа внутри воздушного потока (горелка типа «труба в трубе»). Длина пламени сокращается.

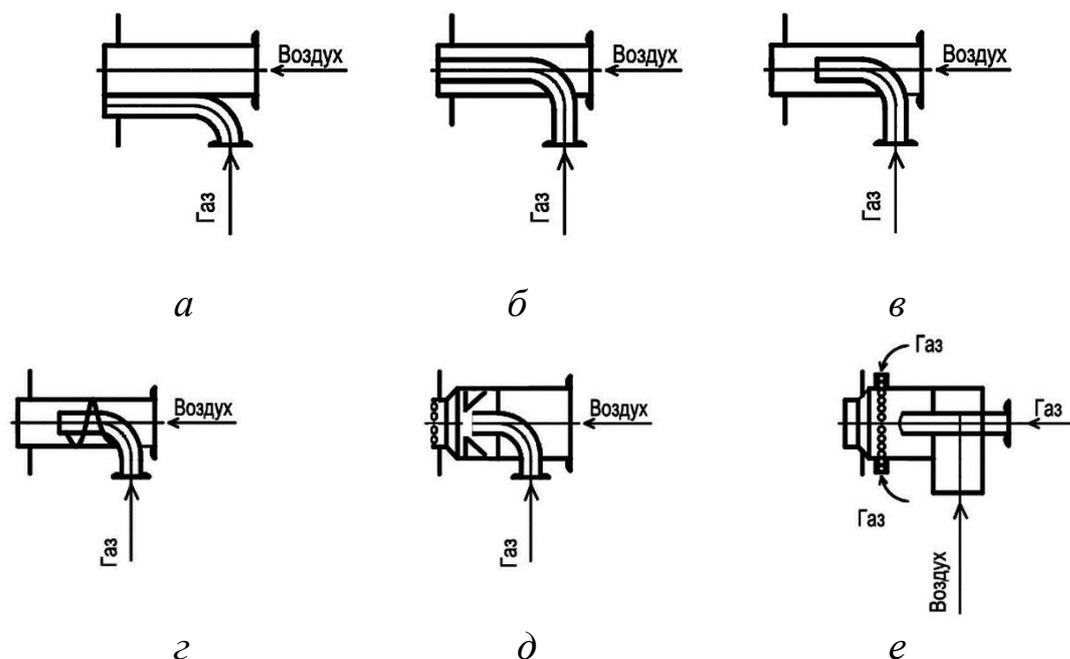


Рис. 7.5. Схемы горелок с подачей воздуха

Еще более существенное сокращение длины пламени достигается при обеспечении некоторого предварительного смешения газа с воздухом (см. рис. 7.5, в). Улучшение предварительного смешения газа с воздухом достигается установкой в горелке завихрителя, закручивающего поток воздуха (см. рис. 7.5, г).

Для увеличения площади поверхности соприкосновения газа с воздухом вместо одного крупного огневого отверстия делают много мелких под углом к предварительно закрученному потоку воздуха (см. рис. 7.5, д). 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 (см. рис. 7.5, е), 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 в теплообменниках (рекуператорах, регенераторах и др.) на подогрев воздуха, подаваемого для горения, что позволяет повысить КПД теплоагрегатов.

Недостатки рассматриваемых горелок следующие: значительные затраты электроэнергии на дутьевые вентиляторы; усложнение инженерных коммуникаций теплоагрегата из-за воздуховодов, 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, на котором протекает смешение, скорости газовых струй и других факторов.

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

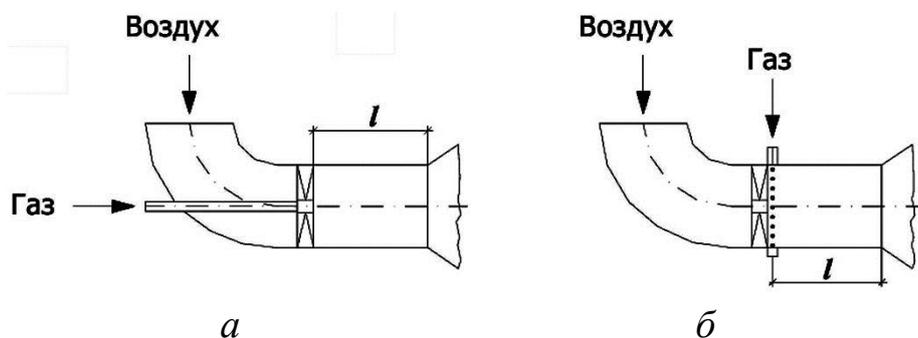


Рис. 7.6. Схемы подачи газа в закрученный поток воздуха в дутьевых горелках: а – центральная подача; б – периферийная подача

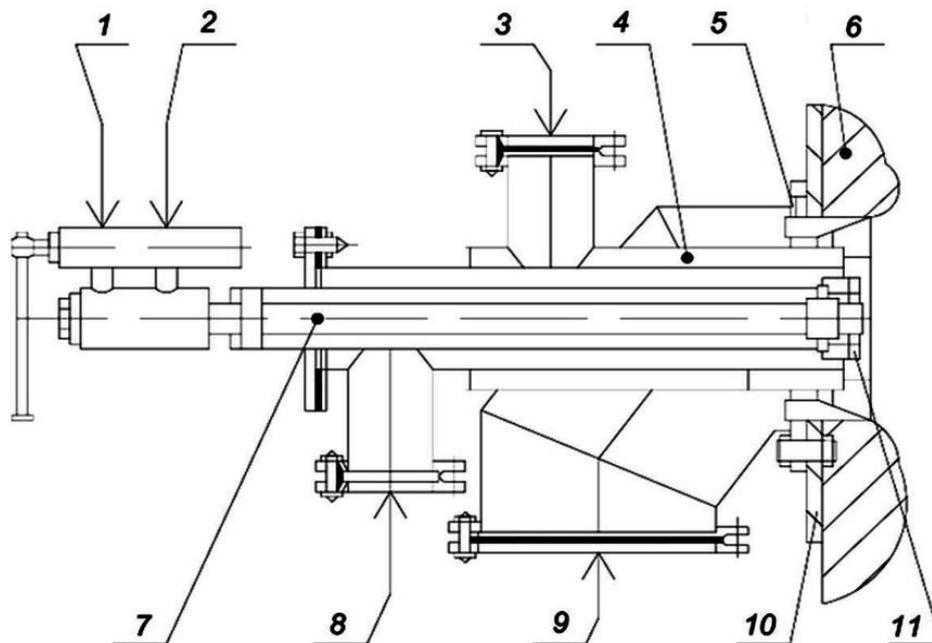


Рис. 7.7. Схема газомазутной горелки (ГМГ):  
 1 – вход мазута; 2 – вход пара; 3 – вход газа; 4 – газовый канал;  
 5 – завихритель вторичного воздуха; 6 – керамический туннель;  
 7 – паромазутная форсунка; 8 – вход первичного воздуха; 9 –  
 вход вторичного воздуха; 10 – монтажная плита; 11 –  
 завихритель первичного воздуха

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

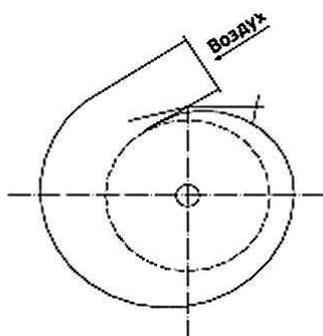


Рис. 7.8. Схема  
 улиточного способа  
 закрутки воздуха

Различаться могут также способы закрутки воздушного потока. В газовых горелках малой и средней мощности более распространены лопаточные регистры. При большой мощности и соответствующих размерах горелок лопаточный способ закрутки воздуха требует более длинного отрезка смешения и в целом приводит к неоправданно большому гидравлическому сопротивлению. При этом лучшие показатели закрутки обеспечивают тангенциальные или улиточные (рис. 7.8) закручивающие аппараты. В последние годы

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

Автоматическая блочная горелка – это горелка, скомпонованная в единый блок с вентилятором и оснащенная автоматическими устройствами зажигания, контроля пламени и управления горелкой. Она, как правило, укомплектована системой автоматического регулирования.

Тепловая мощность горелки может изменяться 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 происходит с помощью специального устройства зажигания. Наличие пламени контролируется специальным датчиком.

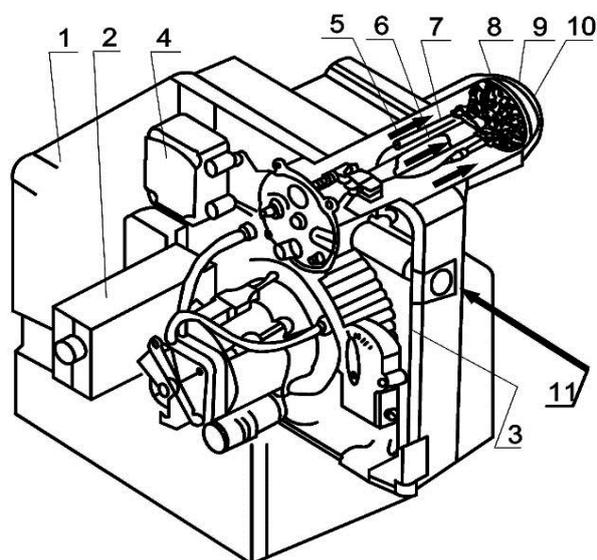


Рис. 7.9. Автоматическая блочная горелка: 1 – корпус горелки; 2 – блок управления; 3 – вентилятор; 4 – прибор зажигания; 5 – воздушный канал; 6 – газовый канал; 7 – электрод зажигания; 8 – подпорная шайба; 9 – пламенная труба; 10 – электрод контроля пламени; 11 – вход газа

**Излучающие горелки.** Особую группу составляют излучающие (инфракрасные) горелки. Их основное применение – обогрев предметов или людей в условиях, когда конвективный обогрев всего объема или помещения невозможен или экономически неоправдан. Например, в больших залах (производственные, торговые, складские), помещениях большой высоты, в которых люди находятся только в нижней зоне (например, церкви), а также на открытых пространствах: скамейках запасных на стадионах, стрелочных переходах на железных дорогах и т. п.

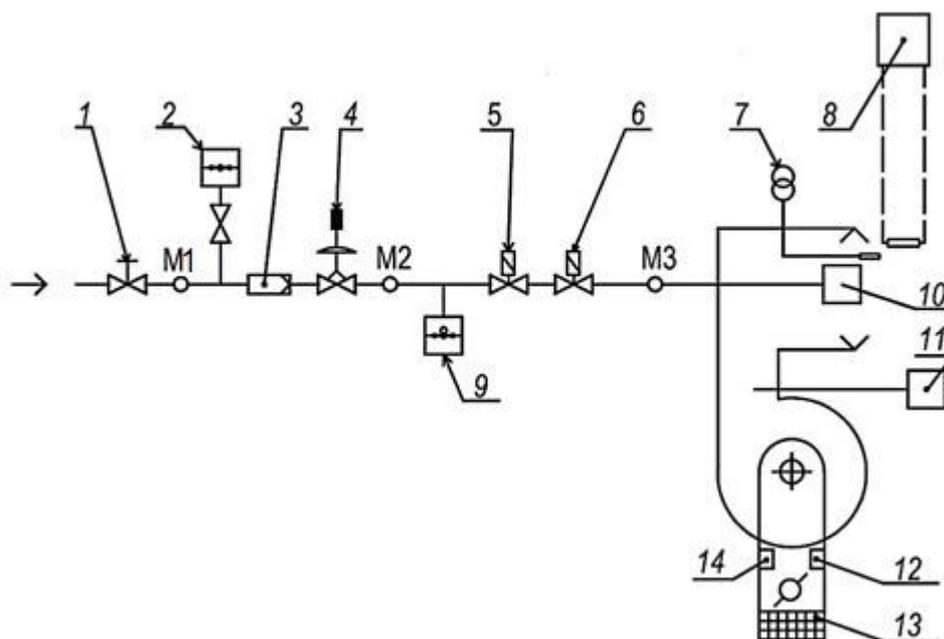


Рис. 7.10. Схема автоматической блочной газовой горелки с принудительной подачей воздуха: 1 – ручной кран отключения; 2 – манометр; 3 – фильтр; 4 – регулятор давления газа; 5 – отсечной клапан; 6 – регулятор расхода; 7 – устройство зажигания; 8 – датчик контроля пламени; 9 – устройство контроля давления газа; 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 решетки; 14 – позиционный переключатель высокого расхода воздуха; M1 – точка измерения давления на входе; M2 – точка измерения для регулирования давления; M3 – точка измерения в головке горелки

В излучающих горелках после процесса инжектирования воздуха (при  $\alpha_1 = 1,05$ ) и его последующего смешения с газом не происходит немедленного воспламенения смеси. Последняя 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 выходе 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. На фоне излучающей поверхности керамической панели зона горения, состоящая из сотен крошечных язычков пламени, абсолютно не видна. По этой причине в технической лите-

ратуре и профессиональной терминологии долгое время был распространен неправильный термин «горелки беспламенного горения».

Раскаленная поверхность панели обеспечивает надежное воспламенение и предотвращает отрыв пламени. Однако серьезную проблему представляет недопущение 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 в топку и ухудшением горения. Из-за этого газовая инфракрасная горелка может быть направлена вниз под углом не более 35...45°.

Основной же способ предотвращения проскока пламени — применение каналов диаметром как минимум в два раза меньше критического размера, т. е. 1,0...1,5 мм. Толщина слоя керамики между каналами составляет менее 0,5 мм.

Действительное сечение каналов в общей поверхности панели составляет 35...40 %, что обеспечивает малое гидравлическое сопротивление.

В то же время во многих случаях наиболее желательно потолочное размещение излучателя (рис. 7.13, 7.14). Для такого применения разработаны специальные горелки, в которых эжекция воздуха и приготовление горючей смеси происходят в отдельном блоке (рис. 7.15).

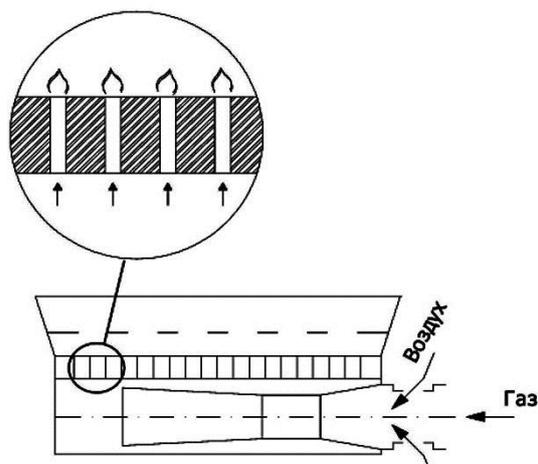


Рис. 7.11. Общие принципы конструкции излучающих горелок



Рис. 7.12. Излучающая горелка с керамической панелью



Рис. 7.13. Потолочный газовый излучатель с отводом продуктов сгорания

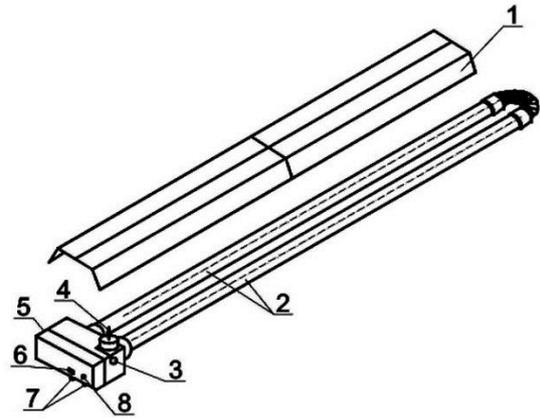


Рис. 7.14. Схема потолочной горелки: 1 – отражатель; 2 – излучатели; 3 – ввод воздуха на горение; 4 – отвод продуктов сгорания; 5 – ввод газа; 6 – электропитание; 7 – сигнальные лампочки; 8 – контакт датчика контроля

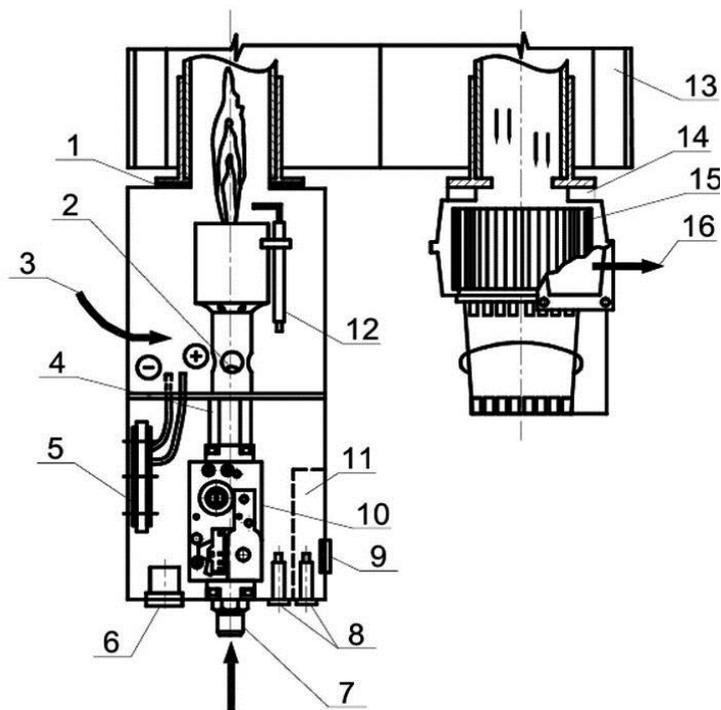


Рис. 7.15. Блок для приготовления горючей смеси и отвода продуктов сгорания излучающей горелки: 1, 14 – прокладка; 2 – сопло горелки; 3 – подача первичного воздуха; 4 – конфузор; 5 – дифференциальный манометр; 6 – электропитание; 7 – газовый штуцер; 8 – сигнальные лампочки; 9 – питание вентилятора; 10, 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.

Автоматические излучающие горелки обладают рядом преимуществ. Общий шкаф («моноблок») объединяет камеру горения и вентилятор. 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***

1. В чем различие диффузионного и кинетического принципов сжигания газов?
2. Каковы значения 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. Дайте определения газовой горелки и газогорелочного устройства.
7. Какие требования предъявляют к газовым горелкам?
8. Что такое тепловая мощность горелки?
9. Как регулируется тепловая мощность горелки?
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?

## Глава 8. ОХРАНА АТМОСФЕРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА

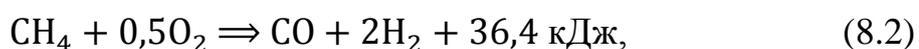
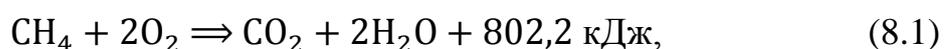
При несовершенной организации горения в отходящих газах углеводородного топлива содержится некоторое количество оксида углерода, водорода, различных углеводородов и частиц сажи, являющихся продуктами неполного сгорания. Кроме того, в продуктах сгорания всегда есть оксиды азота. Значительное количество этих веществ в отходящих газах недопустимо, 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 – одна 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.

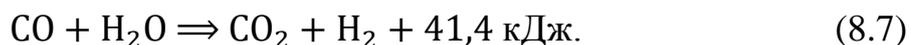
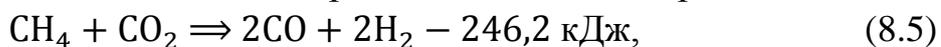
Известно, что при горении углеводородного топлива протекают как реакции полного стадийного высокотемпературного окисления углеводородов, так и процессы их газификации и термического разложения (пиролиза). Пиролиз происходит в условиях общего или локального недостатка окислителя. При сжигании метана отмеченные реакции могут быть описаны следующими уравнениями:

- в окислительной зоне при избытке кислорода:





- в восстановительной зоне при недостатке кислорода:



Эти уравнения представляют итоговый результат реакций, т. е. 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 газозвудушных 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 сажистых частиц и различных углеводородов. Таким образом, внешний вид пламени характеризует протекающие в нем процессы.

На рис. 8.1 приведены экспериментальные данные, показывающие содержание первичного воздуха в смеси с различными газами, которое предотвращает образование желтых язычков пламени при ламинарном потоке. 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 газозудушной 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.

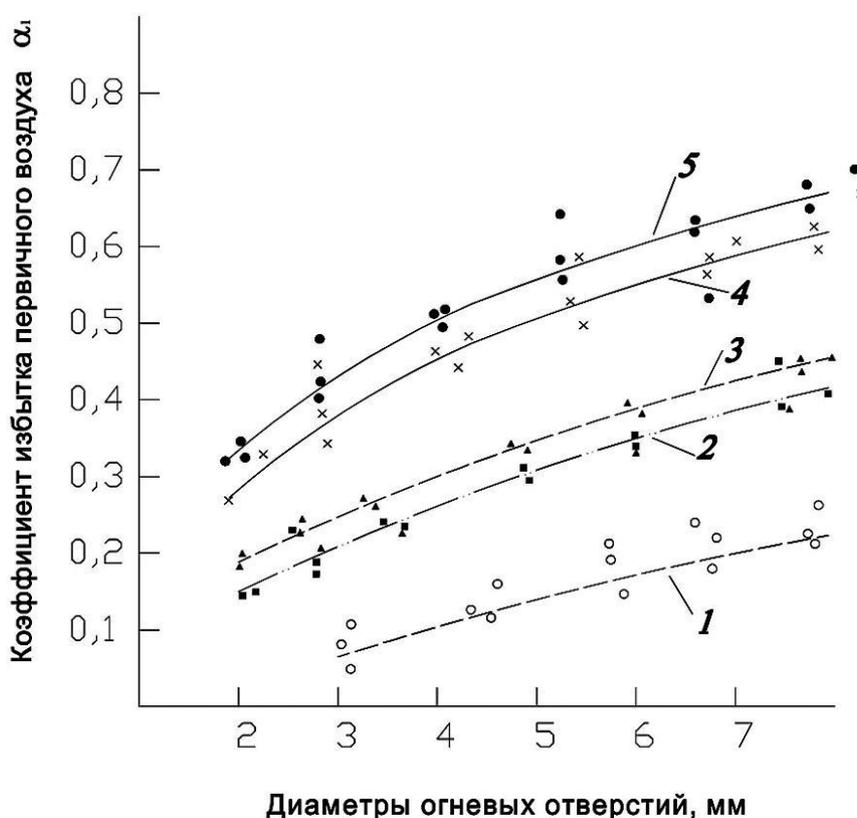


Рис. 8.1. Кривые образования желтых язычков пламени для различных газов: 1 – коксовый газ; 2 – природный газ газовых месторождений; 3 – газ нефтяных месторождений; 4 – технический пропан; 5 – технический бутан

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  $\text{C}\dot{\text{H}}_3$ , метена  $\text{C}\dot{\text{H}}_2$  и метина  $\text{C}\dot{\text{H}}$ , которые затем инициируют образование этана, этена, ацетилен и других углеводородов. Последние, в свою очередь, подвергаются в предпламенной зоне дегидратации и циклизации и образуют в конечном итоге мелкодисперсную сажу. 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 контактируют с окислителем только за счет медленной молекулярной диффузии. В связи с этим 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 и другие продукты неполного сгорания.

**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 изучен, чем образование сажи. Однако 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. На рис. 8.2 показана одна из возможных схем таких преобразований.

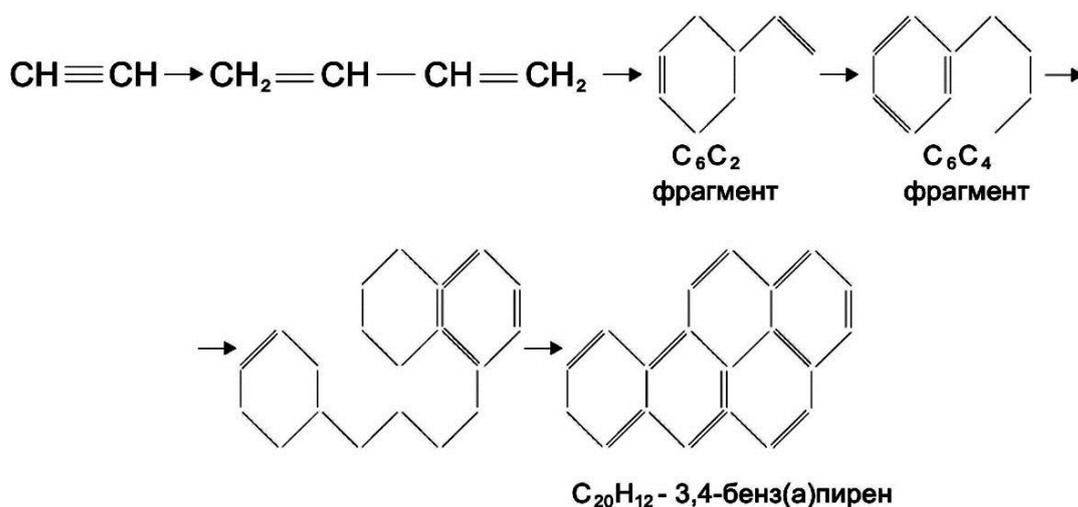


Рис. 8.2. Возможная схема образований 3,4-бензпирена

## 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 термином «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 % от 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 и приводить к появлению 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:

- образование NO происходит за фронтом пламени в зоне максимальных температур по цепному механизму, формальную кинетику которого описывает уравнение



- выход NO определяется максимальной температурой горения и равновесными концентрациями азота и кислорода в зоне реакции, поэтому теория получила название термической;

- концентрация образовавшегося оксида азота не превышает ее равновесного значения при максимальной температуре в реакционной зоне;

- при наличии свободного кислорода выход NO определяется максимальной температурой в зоне реакции, тогда как при недостатке кислорода – кинетикой распада NO, т. е. скоростью охлаждения продуктов сгорания (так называемая закалка продуктов реакции);

- 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 в составе 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:

- конверсия азота топлива в NO происходит во фронте пламени при скорости, сравнимой со скоростью самих реакций горения;

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

- выход топливных оксидов азота слабо зависит от температуры пламени, незначительно повышаясь с ее увеличением;

- конверсия растет при увеличении коэффициента избытка воздуха;
- выход топливных оксидов азота практически не зависит от типа химического состава топлива, содержащего азот, а определяется исключительно содержанием в нем азота;
- 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, оксиды азота образуются при сжигании любого вида топлива. Химически индуцированный механизм их 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:

- фронтальные  $\text{NO}_x$  образуются в зоне, характеризующейся как фронт пламени;
- время их образования ограничено временем протекания реакций горения;
- выход фронтальных оксидов азота слабо зависит от температуры и сильно от избытка воздуха;
- 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 обзора теории образования вредных веществ в пламени горящего топлива, снижение их выбросов с отходящими газами в атмосферу на 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, от 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 которых 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 (см. рис. 7.2, а, б) или по периферии и от центра (см. 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 до 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 до дна посуды 30 мм и более.

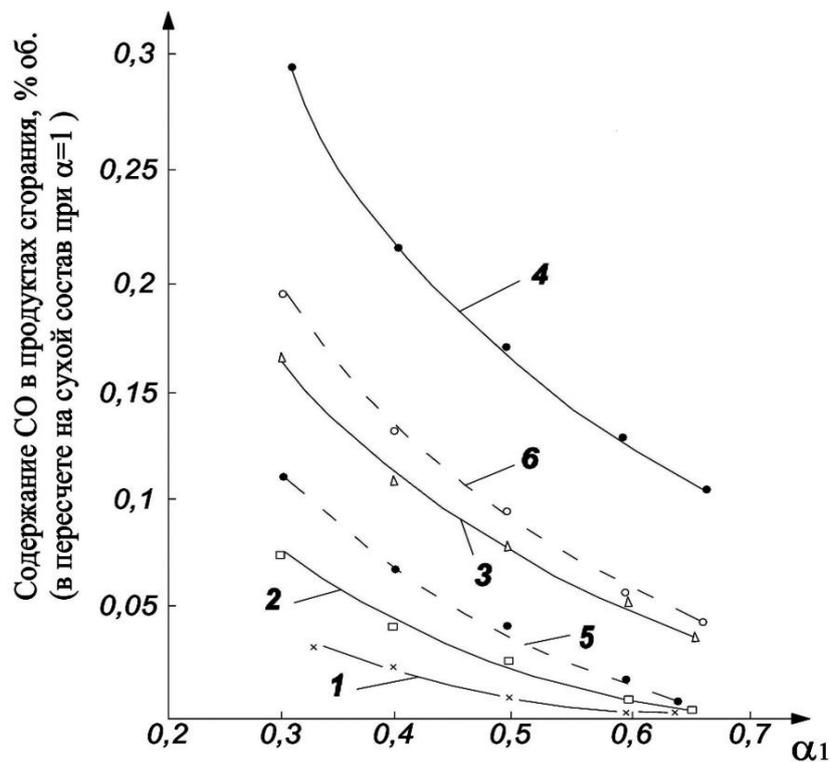


Рис. 8.3. Содержание СО в продуктах сгорания горелок газовых плит: 1 – природный газ, горелка с двусторонним подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 30 мм; 2 – природный газ, горелка с периферийным подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 30 мм; 3 – то же при расстоянии 20 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 расстоянии до 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 пламенем отдельных каналов 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 увеличения давления газа приводит к росту содержания CO в 1,2...1,3 раза. При аналогичном повышении нагрузки за счет увеличения калорийности газа содержание CO 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.

Положительная особенность горелок с двусторонним подводом вторичного воздуха – в 1,5 раза меньший выход оксидов азота. Концентрация  $NO_x$  в продуктах сгорания этих горелок (в пересчете на  $NO_2$ ) при фактическом избытке воздуха в пробах 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 до 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  $\alpha_1 = 0,6...0,7$  и расстоянии до дна посуды 30 мм выход 3,4-бензпирена находился в пределах 0,01...0,07 мкг/м<sup>3</sup> газа. В тех же условиях, но при значении коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,3...0,55$  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  $\alpha_1 = 0,35...0,6$  и расстоянии до 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 (предпочтение отдается 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 в 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. 7.2.4.

**Экологические характеристики инжекционных горелок.** Инжекционные горелки продольной формы, работающие при  $\alpha_1 < 1,0$  (см. рис. 7.3), применяются при переходе с твердого топлива на газ. Это простой и недорогой способ модернизации котлов, однако такие 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 вызывает слияние пламени отдельных каналов горелки, что значительно ухудшает условия поступления вторичного воздуха к каждому пламени. Это приводит к увеличению высоты всего пламени, к 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 CO в продуктах сгорания составило  $0,15...0,19$  г/м<sup>3</sup> газа, 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 CO 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. Минимальные (по условиям полноты сгорания) и максимальные (по условиям «беглости» пламени) расстояния между осями отверстий в зависимости от указанных факторов приведены в таблице.

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

Диаметр отверстий $d$ , мм	Расстояния между осями отверстий (мин./макс.), мм, при					
	$\alpha_1 = 0$	$\alpha_1 = 0,2$	$\alpha_1 = 0,3$	$\alpha_1 = 0,4$	$\alpha_1 = 0,5$	$\alpha_1 = 0,6$
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, как правило, должно 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 инжекционных горелок среднего давления с кольцевым стабилизатором (см. рис. 7.4, а и 6.6, а) в открытой атмосфере была исследована в широком диапазоне изменения коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,9 \dots 1,05$ . 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 значительное количество пирена в пределах 2,8...3,6 мг/м<sup>3</sup> газа. Горение характеризуется образованием также 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 вы-

ход 3,4-бензпирена составлял 0,05...0,1 мкг/м<sup>3</sup> газа. Количество пирена по сравнению с диффузионным горением уменьшилось в 20...30 раз и составило в среднем 0,1...0,2 мг/м<sup>3</sup> газа. Дальнейшее увеличение содержания первичного воздуха до  $\alpha_1 = 1,10...1,15$  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 коэффициента избытка первичного воздуха составляли  $\alpha_1 = 0,75...1,15$ . Выход оксидов азота был исследован при коэффициенте избытка первичного воздуха до  $\alpha_1 = 1,45$ . Обобщенные результаты измерений качественно и количественно иллюстрируются графическими зависимостями, приведенными на рис. 8.4.

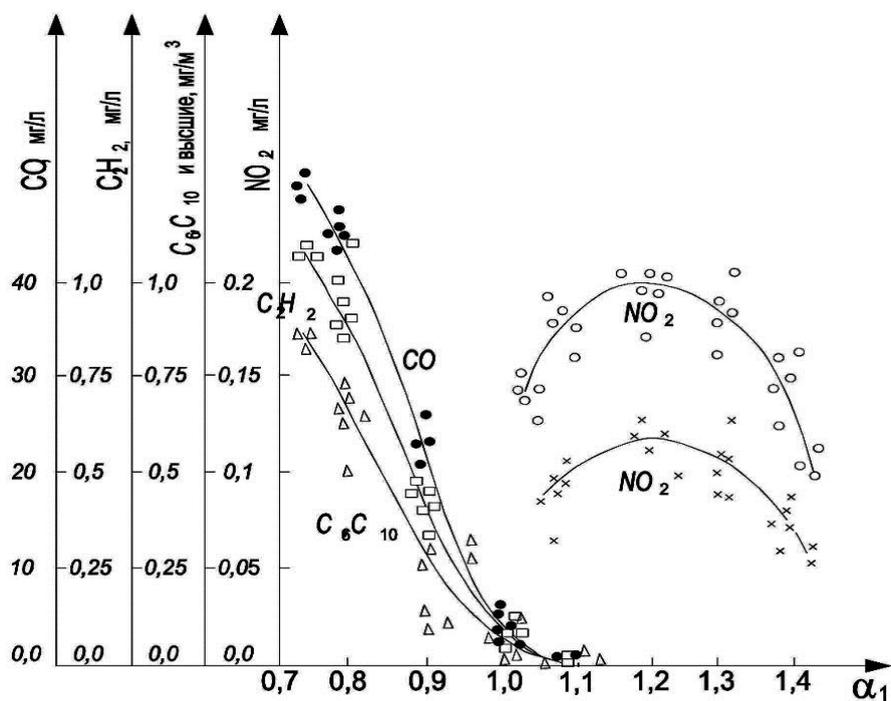


Рис. 8.4. Зависимость содержания продуктов неполного сгорания и оксидов азота от коэффициента избытка первичного воздуха (инжекционная горелка с керамическим туннелем)

Результаты исследований показывают, что полное сгорание однородной газовой смеси достигается только при коэффициенте избытка первичного воздуха не менее  $\alpha_1 = 1,05$ . При меньшем избытке начинается вполне закономерный рост концентрации СО, ацетилена и полициклических ароматических углеводородов ( $C_2$ ,  $C_6$ ,  $C_{10}$  и высших углеводородов). 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  $0,003 \text{ мкг/м}^3$  газа. При снижении  $\alpha_1$  до  $0,75 \dots 0,8$  средний выход 3,4-бензпирена возрастает в  $250 \dots 270$  раз и составляет  $0,75 \dots 0,80 \text{ мкг/м}^3$  газа. При этом в отдельных пробах содержание канцерогена было еще большим и достигало  $2,6 \text{ мкг/м}^3$  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 (см. рис. 8.4). Верхняя кривая соответствует сжиганию газа в теплоизолированной камере при температуре  $1250 \dots 1300 \text{ }^\circ\text{C}$  и объемной плотности теплового потока в топке  $300 \dots 350 \text{ кВт/м}^3$ . Время пребывания газов в топке составляло примерно 2 с. Характер этой кривой свидетельствует, что максимальный выход  $\text{NO}_x$  соответствует коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,2$  и быстро снижается при его увеличении или уменьшении.

Нижняя кривая получена при сжигании газа в неизолированной топке, где сгорание происходит при температуре  $850 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$  и объемной плотности теплового потока в топочной камере  $110 \dots 120 \text{ кВт/м}^3$ . Время пребывания газов в топке при этих условиях составляло  $6 \dots 7$  с. Значительное количество  $\text{NO}_x$  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 значениях коэффициента избытка 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 или тангенциальная и улиточная подача воздуха в зону смешения (см. рис. 7.8).

Горелки среднего давления типа ГНП (горелки среднего и низкого давления для сжигания природного или сжиженного газа, разработаны в институте «Теплопроект», Москва) 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, а) в виде мелких высокоскоростных струй. Она устанавливалась в экспериментальной топочной камере с туннелем длиной и диаметром  $2,5d$ .

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  $0,12$  мкг/м<sup>3</sup> газа, в отдельных пробах возрастая до  $0,34$  мкг/м<sup>3</sup> 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 водо-

род, а средний выход 3,4-бензпирена уменьшался в 20...25 раз и составлял 0,005 мкг/м<sup>3</sup> 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 г/м<sup>3</sup>.

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

Особое внимание было уделено сравнению конструктивных и технологических характеристик дутьевых горелок: способа раздачи газа, длины участка смешения, угла наклона лопаток завихрителя и температуры воздуха. Исследования проводились на горелках ЦКТИ (газомазутная горелка большой производительности, разработана в «НПО ЦКТИ им. И. И. Ползунова») с центральной (см. рис. 7.6, а) и периферийной (см. 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  $q_3$ , используемый в тепловом балансе котельных агрегатов (см. гл. 9). Результаты получены на горелках с газовыпускными отверстиями диаметром 7,5 мм при угле наклона лопаток воздушного регистра 60°. Расход газа составлял 200 м<sup>3</sup>/ч, а объемная

плотность теплового потока в топочной камере – около  $1,5 \text{ МВт/м}^3$ . Воздух подогревался до температуры  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пробы на анализ отбирались из сечения камеры, расположенного на расстоянии  $2 \text{ м}$  от амбразуры горелки.

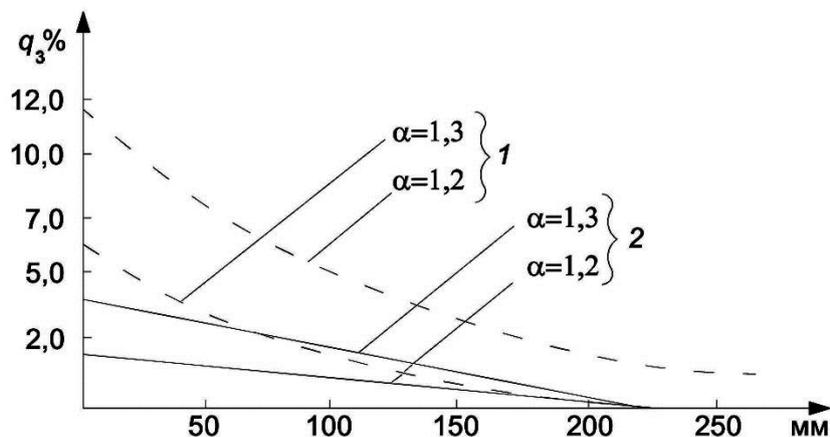


Рис. 8.5. Зависимость потерь теплоты от химического недожога  $q_3$  от длины камеры смешения и коэффициента избытка воздуха: 1 – горелка с центральной раздачей струй газа; 2 – горелка с периферийной раздачей струй газа

Приведенные данные однозначно показывают, что удлинение участка предварительного смешения газа с воздухом снижает показатели химического недожога для обоих типов горелок. При одинаковой длине участка смешения химический недожог 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 химического недожога, несмотря на достаточно значительную длину участка предварительного смешения. Снижение коэффициента избытка воздуха до  $\alpha_1 = 1,1$  при прочих равных условиях приводит в горелке с центральной раздачей газа к увеличению значения химического недожога до  $1,5 \%$ , тогда как на горелке с периферийным подводом газа он не превышает  $0,4 \%$ .

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 раздачей воздуха и до  $q_3 = 1,2 \%$  – с периферийной. Установлено также, что

форма и размеры газовыпускных отверстий в пределах 3...10 мм или эквивалентных им по площади щелевых отверстий не оказывают 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° 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 значений химического недожога у обоих типов горелок. При этом увеличение скорости для периферийной горелки сказывается незначительно, а для центральной – весьма сильно, повышая показатели химического недожога 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 полноту сгорания в 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 химического недожога), а также без сетки.

Особенность этих горелок – 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 позволяет изменять коэффициент избытка первичного воздуха только в узком диапазоне  $\alpha_1 = 1,05 \dots 1,10$ . 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  $10 \dots 50 \text{ мг/м}^3$ . 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 и составил в среднем  $20 \dots 30 \text{ мг/м}^3$ .

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, не соответствующих требуемому виду газового топлива, чрезмерным уменьшением или увеличением тепловой нагрузки горелок и неправильной установкой горелок, при которой продукты сгорания инжектируются вместе с воздухом внутрь смесителей.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие вредные вещества могут содержаться в продуктах сгорания газообразного топлива?
2. Что такое химический недожог?
3. Как определяют экспериментально состояние химического недожога?
4. Назовите причины появления химического недожога при сжигании газообразного топлива.
5. Какое влияние оказывают диаметр огневых отверстий и коэффициент избытка воздуха на появление химического недожога?

6. Какие канцерогенные вещества образуются в пламени?
7. Какие типы оксидов азота различают при сжигании топлива в зависимости от механизма их образования?
8. Опишите механизм образования термических оксидов азота.
9. Каковы источники и условия образования топливных оксидов азота?
10. В какой зоне и при каких условиях образуются фронтальные (быстрые) оксиды азота?
11. От каких факторов зависит полнота сгорания газа в бытовых газовых плитах?
12. Как изменяется содержание оксидов азота в продуктах сгорания газа в бытовых газовых плитах при увеличении тепловой мощности горелок?
13. Какие виды газовых горелок предпочтительно применять в бытовых газовых плитах с учетом экологических показателей?
14. Перечислите методы подавления и снижения выбросов оксидов азота при сжигании газа в промышленных тепловых установках.
15. Опишите пути повышения экологических показателей излучающих газовых горелок.

## Глава 9. РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА

При эксплуатации 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 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 гл. 3 и 5. При эксплуатации специалист располагает дополнительными данными измерений температуры отходящих газов и их состава, что дает возможность более точно определить требуемые показатели 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), применяемым в тепловых установках.

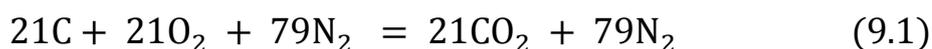
### 9.1. Максимальное содержание трехатомных газов

Сухие продукты полного сгорания углеводородных топлив наряду с азотом содержат так называемые трехатомные газы, т. е.  $\text{CO}_2$ , а в случае наличия серы в топливе – и  $\text{SO}_2$ . Суммарное содержание этих соединений в отходящих газах обозначается символом  $\text{RO}_2$ . Максимально возможное значение этого показателя  $\text{RO}_2^{\text{max}}$  соответствует сжиганию топлива в стехиометрических условиях. Рассматриваемая величина – очень важный параметр 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. Расчет продуктов полного сгорания

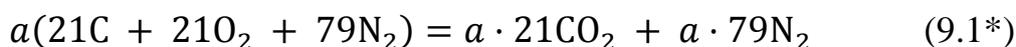
В большинстве случаев значение  $RO_2^{\max}$  зависит от состава горючей части топлива. Исключением являются топлива с высоким содержанием минеральных компонентов, особенно карбонатов. В этом случае необходимо учитывать рост концентрации  $RO_2$  в результате диссоциации карбонатов (обычно при сжигании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

Материальный баланс полного стехиометрического сгорания углерода в воздухе можно представить уравнением

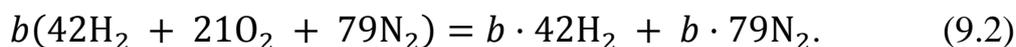


из которого следует, что  $RO_2^{\max}$  для углерода равно 21 % об. Для всех топлив с высоким содержанием углерода величина  $RO_2^{\max}$  близка к этому значению: для кокса – 20,6 % об., для антрацита – 20,2 % об.

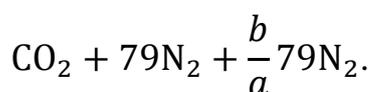
Водород в горючей части топлива снижает содержание  $RO_2$  не только во влажных, но и в сухих продуктах сгорания. Если соотношение водорода и углерода в горючей массе составляет  $b : a$ , то наряду с горением углерода в соответствии с уравнением



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 значение  $RO_2^{\max}$ . Например, для мазута (содержит около 12 % водорода)  $RO_2^{\max}$  составляет примерно 16 % об., для сжиженного углеводородного газа (до 20 % водорода) – около 14 % об., тогда как для метана (25 % водорода) – всего 11,8 % об.

При известном составе газообразного топлива значение  $RO_2^{\max}$  определяется аналитически следующим образом. Сначала по выражению (3.8) находят теоретический объем диоксида углерода в продук-

тах сгорания  $V_{\text{CO}_2}$ . Затем по формуле (3.14) вычисляют теоретический объем сухих продуктов сгорания  $V_{\text{п.с}}^{\text{т.с}}$ . Тогда  $RO_2^{\text{max}}$ , % об., можно определить по выражению

$$RO_2^{\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{п.с}}^{\text{т.с}}} 100. \quad (9.3)$$

Газовый анализ состава продуктов сгорания позволяет найти значение  $RO_2^{\text{max}}$  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 на практике с определенным избытком воздуха кислород из этого избытка целиком переходит в состав продуктов сгорания, причем каждому проценту азота сопутствует 4,76 % кислорода, т. е.  $RO_2 + N_2 + 4,76 O_2 = 100$  % об.

Это дает основание сформулировать закономерность:

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

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

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

Это дает возможность определять значение  $RO_2^{\text{max}}$  ( $CO_2^{\text{max}}$ ) для топлива неизвестного состава, имея в распоряжении только результаты анализа отходящих газов. Значительно упрощает эту процедуру использование таблицы, приведенной в прил. 1. Имея данные о значении  $CO_2^{\text{max}}$  для топлива и результаты анализа содержания  $CO_2$  в продуктах сгорания, по выражению (9.4\*) можно легко определить содержание в них кислорода  $O_2$ .

### ***9.1.2. Расчет продуктов 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  $CH_4$  и  $H_2$  свидетельствует скорее о серьезном нарушении технического состояния горелочного и топочного оборудования.

При нормальной эксплуатации газоиспользующего оборудования необходимо предусматривать только контроль содержания 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, т. е. сумма  $RO_2 + CO$ , 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  $O_2 - 0,5CO$ :

$$RO_2^{\max} = \frac{100(RO_2 + CO)}{100 - 4,76(O_2 - 0,5CO)}, \quad (9.5)$$

$$CO_2^{\max} = \frac{100(CO_2 + CO)}{100 - 4,76(O_2 - 0,5CO)}. \quad (9.5^*)$$

Следует подчеркнуть, что выражения (9.4) и (9.4\*) справедливы стехиометрически, но не учитывают уменьшения объема продуктов сгорания при окислении CO в соответствии с уравнением  $2CO + O_2 = 2CO_2$ . Если учесть этот факт, то точные выражения для определения  $RO_2^{\max}$  или  $CO_2^{\max}$  на основании газового анализа продуктов сгорания примут 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 CO в отходящих газах на основании информации о содержании  $CO_2$  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  $CO_2$  и  $O_2$  в текущем состоянии котла можно определить наличие CO в продуктах сгорания по выражению

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

В табл. 9.1 приведены значения для модификации формулы (9.7).

Таблица 9.1

Значения, необходимые для модификации формулы (9.7)

Топливо	$RO_2^{\max}$	$21/RO_2^{\max}$	Топливо	$RO_2^{\max}$	$21/RO_2^{\max}$
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	1,04
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

*Примечание.* Для природных и сжиженных углеводородных газов в формулу (9.7) 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  $21/RO_2^{\max}$  – характеристика топлива. Например, для природного газа значение этого соотношения составляет 1,78, для сжиженных газов – в среднем 1,50. Используя эти значения, выражение (9.7) можно модифицировать следующим образом:

- для природного газа

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

- для сжиженных газов

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

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

## 9.2. Расчет коэффициента избытка воздуха

Как известно (см. п. 3.2), с целью обеспечения полного сгорания топлива воздух в зону горения доставляется не в стехиометрическом количестве, а с определенным избытком  $\alpha$  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:

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

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 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, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, см. п. 3.2):

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

### 9.2.2. Продукты неполного сгорания

Как было сказано выше, 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, в которых специально создается так называемая защитная среда с целью предотвращения 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 метан и водород. По окончании технологического процесса в целях снижения экономического и экологического ущерба их дожигают. 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:

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

**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 важна газоплотность газоздушного тракта, гарантирующая отсутствие

присосов атмосферного, необогащенного 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

$$n = \frac{RO_2 + 0,5 H_2O}{RO_2}, \quad (9.12)$$

то значение коэффициента избытка воздуха (воздуха, обогащенного кислородом) можно определить по выражению

$$\alpha = \frac{O_2 + n RO_2}{n RO_2}. \quad (9.13)$$

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

При неполном сгорании топлива универсальное выражение (9.13) можно модифицировать с учетом баланса 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  $n$   
для некоторых топлив к выражению (9.13)

Топливо	$n$	Топливо	$n$
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	1,35	Кокс	1,05
Тяжелый мазут	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 по этой формуле определяют 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) объемов продуктов сгорания:

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

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  $h$  определяют с учетом потенциального содержания  $CO_2$  в отходящих газах, т. е. с учетом суммы  $CO_2 + CO + CH_4$ , что приводит к выражению

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

**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» более точное, поскольку термин «разбавление» в случае  $h < 1,0$  при неполном сгорании звучит некорректно.

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

В случае, если объем сухих продуктов сгорания мало отличается от потребности в воздухе на горение, значения  $\alpha$  и  $h$  очень близки. Такое положение вещей характерно для антрацита, кокса и других видов топлива с высоким содержанием углерода 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.

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

Напротив, при сжигании газов с высоким содержанием углеродородов или молекулярного водорода (природный, сжиженный, коксовый и нефтяной газы, 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  $h$ :

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

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

Принимая обозначение

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

выражение (9.19) можно записать в виде

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

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

Таблица 9.3

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

Топливо	Влажность по массе, %	$B$	$Y$	Топливо	Влажность по массе, %	$B$	$Y$
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
Нефтяной газ	0	1,10	0,92	Доменный газ	0	2,10	2,00

### 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 борова 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)].

Аналогично величине  $Y$  отношение объема сухих продуктов сгорания  $V_{п.с}^{т.с}$  к объему влажных продуктов сгорания  $V_{п.с}^{т.вл}$  в стехиометрических условиях – характеристика самого топлива, которая обозначается символом  $B$ :

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

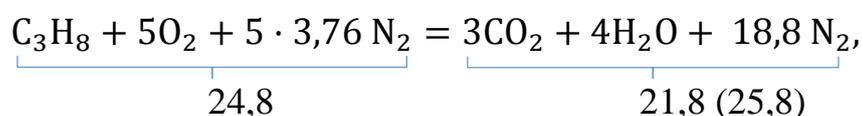
что дает возможность определить объем влажных продуктов сгорания по выражению

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

**Пример 9.1.** Сухие продукты полного сгорания пропана содержат 6,6 %  $\text{CO}_2$ , 11,0 %  $\text{O}_2$  и 82,4 %  $\text{N}_2$ . Определите значения  $\alpha$  и  $h$  при этих условиях.

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

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



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

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

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

4. По выражению (9.17) находим 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 %  $\text{CO}_2$ . Определите 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:

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

3. Вычисляем содержание азота в сухих продуктах сгорания:

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

4. По формуле (9.8) 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 (9.13) 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**

Под эффективностью теплового агрегата принято понимать отношение полезно используемой мощности  $Q_{\text{п}}$  к максимальной мощности, образуемой при горении,  $Q_{\text{г}}$ . Математически она обозначается через  $\eta$  или  $q_1$ , применяют как безразмерный вариант, так и вариант в процентах:

$$q_1 = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{г}}} - \text{безразмерная эффективность, (9.23)}$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{г}}} 100 \%. \quad (9.24)$$

Этот метод определения КПД называется методом составления *прямого теплового баланса* агрегата. Однако только на первый взгляд метод выглядит простым.

Для ряда распространенных агрегатов определение полезно использованной теплоты  $Q_{\text{п}}$  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 учитываются температура и давление выработанного пара. Но эта задача практически неразрешима для большинства промышленных печей.

Значительные трудности вызывает точное определение теплоты  $Q_{\text{г}}$ , которой 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. С учетом того, что

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 1,$$

метод предусматривает определение не теплоты  $q_1$ , получаемой 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 КПД теплового агрегата, %, определяется как

$$\eta = (1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5))100 \%. \quad (9.25)$$

### 9.4.2. Обратный тепловой баланс при сжигании топлива

Как следует 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 более точному по возможности 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, как следствие, 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. Другой способ определения  $q_2$  – использование значения жаропроизводительности топлива (см. п. 4.1.1).

Вместе с тем оба способа вряд ли могут быть рекомендованы для широкого использования в практике эксплуатации тепловых агрегатов, поэтому была разработана методика, значительно упрощающая расчеты, сохраняющая удовлетворительную точность получаемых результатов.

При эксплуатации специалист обычно располагает результатами текущего анализа продуктов сгорания по двум компонентам: кислороду и двуокиси углерода. Другой результат измерений, который всегда под рукой, – температура отходящих газов. На основании газового анализа всегда легко проверить, является ли сгорание полным. Для этого можно использовать данные табл. 9.4, которая взаимосвязанно представляет все основные параметры сгорания природного газа. Если результаты частичного анализа не соответствуют данным таблицы, то это свидетельствует о неполном сгорании, о 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  $q_2$  определяют по выражению

$$q_2 = 0,01 Z(t_{п.с} - t_{в}), \quad (9.26)$$

где  $Z$  – комплексный показатель, обобщающий информацию о теплоемкости продуктов сгорания природного газа (прил. 2);  $t_{п.с}$  – температура отходящих газов, °С;  $t_{в}$  – температура воздуха, поступающего на горение, °С.

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>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			Калориметрическая	Теоретическая	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			Калориметрическая	Теоретическая
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	4,4	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	10,7	-	-
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. Определите потери теплоты с отходящими газами.

Решение. При помощи табл. 9.4 проверяем полноту сгорания газа. Поскольку данные анализа сходятся с данными таблицы, сгорание считается полным.

По таблице из прил. 2 для температуры газов 300 °С получаем  $Z = 5,10$ . По выражению (9.26) определяем

$$q_2 = 0,01 \cdot 5,10(300 - 20) = 14,28 \text{ \%}.$$

**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. Определите потери  $q_2$ .

Решение. Отходящие газы содержат продукты неполного сгорания, поэтому табл. 9.4 не используем. Сумма продуктов сгорания, содержащих углерод, составляет

$$\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 = 9,8 \text{ \%}.$$

Для этой суммы при температуре 300 °С по таблице из прил. 2 получаем  $Z = 4,83$ . По формуле (9.26) определяем

$$q_2 = 0,01 \cdot 4,83(300 - 20) = 13,52 \text{ \%}.$$

**Потери теплоты от химического недожога.** Сравнение результатов, полученных в примерах 9.3 и 9.4, приводит к неизбежным вопросам. 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 химическим недожогом, т. е. с присутствием в отходящих газах продуктов неполного сгорания. Такое явление резко снижает эффективность использования топлива. Специалисты по эксплуатации придерживаются неукоснительного принципа: лучше повысить избыток воздуха, чем допустить химический недожог, негативные последствия которого на порядок выше.

Значение  $q_3$ , %, можно определить по выражению

$$q_3 = h(3\text{CO} + 2,5\text{H}_2 + 8,5\text{CH}_4). \quad (9.27)$$

Если значение коэффициента разбавления сухих продуктов сгорания не определялось, то для расчета  $q_3$  при сжигании природного газа можно использовать выражение

$$q_3 = \frac{35\text{CO} + 30\text{H}_2 + 100\text{CH}_4}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4}. \quad (9.28)$$

**Пример 9.5.** Сравните показатели эффективности сжигания топлива для примеров 9.3 и 9.4 с учетом потерь теплоты от химического недожога.

Решение. 1. По данным примера 9.3, при сжигании химического недожога нет, т. е.  $q_{3(9.3)} = 0$ , а

$$(q_2 + q_3)_{(9.3)} = 14,28 \text{ \%}.$$

2. По данным примера 9.4, потери теплоты от химического недожога при сжигании определим по выражению (9.28):

$$q_{3(9.4)} = \frac{35 \cdot 0,2 + 100 \cdot 0,5}{9,1 + 0,2 + 0,5} = 5,82 \text{ \%}.$$

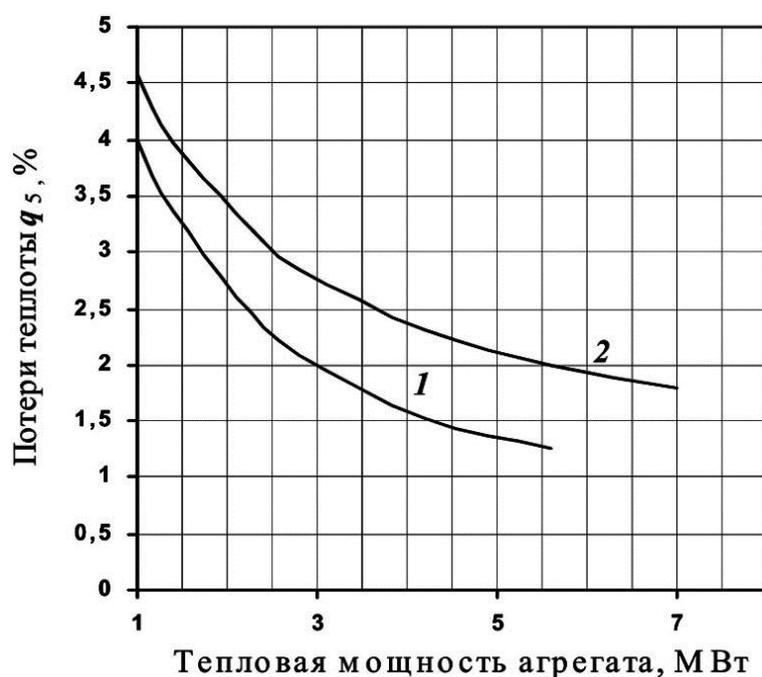
3. Сумма потерь теплоты в примере 9.4 составляет

$$(q_2 + q_3)_{(9.4)} = 13,52 + 5,82 = 19,34 \text{ \%},$$

т. е. сжигание значительно менее эффективно.

**Потери теплоты в окружающую среду.** Любой тепловой агрегат часть располагаемой теплоты неизбежно отдает 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. Для этого можно использовать данные рисунка. На нем приведены значения  $q_5$ , характерные для паровых котлов. Кривая 1 представляет потери теплоты самого котла, а кривая 2 – всего ко-

тельного агрегата вместе с так называемыми хвостовыми поверхностями нагрева (экономайзер и воздухонагреватель).



*График ориентировочного определения потерь теплоты в окружающую среду:  
1 – котел; 2 – котельный агрегат*

Для других устройств можно ориентироваться на их тепловую мощность, используя данные, полученные по кривой 1. На основе 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 (9.25) определяют коэффициент полезного действия теплового агрегата методом обратного теплового баланса.

Однако наименее достоверным параметром работы устройства остается 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 при эксплуатации.

В то же время именно значение потерь теплоты через ограждения в наименьшей мере поддается уменьшению при эксплуатации,

поскольку определяется самой конструкцией теплового агрегата. Потери теплоты с отходящими газами  $q_2$  и от химического недожога  $q_3$ , наоборот, относятся к параметрам, которые могут и должны уменьшаться с повышением качества эксплуатации и за счет применения устройств и энергосберегающих технологий, повышающих эффективность всего агрегата.

В практике сжигания топлива принято также определять качество эксплуатации агрегата по другому показателю, который не включает в себя потери теплоты в окружающую среду. Это так называемый *коэффициент использования топлива* (к. и. т.), или *КПД горения*, %:

$$\text{к. и. т.} = \eta_r = 100 - (q_2 + q_3). \quad (9.29)$$

Формула показывает, почему параметр называется КПД горения. Эксплуатируя любое устройство для сжигания топлива, следует минимизировать потери теплоты от химического недожога. В случае газового топлива обеспечивается полное сгорание, т. е.  $q_3 = 0$ . Точно так же должны быть максимально снижены потери теплоты с отходящими газами. При эксплуатации агрегата необходимо обеспечить минимально возможный избыток воздуха и как можно более низкую температуру отходящих газов, чтобы соблюдалось условие  $q_2 \Rightarrow \min$ . Поскольку трудно влиять на потери теплоты в окружающую среду, величина  $\eta_r$  показывает, насколько сам технологический процесс сжигания топлива совершенен и оптимально организован.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие трехатомные газы содержатся в продуктах полного сгорания газообразного топлива?
2. Что влияет на содержание трехатомных газов в продуктах сгорания?
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 сухих продуктов сгорания?
8. Назовите методы составления теплового баланса газоиспользующего оборудования.
9. Как определяются потери теплоты при составлении прямого и обратного теплового баланса?
10. Что такое коэффициент использования топлива?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процессов горения позволяет более полно и глубоко рассматривать прикладные вопросы теории теплоснабжения населенных мест и предприятий, в частности проектирование и эксплуатацию теплогенерирующих установок. Учебное пособие предоставляет обучающемуся необходимый набор знаний для использования в дальнейшей профессиональной деятельности.

Вместе с тем не рассмотрены в рамках учебного пособия такие вопросы, как структура факела, особенности турбулентного и ламинарного горения, высокоскоростное горение, взаимодействие факела с электромагнитным полем, использование нетрадиционного топлива, перспективы развития теории горения и др. Эти темы студент может изучить самостоятельно на основе источников, приведенных в библиографическом списке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Богомоллов, А. И.* Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А. И. Богомоллов, Д. Я. Вигдорчик, М. А. Маевский. – М. : Стройиздат, 1967. – 255 с.
2. *Воликов, А. Н.* Методы подавления выбросов оксидов азота при сжигании газа и мазута в котлах малой и средней мощности / А. Н. Воликов, А. Л. Шкаровский. – М. : ИРЦ Газпром, 1993. – 29 с.
3. ГОСТ 21204-97. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 19 с.
4. ГОСТ 25696-83. Горелки газовые инфракрасного излучения. Общие технические требования и приемка. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
5. ГОСТ 17356-89. Горелки на газообразном и жидком топливах. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 11 с.
6. ГОСТ 29134-97. Горелки газовые промышленные. Методы испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 24 с.
7. *Ионин, А. А.* Газоснабжение / А. А. Ионин. – М. : Стройиздат, 1989. – 440 с.
8. *Колиенко, А. Г.* Применение природного газа для термического обезвреживания парогазовых выбросов / А. Г. Колиенко, А. Л. Шкаровский // Газовая промышленность. Серия: Природный газ и защита окружающей среды. – М. : ВНИИЭГазпром, 1989. – Вып. 2. – С. 1 – 36.
9. *Комина, Г. П.* Газоснабжение. Горение газов : учеб. пособие / Г. П. Комина, А. Л. Шкаровский, Е. Е. Мариненко. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. – 124 с. – ISBN 978-5-98276-363-1.
10. *Мариненко, Е. Е.* Газоснабжение : учеб. пособие / Е. Е. Мариненко, Т. В. Ефремова. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. – 221 с. – ISBN 978-5-98276-207-8.
11. *Равич, М. Б.* Топливо и эффективность его использования / М. Б. Равич. – М. : Наука, 1971. – 358 с.
12. *Скафтымов, Н. А.* Основы газоснабжения / Н. А. Скафтымов. – Л. : Недра, 1975. – 343 с.
13. СНиП 42-01-2002. Газораспределительные системы. – СПб. : Деан, 2004. – 80 с. – ISBN 5-93630-374-8.
14. *Стаскевич, Н. Л.* Справочник по сжиженным углеводородным газам / Н. Л. Стаскевич, Д. Я. Вигдорчик. – Л. : Недра, 1986. – 543 с.

15. *Стаскевич, Н. Л.* Газоснабжение. Горение газов / Н. Л. Стаскевич, Г. П. Комина. – Л. : ЛИСИ, 1973. – 84 с.

16. *Стаскевич, Н. Л.* Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н. Л. Стаскевич, Г. Н. Северинец, Д. Я. Вигдорчик. – Л. : Недра, 1990. – 762 с.

17. *Фоминцева, Н. И.* Сборник задач и упражнений по курсу «Газоснабжение» / Н. И. Фоминцева. – Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2002. – 32 с.

18. *Шкаровский, А. Л.* Охрана окружающей среды / А. Л. Шкаровский. – СПб. : СПбГАСУ, 1999. – 80 с.

19. *Шкаровский, А. Л.* Основы современного теплоснабжения / А. Л. Шкаровский, В. И. Шаврин. – СПб. : СПбГАСУ, 2011. – 384 с.

20. *Szkarowski, A.* Spalanie / A. Szkarowski. – Kozalin : Politechnika Koszalin, 2009. – 152 s.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

Значения  $RO_2^{max}$  в зависимости от содержания  $O_2$  и  $RO_2$  в продуктах полного сгорания

$RO_2$ , %	$RO_2^{max}$ при $O_2$ , %																								
	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
6,2	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
6,4	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
6,6	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
6,8	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
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
7,2	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
7,4	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
7,6	-	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
7,8	-	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
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
8,2	-	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
8,4	-	-	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
8,6	-	-	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
8,8	-	-	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
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
9,2	-	-	-	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
9,4	-	-	-	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
9,6	-	-	-	-	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
9,8	-	-	-	-	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
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
10,2	-	-	-	-	-	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

10,4	-	-	-	-	-	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
10,6	-	-	-	-	-	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
10,8	-	-	-	-	-	-	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
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
11,2	-	-	-	-	-	-	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
11,4	-	-	-	-	-	-	-	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
11,6	-	-	-	-	-	-	-	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
11,8	-	-	-	-	-	-	-	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
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
12,2	-	-	-	-	-	-	-	-	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
12,4	-	-	-	-	-	-	-	-	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
12,6	-	-	-	-	-	-	-	-	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
12,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
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
13,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
13,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
13,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
13,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
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
14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
14,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
14,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
14,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
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
15,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,8	24,8	23,9	23,1	22,3	21,6	20,8	20,2	19,6	19,0	18,5	18,0
15,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,2	25,2	24,2	23,4	22,6	21,9	21,2	20,5	19,9	19,2	18,7	18,2
15,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,5	25,4	24,5	23,7	22,9	22,2	21,4	20,8	20,1	19,4	18,9	18,4
16,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,7	24,8	24,0	23,2	22,4	21,6	21,0	20,3	19,7	19,2	18,7

**Приложение 2**

**Значения коэффициента Z для природного газа**

Содержание CO <sub>2</sub> + CO + + CH <sub>4</sub> в продуктах сгорания, % об.	Z в интервале температур, °C							
	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	-	-

Окончание

Содержание CO <sub>2</sub> + CO + + CH <sub>4</sub> в продуктах сгорания, % об.	Z в интервале температур, °C							
	0...250	250...350	350...500	500...700	700...900	900...1100	1100...1300	1300...1600
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	-	-
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	-	-	-	-	-	-	-

*Примечание.* Использование продуктов сгорания с пониженным содержанием CO<sub>2</sub> характерно для сушильных установок, в которых теплоносителем являются продукты сгорания, разбавленные воздухом.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
Глава 1. ГАЗООБРАЗНОЕ ТОПЛИВО .....	5
1.1. Состав горючих газов .....	5
1.2. Классификация горючих газов .....	7
<i>Контрольные вопросы</i> .....	9
Глава 2. РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ .....	10
2.1. Стехиометрические уравнения .....	10
2.2. Кинетика реакции горения .....	11
2.3. Цепной механизм процесса горения .....	12
2.4. Тепловой эффект реакций горения .....	15
<i>Контрольные вопросы</i> .....	18
Глава 3. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ .....	19
3.1. Теоретический объем воздуха для горения .....	19
3.2. Коэффициент избытка воздуха .....	21
3.3. Объем продуктов сгорания .....	23
<i>Контрольные вопросы</i> .....	25
Глава 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ .....	26
4.1. Температура горения .....	26
4.1.1. Жаропроизводительность .....	26
4.1.2. Калориметрическая температура .....	27
4.1.3. Теоретическая температура .....	31
4.1.4. Действительная температура горения .....	34
4.2. Температуры воспламенения и самовоспламенения .....	35
4.3. Пределы воспламенения .....	38
<i>Контрольные вопросы</i> .....	45
Глава 5. ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ .....	47
5.1. Горение в неподвижной среде .....	47
5.1.1. Основные понятия .....	47
5.1.2. Нормальная скорость распространения пламени .....	49
5.1.3. Детонационное горение .....	52
5.2. Горение в ламинарном потоке .....	54

5.3. Горение в турбулентном потоке.....	56
<i>Контрольные вопросы</i> .....	61
<b>Глава 6. УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ</b> .....	62
6.1. Основные понятия устойчивости горения .....	62
6.2. Явление отрыва пламени .....	64
6.3. Явление проскока пламени .....	66
6.4. Принципы стабилизации пламени .....	72
<i>Контрольные вопросы</i> .....	74
<b>Глава 7. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ</b> .....	75
7.1. Принципы эффективного и безопасного сжигания газов .....	75
7.2. Конструкции горелок .....	80
7.2.1. Основные требования к газогорелочным устройствам и их технические характеристики.....	81
7.2.2. Классификация газовых горелок .....	82
7.2.3. Горелки бытовых газовых плит .....	84
7.2.4. Горелки отопительных и промышленных устройств .....	85
<i>Контрольные вопросы</i> .....	95
<b>Глава 8. ОХРАНА АТМОСФЕРЫ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА</b> .....	97
8.1. Продукты неполного сгорания.....	97
8.2. Оксиды азота .....	101
8.2.1. Термические оксиды азота.....	102
8.2.2. Топливные оксиды азота .....	102
8.2.3. Фронтальные оксиды азота .....	103
8.3. Подавление образования вредных веществ .....	103
8.3.1. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании газа в бытовых газовых плитах.....	104
8.3.2. Образование и подавление вредных выбросов при сжигании газа в котлах и промышленных печах ....	108
<i>Контрольные вопросы</i> .....	116
<b>Глава 9. РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА</b> .....	118
9.1. Максимальное содержание трехатомных газов .....	118
9.1.1. Расчет продуктов полного сгорания .....	119

9.1.2. Расчет продуктов неполного сгорания .....	120
9.2. Расчет коэффициента избытка воздуха .....	123
9.2.1. Продукты полного сгорания .....	123
9.2.2. Продукты неполного сгорания .....	124
9.3. Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания ....	126
9.3.1. Связь между коэффициентом избытка воздуха и коэффициентом разбавления сухих продуктов сгорания .....	127
9.3.2. Влажные продукты сгорания.....	128
9.4. Эффективность использования топлива.....	130
9.4.1. Методы составления теплового баланса .....	130
9.4.2. Обратный тепловой баланс при сжигании топлива .....	132
9.4.3. Коэффициент эффективности сжигания топлива .....	136
<i>Контрольные вопросы</i> .....	137
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	139
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	140
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	142

*Учебное издание*

СТАРИКОВ Альберт Николаевич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Учебное пособие

Редактор Т. В. Евстюничева  
Технический редактор С. Ш. Абдуллаева  
Корректор Н. В. Пустовойтова  
Компьютерная верстка Е. А. Кузьминой  
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 02.12.19.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 8,60. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.