

Г. Ф. КНОРРЕ

# ЧТО ТАКОЕ ГОРЕНИЕ?

МОСКВА 1955

Г. Ф.  
КНОРРЕ  
ЧТО  
ТАКОЕ  
ГОРЕНИЕ

Г. Ф. КНОРРЕ

# ЧТО ТАКОЕ ГОРЕНИЕ?

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ  
ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРОЦЕССА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

*В книге излагаются средствами, доступными широкому кругу читателей, физические основы явлений, характерных для процессов горения различных топлив — газообразных, жидких и твердых. Даются основные понятия, связанные с современными представлениями о протекании топочных процессов, которые относятся к числу наиболее сложных по совокупности одновременно действующих на процесс факторов.*

*Книга предназначена для читателей, мало подготовленных к чтению специальной литературы по топочным процессам, и ставит своей целью популяризацию проблематики этой важной отрасли современной техники.*

---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга написана не для легкого чтения. Она требует от читателя внимательного и вдумчивого отношения ко всему, что здесь излагается. Автор ставил себе целью популяризацию представлений о природе рассматриваемых явлений не за счет упрощения этих представлений, а за счет упрощения приемов изложения материала, выражающего сущность крайне сложных процессов, которые мы называем горением.

Немало еще упрощенных представлений о ходе процессов горения распространено и в технике и в быту, но они чаще всего совершенно бесплодны, так как внушают необоснованное мнение о мнимой простоте этих процессов, скользя по поверхности описываемых явлений и проходя мимо главного.

Пытаясь изложить сложную совокупность явлений, представляющих физическую сущность огневых процессов, средствами, доступными и читателю, не вполне подготовленному к кругу рассматриваемых вопросов, автор старается постепенно усилить и те средства, при помощи которых можно было бы перейти от популярных форм изложения материала к восприятию обычной технической литературы, если проблематика, рассматриваемая в этой книге, интересует читателя в достаточной мере. С этой целью, помимо подстрочных примечаний обычного характера, в конце книги даются необходимые или желательные по ходу изложения дополнительные пояснения, направленные к тому, чтобы напомнить забытые или недостаточно четко воспринятые физические понятия и определения.

Вместе с тем автор делает еще одну попытку систематизировать многие детали представлений об огневых процессах, которые пока еще не получили общего признания и разбросаны в различных примечаниях или попутных высказываниях.

С этой точки зрения книга, быть может, покажется интересной и для специалистов в области огне-техники.

Этот нелегкий для себя труд автор предпринял в память утраченного верного спутника его долгой жизни.

*Автор*

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава первая. Физическое воздействие воздушной атмосферы на протекающие в ней тепловые процессы . . . . .</b>	<b>7</b>
1. Строение земной воздушной атмосферы . . . . .	7
2. Тепловые перемещения воздуха в атмосфере . . . . .	8
3. Тепловые перемещения воздуха в помещениях . . . . .	10
4. Естественная трубная тяга . . . . .	12
5. Механическая (искусственная) тяга . . . . .	18
<b>Глава вторая. Химическое воздействие воздушной атмосферы на протекающие в ней окислительные процессы . . . . .</b>	<b>23</b>
1. Состав воздуха . . . . .	23
2. Окислительные процессы на земле . . . . .	25
3. Процессы гниения отмирающих органических материалов . . . . .	27
4. Окислительные процессы живых организмов . . . . .	29
5. Что называется процессом горения? . . . . .	32
6. Топливо и окислитель . . . . .	33
7. Что такое очаг горения? . . . . .	36
<b>Глава третья. Как строятся и разрушаются топливные молекулы? . . . . .</b>	<b>38</b>
1. Строение органических молекул метанового ряда . . . . .	38
2. Углеводы, жиры и белки . . . . .	41
3. Разрушение органических молекул при повышенной температуре . . . . .	45
4. Разрушение органических молекул при постепенном окислении . . . . .	48
5. Тепловая газификация топлива перед сгоранием . . . . .	51
<b>Глава четвертая. Теплопроизводительность топлива . . . . .</b>	<b>55</b>
1. Чем больше окислено топливо, тем меньше в нем запас тепла . . . . .	55
2. Теплотворная способность топлива . . . . .	57
3. Расчетные данные по теплотворной способности топлив . . . . .	59
<b>Глава пятая. Что управляет скоростью процессов горения? . . . . .</b>	<b>62</b>
1. Повышение температуры — главный ускоритель химических реакций . . . . .	62
2. Чрезмерно высокие температуры препятствуют образованию молекул . . . . .	65
3. Реакция горения водорода имеет цепной характер . . . . .	66
4. Окисление углерода сопровождается побочными реакциями . . . . .	68
<b>Глава шестая. Скорости горения газообразных горючих смесей . . . . .</b>	<b>72</b>
1. Избытки окислителя или топлива в смеси тормозят скорость горения . . . . .	72
2. Скорость нормального распространения фронта пламени . . . . .	75
3. Сравнение хода кривых температуры и нормальной скорости горения . . . . .	76
4. Влияние характера движения потока горючей смеси на ее горение . . . . .	81

Глава седьмая. Смесеобразовательные процессы . . . . .	85
1. Распространение газовых молекул в объемах за счет непрерывного движения . . . . .	85
2. Образование горючих смесей за счет молекулярной диффузии . . . . .	87
3. Горение ускоряется при более быстром смесеобразовании за счет молярной диффузии . . . . .	92
4. Различные по характеру протекания процесса области горения . . . . .	93
Глава восьмая. Температура горения . . . . .	98
1. Состав топочных газов и их суммарная теплоемкость . . . . .	98
2. Теоретическая и действительная температуры сгоревших топочных газов . . . . .	102
3. Характерный ход температурной кривой в топочной камере . . . . .	105
4. Воспламенение и потухание в зависимости от соотношений между приходом и расходом тепла . . . . .	109
Глава девятая. За что держится пламя? . . . . .	116
1. На косом фронте пламя удерживается только при непрерывном поджигании . . . . .	116
2. Как организовать непрерывное поджигание? . . . . .	119
3. Обратный ток горючих топочных газов — отличный поджигатель горючей смеси . . . . .	124
4. Положительное и отрицательное воздействия окружающей среды на очаг горения . . . . .	128
5. Топочное устройство является сочетанием системы горелок с топочной камерой . . . . .	132
6. Приемы усиления смесеобразовательных процессов в топочной камере . . . . .	138
Глава десятая. Процессы горения жидкого топлива . . . . .	143
1. Горение жидкого топлива в слое . . . . .	143
2. Капельный способ сжигания жидкого топлива . . . . .	147
3. Сжигание распыленного жидкого топлива . . . . .	149
4. Открытая горелка, устойчиво работающая на ураганном ветре . . . . .	153
5. Циркуляционный вихрь может служить устойчивой зоной предварительной газификации . . . . .	154
Глава одиннадцатая. Слоевые процессы горения твердого топлива . . . . .	157
1. Костер — устойчивый очаг горения твердого топлива . . . . .	157
2. Огневой процесс в камине и комнатных печах . . . . .	159
3. Слоевые промышленные топки для твердого топлива . . . . .	163
4. Как ведет себя в огневом процессе отдельная частица твердого топлива? . . . . .	165
5. Ход процесса внутри слоя горящего топлива . . . . .	167
6. Ход процесса в единичном межкусковом канале слоя . . . . .	169
7. Слой представляет собой систему многочисленных газовых горелок . . . . .	171
8. Различные схемы питания слоевых топок . . . . .	174
9. Роль топочной камеры в слоевых топках . . . . .	179
Глава двенадцатая. Сжигание твердого топлива на лету . . . . .	183
1. Факельное горение пылеобразного твердого топлива . . . . .	183
2. Огневая работа пылеугольных горелок . . . . .	186
3. Развитие огневого процесса внутри факела . . . . .	189
4. Горение в сильно закрученных потоках газа . . . . .	194
5. Ход огневого процесса в высокофорсированной циклонной камере . . . . .	196
Дополнительные пояснения к тексту . . . . .	199

---

## Глава первая

# ФИЗИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ПРОТЕКАЮЩИЕ В НЕЙ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

### 1. СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЫ

Земная поверхность, на которой мы живем и действуем, представляет собой дно громадного воздушного океана, глубина которого исчисляется по крайней мере сотнями километров. В верхних слоях его воздух весьма сильно разрежен, а чем ближе к поверхности земли, тем он становится все плотнее и, следовательно, тяжелее.

Самая плотная часть его, прилегающая непосредственно к земле и простирающаяся вверх примерно на высоту 11—15 км, носит название «тропосферы» («шарообразно изогнутая оболочка»).

В тропосфере сосредоточено более трех четвертей всей массы воздуха. Для нее характерно постепенное убывание температуры воздуха от повышенной у самой земли (в среднем плюс 10° С) до весьма низкой в самой верхней части (в среднем минус 57° С) с соответствующими колебаниями между летним и зимним временем и на различных широтах земли.

Выше тропосферы расположена так называемая «стратосфера» («покровная оболочка»), простирающаяся кверху до 30—35 км, считая от уровня земли. Воздух в стратосфере находится уже в сильно разреженном состоянии и имеет по всей высоте практически одинаковую температуру (в среднем минус 57° С).

Еще выше расположена пока мало изученная область, называемая «ионосферой» («сфера блуждающих частичек газа»), в которой газовые частицы ионизированы, т. е. несут на себе электрический заряд. В этой части земной газовой оболочки температура газа опять начинает возрастать, доходит на высоте 50 км от уровня земли в среднем до плюс 75° С, затем снова падает до минус 100° С и, наконец, на высоте 85 км опять начинает подниматься, достигая на высоте 120 км от уровня земли плюс 100° С. Предполагается, что на высоте 200 км она становится равной многим сотням градусов. Все это схематически показано на фиг. 1.

Все предметы и организмы на земле находятся в непосредственном взаимодействии с этим окружающим нас воздушным океаном, который в целом мы называем «атмосферой»<sup>1\*</sup>. Взаимодействие это имеет двоякий характер: физический и химический.

Говоря о физическом взаимодействии, следует прежде всего напомнить, что воздушная атмосфера давит своей тяжестью на все предметы, которые в ней находятся, подобно тому как, скажем, морская вода давит на все, что находится внутри морского водного пространства, и сильнее всего — на то, что оказывается на самом дне моря.

Вес воздушной атмосферы огромен и равен 5,3 млн. млрд. тонн. Вся эта сила, давящая непосредственно на земную поверхность, создает давление, равное 10,33 тонны на каждый квадратный метр<sup>2</sup>.

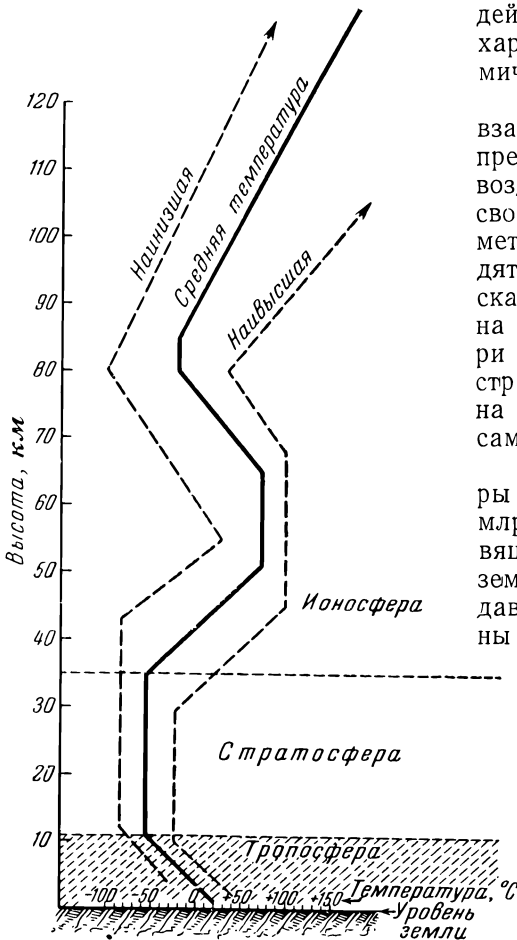
Следует, однако, не забывать, что давление воздушной атмосферы, как это хорошо известно, может колебаться в некоторых пределах в зависимости от состояния погоды. В сырую погоду к воздуху примешивается значительное количество водяных паров, удельный вес которых примерно

в 1,5 раза меньше удельного веса сухого воздуха<sup>3</sup>. Поэтому влажный воздух обладает пониженным удельным весом и атмосферное давление в сырую погоду соответственно уменьшается<sup>4</sup>.

## 2. ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВОЗДУХА В АТМОСФЕРЕ

Вся огромная масса воздуха, окружающего землю, находится в непрерывном движении, которое вызывается воздействием возмущающих ее покой сил, если эти силы в каком-либо месте

\* Цифры в индексе указывают соответствующий раздел в дополнительных пояснениях в конце книги.



Фиг. 1. Изменение температуры воздуха в различных слоях воздушной атмосферы по мере удаления от поверхности земли.

над земной поверхностью не оказываются временно уравновешенными.

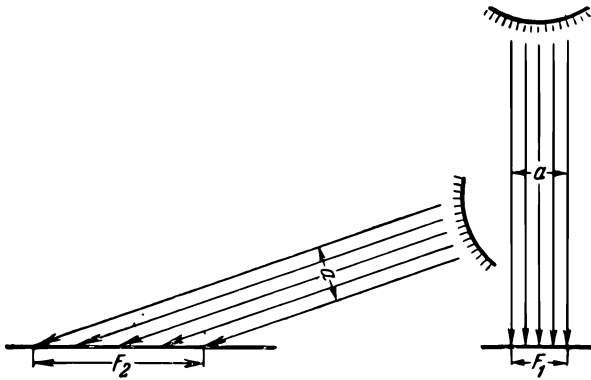
Равновесие на любых весах сохраняется, как известно, только в том случае, когда на обеих чашках находятся грузы одинакового веса, и немедленно нарушается при малейшем перевесе на одной из чашек. Избыточная тяжесть заставляет перегруженную чашку опускаться, а недогруженную подниматься под напором более тяжелой. Совершенно таким же образом два соседних столба воздушной атмосферы, если они, например, прогреты до разных температур и, следовательно, обладают разными удельными весами, не могут уравновесить друг друга. Под напором соседних, более холодных, т. е. более тяжелых, масс воздуха, прогретый, т. е. более легкий, воздух будет вытесняться («всплывать») вверх, уступая свое место внизу холодному воздуху, подобно тому как ртуть, вылитая в чашку с водой, будучи тяжелее воды, вытесняет ее вверх, занимая нижнее положение.

Опустившись до более теплой поверхности земли, холодный воздух сам прогревается, и вследствие расширения от нагрева уменьшается его удельный вес. Тогда он в свою очередь вытесняется вверх следующими, еще непрогретыми окружающими его массами тяжелого воздуха. Такое перемещение воздушных масс вверх и вниз неизбежно приводит и к соответствующему горизонтальному их перемещению вдоль поверхности земли, вызывая явления, которые мы называем ветрами и которые будут поддерживаться до тех пор, пока сохраняется разность плотностей (удельных весов) в различных соседних участках воздушной атмосферы.

Основная причина всех этих значительных перемещений воздуха лежит в неравномерности прогрева самой поверхности земли, что объясняется особенностями теплообмена между этой поверхностью, воздухом и солнцем. Самый факт того, что в тропосфере нижние слои воздуха теплее верхних, показывает, что тепло передается от земной поверхности к воздуху, а не наоборот. Действительно, солнечные лучи проникают через тропосферу до самой поверхности земли, прогревая эту поверхность (что мы хорошо знаем по личному опыту), так как сухой воздух не обладает способностью задерживать в себе эти лучи в сколько-нибудь заметном количестве. В этом смысле и «теплопрозрачен». Сам же воздух нагревается в основном уже от соприкосновения с этой прогретой поверхностью. Земная поверхность, поглощая значительную долю падающих на нее солнечных лучей, некоторую часть из них отражает, а также самостоятельно излучает в мировое пространство. Но и эти лучи обратного излучения и отражения в основном перехватываются содержащимися в воздухе водяными парами, которые, как все сложные, многоатомные газы (например, углекислота), обладают способностью частично поглощать тепловые лучи<sup>5</sup>.

Интенсивность (скорость) прогрева отдельных участков земной поверхности зависит прежде всего от угла падения солнечных

ных лучей на эту поверхность. Чем больше скошен пучок падающих лучей, тем большую поверхность он покрывает и тем меньше, следовательно, приходится тепла на каждый квадратный метр этой поверхности (фиг. 2). По этой причине косые лучи греют землю слабее прямых, что мы и наблюдаем утром и вечером по сравнению с полднем. Эта же причина вызывает интенсивнейший прогрев земли у экватора и слабейший — в полярных областях.



Фиг. 2. Два одинаковых по количеству тепла пучка солнечных лучей, толщиной  $a$  м, падая на землю под прямым (справа) и косым (слева) углами, покрывают разные по величине поверхности. Поверхность  $F_2$ , покрытая сильно скошенным пучком, значительно больше поверхности  $F_1$ , покрытой прямым пучком. При прямом пучке лучи ложатся на поверхность земли плотнее и сильнее прогревают ее.

Кроме того, интенсивность прогрева земной поверхности зависит от ее состояния: голая земля прогревается быстрее, чем покрытая растительностью, водяная поверхность — медленнее, чем сухая земля.

Все эти причины и вызывают неизбежную неравномерность прогрева отдельных участков воздуха, прилегающих к поверхности земли, возникновение разницы в их удельных весах (плотностях) и, как следствие, соответствующие перемещения воздушных масс в различных направлениях<sup>6</sup>.

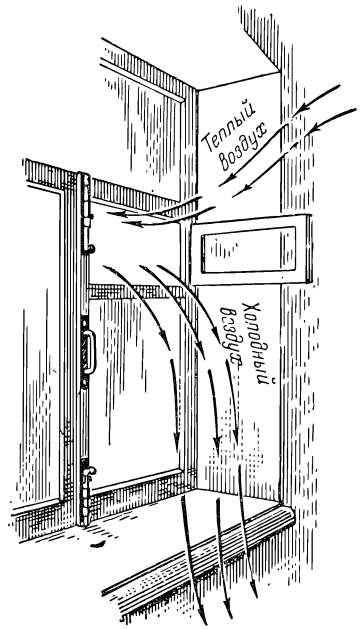
### 3. ТЕПЛОВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Подобные перемещения воздушных масс, происходящие в крупных масштабах во всей тропосфере, повторяются в малых масштабах непрерывно вокруг нас в любой ограниченной части окружающего нас воздушного пространства. Слабые движения воздушных потоков иногда даже не замечаются нами, хотя и играют немаловажную роль в условиях нашего существования.

Когда в нагретой комнате температура оказывается выше температуры наружного воздуха, немедленно через все видимые и невидимые неплотности устанавливается непрерывное перемещение наружного воздуха в комнату и комнатного — наружу. Если в такой комнате отворить форточку, то через нижнюю ее часть начнет втекать тяжелый холодный воздух в комнату, падая вниз, к полу и вытесняя кверху теплый легкий комнатный воздух, который под напором этого холодного воздуха начнет удаляться из комнаты через верхнюю часть форточки. В этом легко убедиться по направлению дыма папиросы, если приложить ее поочередно к верхней и нижней частям открытой форточки (фиг. 3).

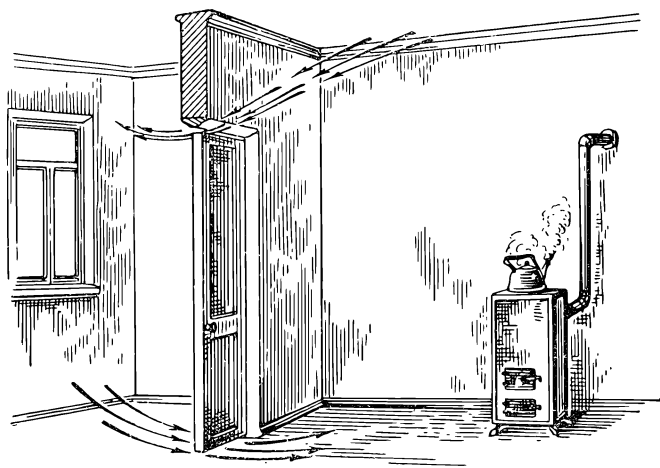
Такие же токи воздуха возникают и между двумя соседними помещениями, если воздух в них нагрет до различной температуры: через нижнюю щель смежной двери тяжелый воздух холодного помещения начнет перетекать в помещение теплое, вытесняя из него более легкий воздух и заставляя последний через верхнюю дверную щель уходить в верхнюю часть холодного помещения (фиг. 4).

Если в самой комнате находится предмет, обладающий повышенной температурой (например, нагретая стенка печи или поверхность отопительного радиатора, работающая электроплитка или даже тело находящегося в комнате человека), немедленно возникнет движение воздуха, вызванное его местным прогревом от этого предмета. Прогревшаяся часть воздуха начнет всплывать кверху под напором более тяжелых окружающих воздушных масс, которые, постепенно занимая ее место и в свою очередь прогреваясь, сами всплывают за ней. Теплый поток воздуха, поднявшись кверху, будет отдавать свое тепло соседним слоям менее нагретого воздуха, потолку и стенам и, охлаждаясь и тяжелея, снова падать вниз. Такое круговое движение, называемое циркуляцией, будет продолжаться до тех пор, пока в комнате будет сохраняться источник нагрева. Подобная циркуляция способствует скорейшему выравниванию температуры комнаты и ее общему прогреву. Интенсивность такой циркуляции зависит от разности температур между источни-



Фиг. 3. Движение воздуха через открытую форточку: наружный холодный воздух проталкивается через нижнюю часть отверстия в комнату, падает книзу, вытесняя теплый воздух комнаты наружу через верхнюю часть отверстия форточки.

ком нагрева, окружающими его предметами и самим воздухом, заполняющим комнату, а также от количества тепла, выделяемого этим источником в единицу времени (в технике за единицу времени принимается час).



Фиг. 4. Переток воздуха из холодной, неотапливаемой комнаты в теплую через нижнюю дверную щель и из теплой в холодную через верхнюю щель.

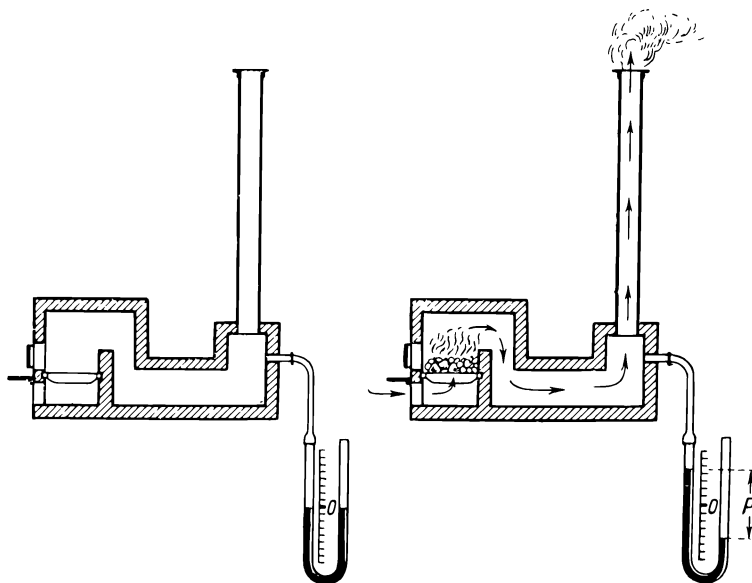
На этом свойстве естественного перемещения теплых (легких) и холодных (тяжелых) воздушных масс основана и так называемая естественная трубная тяга, играющая огромную роль в вентиляционной и топочной технике.

#### 4. ЕСТЕСТВЕННАЯ ТРУБНАЯ ТЯГА

Представим себе топочное устройство, к которому, как обычно, присоединена достаточно высокая дымовая труба (фиг. 5). Пока топка не топится, труба заполнена обычным атмосферным воздухом; давление его в топочном пространстве — со стороны топочной дверцы и со стороны трубы — окажется равным одной атмосфере (1 ат), т. е. уравновешенным с обеих сторон, и движения воздуха через топочное пространство не будет наблюдаться. Если же топка работает, то труба окажется заполненной горячими легкими газами, давление которых (вместе с остальной частью атмосферы) навстречу напорающему через топочное отверстие холодному, более тяжелому воздуху окажется уже меньше полной атмосферы. Вследствие этого имеющий давление полной атмосферы холодный наружный воздух начнет вытеснять горячие газы через трубу наружу. В результате этого установится одностороннее движение газозвудушного потока, обеспечивающее подачу необходимого для горения свежего воздуха в топку

и удаление из топки топочных газов в атмосферу. На пути движения этих горячих газов размещают те или иные нагревательные приборы, назначением которых является использование выделенного в топке тепла.

Развиваемая трубой сила тяги измеряется в миллиметрах водяного столба при помощи приборов, носящих название тяго-



*a* — топка не работает.

*б* — топка работает.

Фиг. 5. Показания тягомера при неработающей и работающей топке. Движение газовоздушного потока через топку, газоход и трубу при горячей трубе.

меров. Простейший тягомер представляет собой согнутую в виде шпильки стеклянную трубочку, перевернутую концами кверху и частично заполненную некоторым количеством воды. Один конец такой трубочки остается открытым наружу и на воду с этой стороны давит полная воздушная атмосфера, а другой конец присоединен к нижней части внутренней полости дымовой трубы. С этой стороны вода испытывает давление, несколько меньшее атмосферного, за счет уменьшенного давления легких горячих газов, заполняющих дымовую трубу. Трубочка тягомера, частично заполненная водой, представляет собой своеобразные водяные весы. Если бы давление на воду с обеих сторон было одинаковым, то уровни воды в обоих коленах трубочки стояли бы ровно (фиг. 5, *a*). При перевесе же со стороны наружного воздуха вода из наружного колена будет под напором атмосферного воздуха выжиматься в колено, присоединенное к дымовой трубе, до тех пор, пока поднявшийся в этом колене добавочный столбик воды

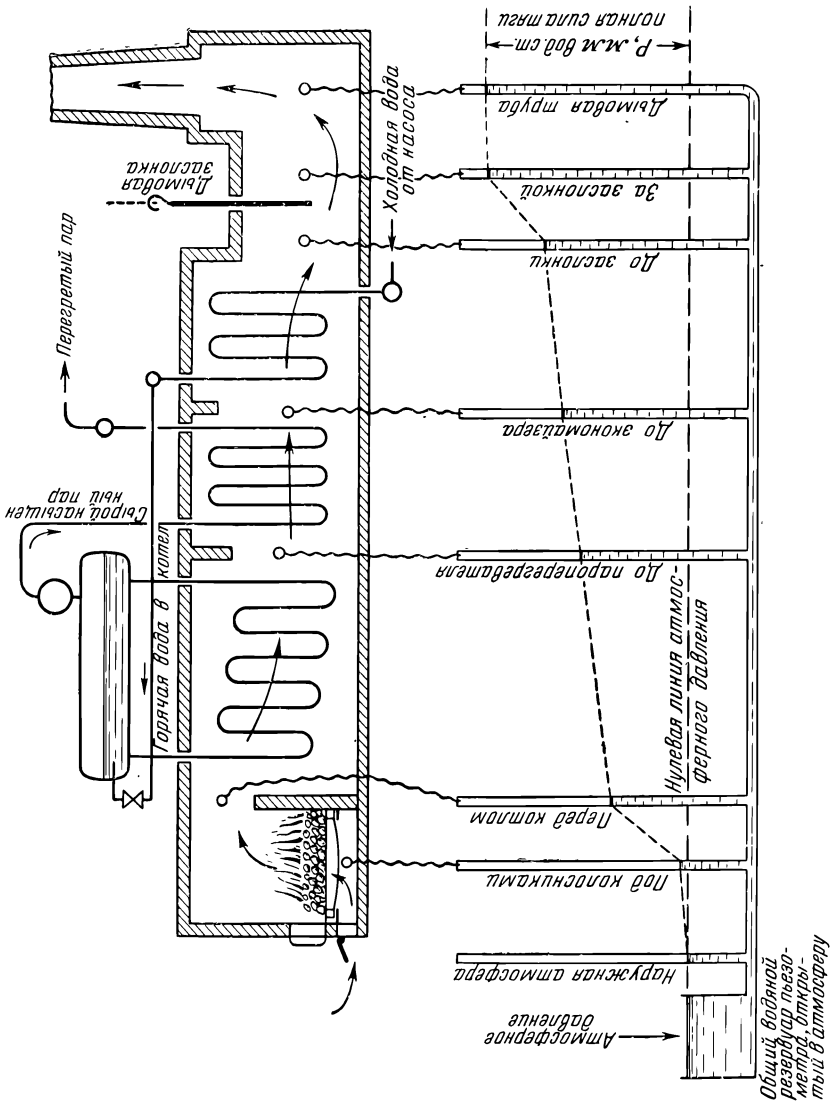
не добавит своего веса — настолько, насколько его не хватало со стороны горячих газов, — чтобы уравновесить полное атмосферное давление. При этом оба уровня воды — опущенный в наружном колене и приподнятый в колене, соединенном с трубой, — придя в равновесие, остановятся. Разница в уровнях воды, подсчитанная в миллиметрах водяного столба (*мм вод. ст.*), и будет указывать развиваемую трубой силу тяги или, что то же, развиваемую разность давлений со стороны наружного воздуха и горячих газов дымовой трубы (в  $\text{кг/м}^2$ , численно равных *мм вод. ст.*).

Эта разница давлений и должна обеспечить движение газов по дымоходам с такой скоростью, при которой в топку будет поступать необходимое количество свежего воздуха и удаляться из нее соответствующее количество топочных газов.

Развиваемый таким способом напор (разность давлений) тратится частично на создание самой скорости движения газовоздушного потока, а в значительно большей части — и на преодоление сопротивлений этому движению по топочному устройству и дымоходам. Если по всему пути движения газовоздушного потока расставить тягомеры, то по высоте возникающих в них добавочных столбиков воды можно судить о том, где и какая часть силы тяги тратится на преодоление имеющихся в данном устройстве местных сопротивлений. На фиг. 6 схематически показана котельная установка с тягомерами, присоединенными к различным участкам дымоходов по пути движения топочных газов. Добавочные столбики воды в тягомерах растут от топки к дымовой трубе, которая является «источником» силы тяги. Общую силу тяги, развиваемую трубой, показывает последняя трубочка с наибольшей высотой водяного столба. Трубочки промежуточных тягомеров фиксируют разрежение в отдельных участках дымоходов. Наименьшее разрежение возникает в топке, что означает ослабление «силы тяги» вследствие сопротивлений дымоходов, имеющихся между топкой и создающей эту силу тяги трубой.

При сжигании твердого топлива в слое основное сопротивление создает обычно сам слой, загромаздящий проход воздуха в топку. Это сопротивление тем больше, чем толще и плотнее слой сжигаемого топлива. Значительные сопротивления возникают и при проходе газов через дымоходы, в которых расположены нагревательные приборы, например трубные пучки парового котла, заметно загромаздящие газовые проходы. Местные сопротивления возникают при резких поворотах, при внезапных сужениях или расширениях газоходов. Наконец, соответствующее сопротивление возникает от трения движущихся газов о стенки газоходных каналов.

Если сумма сопротивлений велика, а развиваемая трубой сила тяги по сравнению с ней недостаточна, то поступление воздуха в топку может оказаться весьма ничтожным. Это обстоятельство сразу же отразится на производительности установки, в силу того что, как это будет ясно из дальнейшего, количество



Фиг. 6. Рост разрежения в газоходах котельной установок по показаниям обобщенного тягомера («пьезометрического стэнда»).

Стеклянные трубки, снабженные масштабными в миллиметрах водяного столба, соединены верхними концами с соответствующими точками газоходов при помощи изогнутых металлических трубок.

выделяемого в топке тепла, определяющее в основном производительность установки, прямо пропорционально количеству воздуха, поступающего в топку в единицу времени.

Развиваемая трубой сила тяги получается тем большей, чем выше дымовая труба и чем при данной высоте трубы больше разница между удельными весами наружного атмосферного воздуха и заполняющих трубу горячих газов.

Примем для простоты, что наружный воздух при сухой погоде имеет в нашем случае  $0^{\circ}\text{C}$  или, иначе,  $273$  град. абс. и, следовательно, его удельный вес равен по предыдущему  $1,29 \text{ кг/м}^3$ . Пусть средняя температура дымовых газов, заполняющих трубу, равна  $200^{\circ}\text{C}$ , или  $473$  град. абс. При такой температуре дымовые газы обычного состава будут иметь удельный вес, примерно равный  $0,79 \text{ кг/м}^3$ . Тогда *разность* удельных весов наружного воздуха и трубных дымовых газов окажется равной

$$1,29 - 0,79 = 0,5 \text{ кг/м}^3.$$

На каждый метр высоты трубы такая разница в удельных весах будет создавать разность давлений, равную

$$1 \cdot 0,5 \text{ м кг/м}^3 = 0,5 \text{ кг/м}^2.$$

или, что то же,  $0,5 \text{ мм вод. ст.}$  \* Следовательно, при таких условиях труба высотой  $30 \text{ м}$  создаст силу тяги, равную  $15 \text{ мм вод. ст.}$ , а трубы  $40$  и  $60 \text{ м}$  — соответственно силы тяги  $20$  и  $30 \text{ мм вод. ст.}$  <sup>7</sup>.

При постройке топочно-дымоходного устройства (котельной установки, какой-нибудь печи, опневого сушила и т. п.) предварительно рассчитывается ожидаемое суммарное сопротивление всей системы, после чего берется некоторый запас сопротивления, чтобы создать известный запас в высоте трубы и тем самым обеспечить также и необходимый запас в развиваемой трубой силе тяги. Эта запасная сила тяги при нормальной (обычной) нагрузке установки не используется и погашается искусственно создаваемым добавочным сопротивлением в виде прикрытой дымовой заслонки, устанавливаемой чаще всего в заднем борове, у трубы. Когда же потребуются увеличение нагрузки сверх нормальной или, как говорят, возникает необходимость в форсировке работы установки, заслонку приоткрывают больше обычного, снимая запасное сопротивление, создаваемое ею. Таким усилением (вернее, освобождением) тяги добиваются увеличения скорости движения газовоздушного потока через топку и дымоходы, заставляя большее количество воздуха в единицу времени вступать в процесс горения и соответственно увеличивать количество производимого топкой тепла.

Количество тепла, воспринимаемого стенкой нагревательного прибора, например парового котла, значительно увеличивается с ростом скорости потока горячих газов, омывающего эту стенку.

\* Надо вспомнить дополнительное пояснение <sup>2</sup>.

Желая увеличить производительность поверхности нагрева такого нагревателя и добиться его большей компактности, современная техника стремится к применению больших скоростей газозвдушного потока. Понятно, что увеличение компактности существенно не только для подвижных (транспортных) установок, но и для неподвижных агрегатов больших мощностей, обычно принимающих очень громоздкие формы. Однако при стремлении современной техники к увеличению скоростей газозвдушного потока приходится считаться с тем, что сопротивления растут пропорционально квадрату скорости: если скорость газов увеличена в 2 раза, сопротивление возрастает в 4 раза, если скорость увеличена в 3 раза, сопротивление возрастает в 9 раз. Кроме того, стремление добиться в современных котельных установках более глубокого охлаждения дымовых газов, чтобы меньше тепла терять в атмосферу и тем самым сделать установку возможно более экономичной, создает необходимость размещения в газозвдушных каналах добавочных (утилизационных) поверхностей нагрева в виде водоподогревателей и воздухоподогревателей, что в свою очередь приводит к значительному росту суммарного сопротивления установки. Оно еще больше увеличивается за счет необходимости присоединения к установке газоочистительных устройств и другого вспомогательного оборудования. Все это создает в современных котельных установках больших мощностей суммарные сопротивления, исчисляемые сотнями миллиметров водяного столба.

В этих случаях естественная трубная тяга уже неприменима как по величине таких суммарных сопротивлений, так и вследствие сильного охлаждения дымовых газов, при котором, как понятно, будут создавать незначительную тягу даже самые высокие трубы, сооружение которых становится уже затруднительным.

В табл. 1 приводятся данные о развиваемой силе тяги трубами различной высоты при различной температуре отводимых ими в атмосферу дымовых газов.

Естественное движение потока газов или жидкости всегда направлено в сторону от большого давления к меньшему и вызывается именно наличием такой разности давлений. Оно становится, как мы видели на предыдущих примерах, тем интенсивнее, чем больше разность этих давлений, созданная на концах устройства, пропускающего через себя этот поток. Обратное движение потока — от меньшего давления к большему — становится возможным только при насильственном проталкивании такого потока при помощи специальных машин, на

Т а б л и ц а 1

Высота трубы, м	Сила тяги, мм вод. ст. при температурах газов в трубе, °С			
	100	200	300	350
20	6	10	13	14
40	12	20	26	28
60	18	30	39	42
100	30	50	65	
150	45	75		

работу которых приходится затрачивать соответствующее количество энергии. Как известно, такими машинами для перекачки жидкости являются насосы всевозможных типов, способные поднимать жидкость с нижнего уровня на верхний или проталкивать ее по какой-нибудь системе трубопроводов с преодолением суммы сопротивлений, возникающих в системе, и того противодействия, которое создается в полости потребителя прокачиваемой жидкости. Так, чтобы протолкнуть воду, питающую паровой котел, внутри которого поддерживается, скажем, давление 10 ат, необходимо применять водяной насос, способный создавать давление воды соответственно больше 10 ат. Это необходимо для создания разницы давлений между насосом и котлом, достаточной для преодоления сопротивления движению воды между ними, т. е. в трубопроводе, водоподогревателе («экономайзере»), вентилях и другой арматуре систем водоснабжения. К этому присоединяется также сопротивление всасывающей части трубопровода и самого насоса.

## 5. МЕХАНИЧЕСКАЯ (ИСКУССТВЕННАЯ) ТЯГА

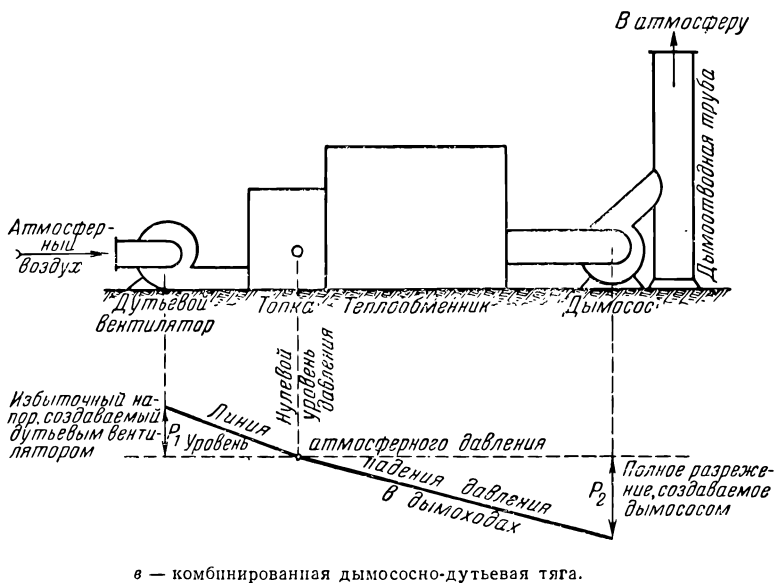
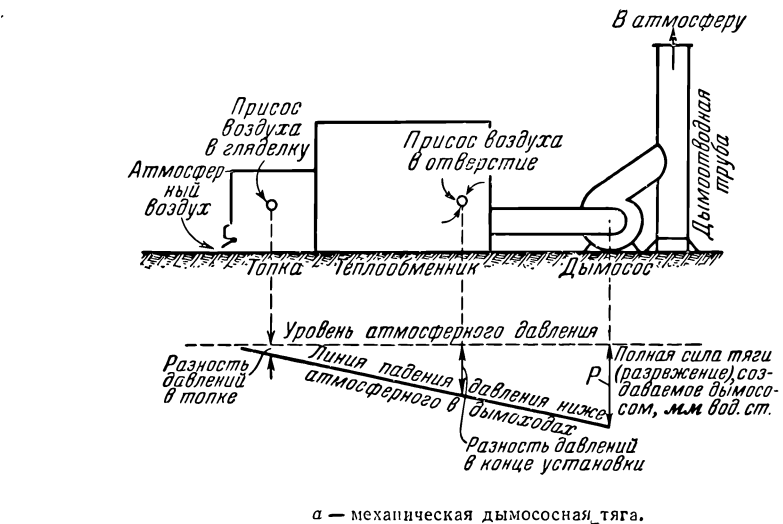
Аналогично этому при организации принудительных движений газа (в частности, воздуха) применяются специальные газовые (воздушные) «насосы», которыми могут служить газовые инжекторы, вентиляторы, воздуходувки (напнетатели) и компрессоры. Компрессоры применяются в основном для получения сжатого газа (в частности, воздуха, который также применяется в уплотненном, сжатом состоянии) в самых различных отраслях промышленности. Воздуходувки применяются в тех случаях, когда сопротивление системы воздухопроводов требует сильного сжатия воздуха, измеряемого атмосферами. Самой обычной машиной, применяемой в современной практике для получения искусственной (механической) тяги, является того или иного типа вентилятор, способный создавать разность давлений в десятки, сотни, а иногда и тысячи миллиметров водяного столба, достаточную для преодоления суммарных сопротивлений, характерных для современных огнетехнических устройств (например, котельных установок, туннельных и других современных печей, огневых сушил и т. п.).

Таковыми газовыми насосами являются так называемые «дымососы», т. е. вентиляторы, которые на своей всасывающей стороне, присоединенной к дымоходной системе, создают разрежение, достаточное для преодоления сопротивлений движению дымовых газов по этим газоходам (фиг. 7,а). С напорной же стороны они создают повышенное против атмосферного давление, достаточное для преодоления как противодействия наружного воздуха, так и сопротивления движению газов в напорной части системы, в частности в самой дымоотводящей трубе.

Дымососы, как и всякая другая механическая тяга, не требуют заполнения дымоотводящей трубы горячими газами, без

чего, как мы видели, простая трубная тяга неосуществима. Они могли бы создавать сильную тягу даже при полном остужении дымовых газов. Однако в современной практике пока не идут, как правило, на охлаждение дымовых газов ниже  $150^{\circ}\text{C}$ , так как поток газов столь низкой температуры очень вяло обменивается теплом с нагревательными приборами, которые приходилось бы делать из-за этого очень громоздкими и дорогостоящими. Поэтому даже при механической тяге дымоотводящие трубы, заполненные еще достаточно горячими газами, создают и добавочную естественную тягу, способную в соответствующих случаях обеспечить небольшую нагрузку установки даже при неработающем дымососе или служить для первичной растопки топочного устройства. Дымососная тяга лишена многих недостатков простой трубной тяги: ограниченности по производительности и преодолеваемой сумме сопротивлений, зависимости от состояния погоды и др. Но у нее имеется один общий с трубной тягой недостаток, который она даже усиливает: при чисто дымососной тяге преодоление всей суммы сопротивлений, так же как и при трубной тяге, достигается за счет создания разрежения во всей системе дымоходов. Возникающая при этом разность между давлением окружающего установку наружного воздуха и пониженным давлением газов в газоходах вызывает проталкивание холодного наружного воздуха внутрь газоходов или, как говорят «присос» холодного воздуха через все неплотности в обмуровке. Как мы видели из фиг. 6, разрежение в дымоходах становится тем большим, чем ближе дымоход к источнику тяги (трубе или дымососу). Поэтому два одинаковых по величине отверстия (гляделка, щель и т. п.) создадут разные присосы: небольшой — в топочном устройстве или близко к нему и большой — в неплотности, расположенной в хвостовой части установки, ближе к тяговому устройству. Поскольку дымосос создает в системе дымоходов более сильное разрежение, чем труба, его работа вызовет усиление этого паразитического явления. Присосанный в дымоходы воздух нагревается за счет горячих дымовых газов, увеличивая их количество и понижая температуру, парализуя тем самым тяговое устройство, работа которого начинает частично тратиться на движение этого паразитического воздуха.

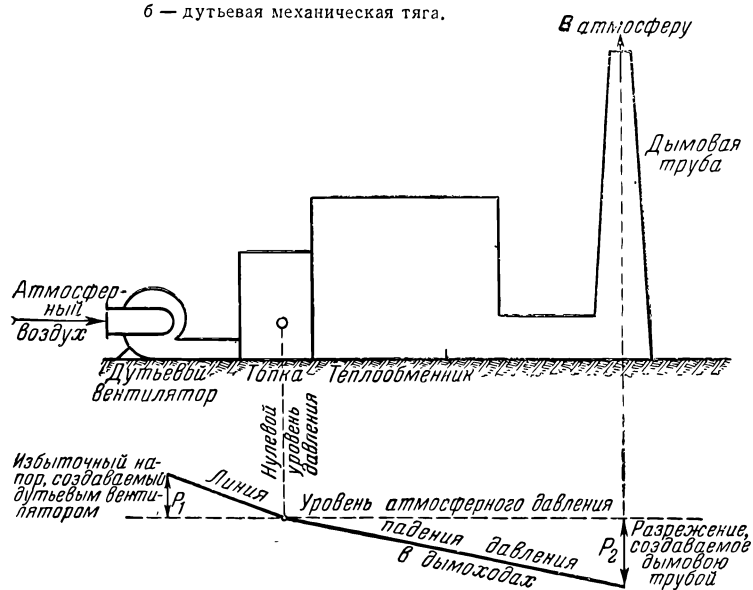
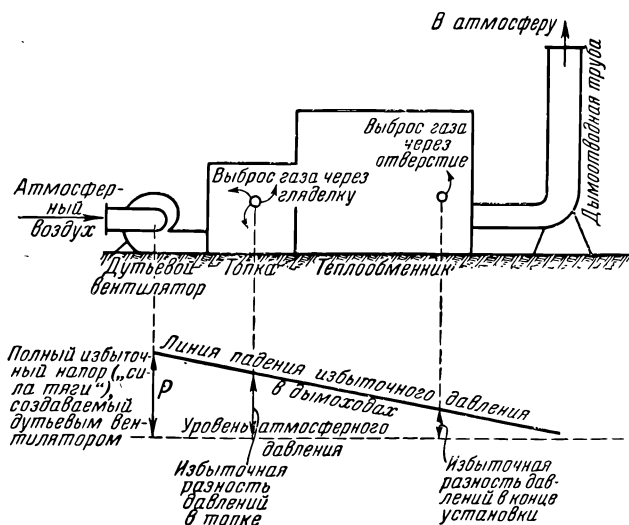
При плохом состоянии кладки дымоходов полезная тяга может настолько уменьшиться, что производительность установки упадет ниже допустимого предела. Аналогичное явление наблюдается и при работе топочного устройства на общую трубу с неработающей соседней установкой (например, находящейся в ремонте), если последняя не отделена на время простоя совершенно плотной перегородкой от этой работающей установки (плотной дымовой заслонкой или специально выложенной временной стенкой). При трубной тяге ослабление движения топочных газов будет вызываться не только тем, что труба вынуждена будет «тянуть» одновременно и эти газы и холодный воздух соседней установки, но и тем, что трубу будет в этом случае



Фиг. 7. Схемы различных

заполнять смесь газов пониженной температуры, которая создаст и пониженную силу тяги трубы.

В противоположность «дымососной» тяге может быть создана «напорная» (дутьевая) механическая тяга при помощи таких же вентиляторов, но присоединенных к газоходам своей напорной стороной, на которой создается давление выше атмосферного.



типов механической тяги.

Схема такой установки показана на фиг. 7,б. В этом случае внутри газоходов будет возникать давление, избыточное против давления окружающей установку наружной воздушной атмосферы. Возникающая при этом разность давлений будет направлена в обратную сторону (изнутри — наружу). Такая разность вызовет продавливание дымовых газов из дымоходов наружу,

в помещение, в котором работает установка, что является весьма нежелательным как по гигиеническим, так и по экономическим соображениям вследствие потери тепла с проникающими в помещение и атмосферу горячими, неиспользованными газами. Таким образом, напорная тяга становится допустимой только при обеспечении полной плотности (герметичности) газоходов, например при внутренних дымоходах некоторых типов судовых котлов, обшивке котельных установок неподвижного («стационарного») типа герметически плотным металлическим кожухом. При наличии одинаковых по размерам отверстий (неплотностей) в такой системе наибольшее количество газа будет продавливаться наружу через неплотность с наибольшей разностью давлений, т. е. через неплотность, расположенную ближе к источнику напорной тяги; следовательно, утечки газа будут больше в начальной части установки и меньше — в хвостовой.

Чтобы использовать положительные стороны обеих систем, в современных огнетехнических установках применяют комбинированную тягу: дымососную совместно с дутьевой (фиг. 7,в) или трубную с дутьевой (фиг. 7,г). В этом случае преодолеваемые сопротивления газовой системы каналов распределяют между дутьевым (напорным) вентилятором и всасывающим (дымососом) так, чтобы под давлением оказались только воздухоходы, а под разрежением — все газоходы. При этом неизбежно в какой-то точке такой газовой системы избыточное давление перейдет в разрежение. В этом месте внутри дымохода давление окажется равным атмосферному, и вследствие отсутствия разности давлений внутри и снаружи не будет происходить перетока газов наружу или воздуха внутрь даже при наличии в кладке неплотности или открытого отверстия. Такую «нулевую точку» размещают в топочном пространстве, и в ней нередко предусматривают отверстие для гляделки или каких-нибудь органов обслуживания топки. Расположением нулевой точки давления в топочном пространстве добиваются сокращения проникновения в топку паразитического (подсосного) неуправляемого воздуха<sup>8</sup>.

Огнетехника старается использовать наличие окружающей нас воздушной атмосферы, всячески усиливая, когда это необходимо, и делая управляемыми те явления, которые полезны для организуемых ею процессов, и по возможности ослабляя те вредные, практически неуправляемые явления, связанные с наличием воздушного атмосферного давления, которые в какой-то мере всегда сопровождают работу всех огневых установок.

---

## Глава вторая

# ХИМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ПРОТЕКАЮЩИЕ В НЕЙ ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

### 1. СОСТАВ ВОЗДУХА

Химическое взаимодействие воздушной атмосферы с минеральными и органическими веществами, которые она окружает, вызывается наличием в ее составе химически активного газа — кислорода.

Состав воздуха остается постоянным по всей высоте тропосферы и стратосферы, начиная заметно изменяться только за их пределами, при переходе в ионосферу. Воздух представляет собой в основном смесь трех газов, соотношение между которыми приведено в табл. 2.

Таблица 2

Газ	Обозначение	Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	Состав воздуха			
			в одном кубометре		в одном килограмме	
			м <sup>3</sup>	%	кг	%
Кислород . . . . .	O	1,429	0,21	21	0,232	23,2
Азот . . . . .	N	1,251	0,78	78	0,754	75,4
Аргон . . . . .	Ar	1,784	0,01	1	0,014	1,4
			1,0	100	1,0	100

Аргон, содержащийся в воздухе в ничтожном количестве, представляет собой химически нейтральное вещество, не способное вступать в химические соединения с другими веществами. Азот, содержащийся в воздухе в наибольшем количестве, вступает в химические соединения весьма неохотно и только при определенных условиях\*. Таким образом, оба эти газа, содержащиеся в воздухе суммарно в количестве 79% по объему, пред-

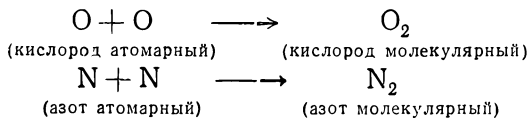
\* При очень высоких температурах или сильных электрических разрядах.

ставляют собой практически инертную примесь (химический балласт). Для простоты расчетов технический состав воздуха принимают равным <sup>9</sup>:

	По объ- ему, %	По весу, %
Кислорода . .	21	23,2
Азота . . . .	79	76,8

Все известные нам химические простые вещества, представляющие собой как бы строительные материалы для образования более сложных веществ, входящих в состав земли и живущих на ней организмов, могут находиться в активном, т. е. неустойчивом, и неактивном, т. е. устойчивом, состояниях. Активность химически простых веществ (химических элементов) может проявляться двояко: либо в виде стремления их вступать в соединения с другими веществами, образуя новые, более сложные вещества, отличающиеся от образовавших их первоначальных веществ новыми физическими и химическими свойствами <sup>10</sup>, либо в виде неустойчивости их состояния, приводящей к их самораспаду (радиоактивности) <sup>11</sup>.

С химической точки зрения простейшими частицами, определяющими химические и физические свойства чистых элементов, являются, как известно, атомы. В наземных условиях (низкая температура) почти все вещества, оказавшиеся в атомарном состоянии, крайне неустойчивы и стремятся к немедленному соединению с другими веществами, простыми или сложными, обладающими в свою очередь достаточной химической активностью. Именно по этой причине мы практически не в состоянии наблюдать в земной природе свободное существование веществ в атомарном состоянии. Атомы химически чистых элементов в наших условиях могут соединяться и между собой, образуя молекулы этих чистых веществ. Например, два атома кислорода образуют одну молекулу кислорода, два атома азота — соответствующую молекулу азота по следующим схемам:



Молекулярная форма является наиболее устойчивой формой существования элементов в земных условиях в противоположность условиям на солнце, где весьма высокая температура делает более устойчивым атомарное состояние газов. Именно по указанной причине мы находим в составе воздуха молекулярные кислород и азот в пределах тропо- и стратосферы. Исключение составляет аргон\*, который как нейтральное вещество оказы-

\* И некоторые другие подобные ему нейтральные газы, содержащиеся в воздухе в еще более ничтожном количестве.

вается устойчивым в земных условиях в атомарном состоянии. Некоторое количество атомарных кислорода и азота, равно как и другой активной формы существования кислорода — озона, представляющего собой неустойчивую трехатомную молекулу  $O_3$ , находится в пределах ионосферы, где их длительное существование может быть объяснено крайней разреженностью атмосферы, т. е. крайней удаленностью частиц газа одна от другой, что препятствует их соединению <sup>12</sup>.

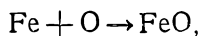
## 2. ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ЗЕМЛЕ

Несмотря на достаточно устойчивое молекулярное состояние в земных условиях, свободные молекулы кислорода проявляют признаки весьма повышенной по сравнению с другими газами химической активности и охотно вступают в соединения с другими простыми и сложными веществами, создавая их окислы. Такое непрерывное химическое воздействие воздушного кислорода на породы, входящие в состав земной коры, получило название процесса «выветривания», приводящего к возникновению так называемых осадочных отложений в виде песка, глины и ила во всех водных бассейнах земного шара, куда их заносят ветры и водные потоки.

Происходит постоянное, непрерывное расходование кислорода воздуха на образование различных твердых, жидких или газообразных окислов, которое без соответствующего пополнения его запасов привело бы, в конце концов, к полному его исчезновению в воздушной атмосфере. Однако в течение довольно длительного периода контролирования человеком состава воздуха еще не наблюдалось сколько-нибудь заметного изменения содержания кислорода в воздухе. Очевидно, земля в настоящий период переживает состояние равновесия в потреблении и выделении свободного кислорода воздуха.

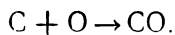
Единственным известным человеку источником выделения свободного кислорода является растительный покров земли. Организмы растений в процессе своей жизнедеятельности обладают способностью поглощать углекислоту, добывая из нее для построения своих тканей необходимый им углерод и выделяя при этом кислород в качестве отбросного, «побочного» продукта, поступающего в атмосферу. Для весьма сложного химического процесса образования органических тканей требуется известная затрата энергии, которая в основном получается от солнечного света (а частично и от реакций, выделяющих тепло). В качестве труженика («рабочего»), ведущего и регулирующего эти процессы, выступает особое вещество — хлорофилл, содержащееся в растительных клетках и хорошо нам знакомое по зеленой расцветке растений. Споспобствуя протеканию этих процессов в тканях растений, сам хлорофилл сохраняет в конечном счете свое первоначальное состояние.

Окислительные процессы выветривания, расходующие воздушный кислород, идут при характерной для земной поверхности низкой температуре и протекают весьма медленно, иногда в одну или несколько ступеней, постепенно присоединяя кислород к минеральным веществам до полного их насыщения, т. е. до наиболее устойчивого для земных условий состояния образующихся окислов<sup>11</sup>. Примером таких медленных окислительных процессов является получение окислов различных металлов (окись железа, глинозем, представляющий собой окисел алюминия, и т. п.). Характерным и хорошо нам знакомым процессом в этом отношении является ржавление железа, которое под воздействием кислорода воздуха из чистого простейшего химического элемента превращается сначала в закись железа, молекула которой представляет собой соединение одного атома железа (Fe) с одним атомом кислорода:

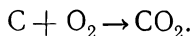


а при дальнейшем окислении переходит в более устойчивое, сильнее окисленное вещество, носящее название окиси железа, в молекуле которой два атома железа соединены с тремя атомами кислорода ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). В выветрившихся породах, содержащих железо, именно этот окисел и придает им характерный красноватый или коричневый оттенок (например, красные неогнеупорные глины). Оба окисла железа являются твердыми примесями в различных силикатных породах. Когда их концентрация становится достаточно большой, порода получает значение железной руды.

Другим примером получения уже неметаллических окислов является окисление углерода (C), которое также имеет промежуточную форму: один атом углерода может соединиться с одним атомом кислорода, образуя промежуточный окисел, носящий название окиси углерода и известный в обиходе под названием «угарного газа»:

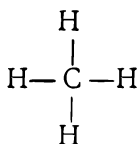


Конечным окислом, более устойчивым при не слишком высоких температурах, является так называемая «углекислота» (двуокись углерода). В молекуле этого окисла один атом углерода соединен с двумя атомами кислорода:



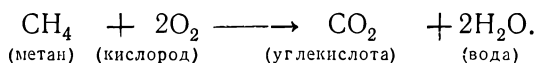
Исключительной способностью к последовательному, постепенному окислению обладают молекулы «углеводородов», состоящие из атомов углерода и водорода и являющиеся строительным материалом для тканей живых организмов (растений и животных). Один из простейших углеводородов — метан  $\text{CH}_4$ , иногда называемый «болотным газом», — содержит в каждой молекуле по одному атому углерода C, соединенному с четырьмя атомами

водорода Н. Схема строения такой молекулы обычно изображается в следующем виде:

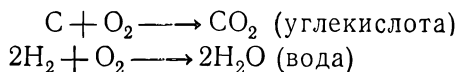


причем черточками обозначены четыре характерные для углеродного атома химические связи.

Если к метану присоединить один атом кислорода, то получится молекула вещества, носящего название метилового спирта ( $\text{CH}_3\text{O}$ ), который сам способен окисляться дальше, т. е. присоединять к себе новый кислород. Однако дальнейшее последовательное окисление первичной молекулы метана сопровождается уже ее частичным разрушением с выделением молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Оставшийся «осколок» первичной молекулы будет уже состоять из атома углерода, двух атомов водорода и одного атома кислорода ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). Это вещество носит название формальдегида. Дальнейшее его окисление приведет сначала к образованию так называемой «муравьиной кислоты», молекула которой имеет уже два атома кислорода ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ), а при последующем окислении вся первичная молекула метана распадается на одну молекулу углекислоты ( $\text{CO}_2$ ) и две молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Таким образом, для того чтобы довести окисление первичной молекулы метана до полного распада, нужно затратить две молекулы свободного кислорода (или четыре атома), причем схема такого окончательного окисления может быть представлена в виде следующей записи:



Такой же результат был бы получен, если бы отдельно окислялись атом чистого углерода С и две молекулы чистого молекулярного водорода ( $2\text{H}_2$ ) по схемам



### 3. ПРОЦЕССЫ ГНИЕНИЯ ОТМИРАЮЩИХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Из сказанного следует, что окисление молекул органического характера представляет собой процесс их разрушения, и это разрушение должно неизбежно протекать у всех органических веществ, прекративших жизнедеятельность и находящихся под воздействием воздушной атмосферы. Процесс этот, как все процессы выветривания, возникающие при низких температурах земной поверхности, происходил бы достаточно медленно, если

бы ему не сопутствовала интенсивная деятельность мельчайших организмов, называемых бактериями. При этом он утрачивает свой чисто химический характер и превращается в так называемый «биохимический» процесс, которому подвергается немедленно вся отмершая органика (отмирающие ткани растений и животных) в виде различных форм гниения.

Если бы эти процессы гниения, ускоренные губительным воздействием кислорода воздуха, имели место во всех случаях ежегодного отмирания богатой земной растительности, то природа не смогла бы накопить в недрах земли, в земной коре того богатейшего запаса горючего материала, который добывается и используется человеком в виде нефти, каменного и бурых углей, а также торфяных масс в заболоченных водных бассейнах. Действительно, ежегодно отмирающие части растений в сухих (верховых) лесах, попадая в почву лесов (так называемый «гумус») и подвергаясь процессу тления\* или перегнивания\*\*, успевают полностью разложиться и исчезнуть из почвы в 1—2 года, не создавая ценных накоплений горючего материала.

В противовес этому процесс оторфянения представляет собой гниение, только начинающееся под воздействием воздушной атмосферы, пока отмершая ткань растений не погрузилась под покров воды. Дальнейший процесс гниения под водой без доступа воздуха резко замедляется и приобретает другие формы. Постепенно разлагающийся растительный материал теряет разрушенные органические молекулы в виде газа и частиц, легко растворимых и вымываемых из накопления водой и представляющих собой наименее прочный и, кстати, наименее ценный материал. Накапливающийся остаток, содержащий в себе наиболее тяжелые, нелетучие и нерастворимые в воде материалы, уменьшаясь в количестве, увеличивает содержание наиболее теплоценных веществ. Такой глубоко разложившийся торф, если он покрывается минеральной кровлей, наносимой на него ветрами и почвенной водой, теряет уже признаки растительных тканей (за малыми исключениями), приобретает достаточную однородность и переходит в состояние, которое носит название бурых углей. При известных условиях пласты бурых углей, уплотняясь и преобразовываясь, могут превратиться в сильно науглероженное вещество, которое мы называем каменным углем.

Другой процесс накопления ценного материала органического происхождения происходит от начала и до конца изолированно от воздействия атмосферного кислорода в самих водных бассейнах: озерах, морях, океанах. Ежегодно на дно этих бассейнов, увеличивая запас гниющего ила («сапропеля»), опускается отмершая органика многочисленных примитивных пловучих водорослей (так называемый растительный планктон, каждое лето расцветающий, например, в воде любого застойного пруда).

---

\* Гниение при постоянном воздействии воздуха.

\*\* Гниение в воздухе при некотором смачивании водой.

К нему присоединяется и отмершая животная органика. После известного периода бактериальной переработки пласты пресноводного сапропеля могут, так же как и торф, покрыться минеральной кровлей и превратиться в специальный сорт особо жирных углей, носящих название «богхедов». В соленоводных бассейнах гниющий ил может дать основание для образования некоторых сортов нефтей, которым ранее приписывалось исключительно животное происхождение.

#### 4. ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Непрерывные окислительные процессы, только в еще более сложной форме, с рядом промежуточных стадий, происходят и во всех живых животных организмах, находящихся в постоянном взаимодействии с окружающей их воздушной атмосферой. Всякий окислительный процесс сопровождается освобождением, т. е. выделением свободной энергии, которая может непроизводительно рассеяться в пространство за счет теплообмена или — при наличии соответствующих условий — затратить на протекание каких-нибудь других процессов, требующих расходования энергии.

Жизнь всякого животного организма сопровождается построением новых живых клеточек в его ткани, на которое должна затрачиваться энергия, и разрушением отмирающих частей ткани, которые живой организм должен систематически из себя удалять. Процесс окисления отмирающих частей ткани и вводимых в нее питательных веществ происходит за счет кислорода воздушной атмосферы. Продукты окисления (разрушения) превращаются в такие формы, которые удобны для удаления: в углекислый газ, воду или водяной пар и растворимые в воде азотистые и аммиачные вещества. Освобождающаяся при этих сложных процессах энергия идет на созидательную работу построения новых частей ткани в виде живого вещества и некоторого местного запаса питательных веществ (сахаристые и крахмалистые вещества, жиры, белки). Остаточная энергия идет на поддержание в теле организма повышенной температуры (у человека — около 37° С).

Таким образом, воздушная атмосфера обеспечивает важнейшие процессы жизнедеятельности животных организмов, населяющих землю. Это взаимодействие всего живущего на земле с окружающей его воздушной атмосферой, связанное со сложной системой кровообращения, принимает наивысшие формы в человеческом организме. Они достаточно поучительны и для тех целей, которые преследует настоящая книга, и в кратком изложении представляются вполне уместными на этих страницах.

Вспомогательными аппаратами дыхательных процессов человеческого организма являются легкие и кровеносная система. При помощи легких происходит вдыхание свежего воздуха, доставляющего организму кислород, и выдыхание продуктов рас-

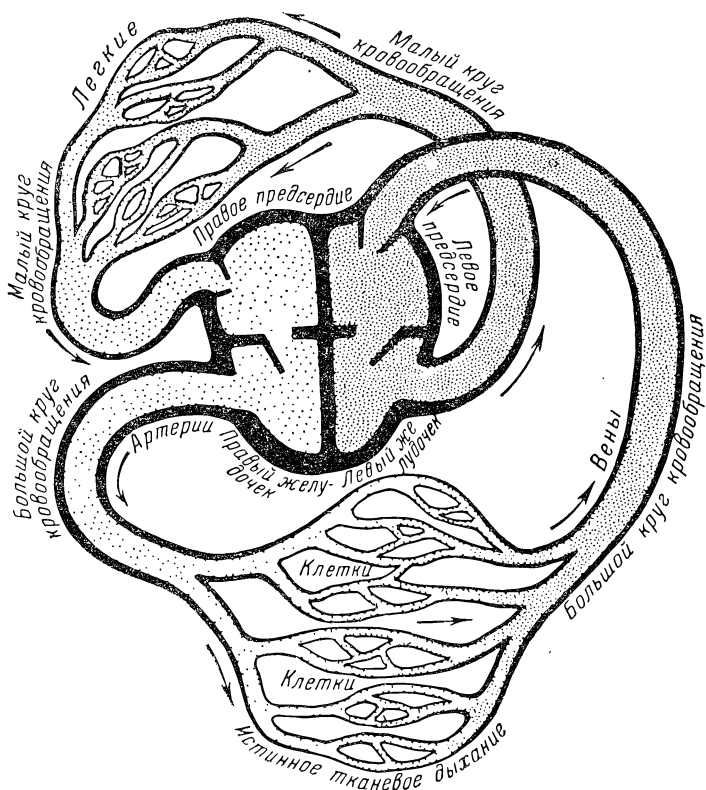
пада питательных веществ и отмерших тканей в виде углекислого газа и водяного пара. Легкие состоят из скопления множества пузырьков («альвеол») с сильно развитой тонкостенной поверхностью, на которой расположены во множестве разветвленные тончайшие кровеносные сосуды. Здесь происходит процесс газообмена («диффузия»): отработавшая кровь темного цвета выделяет через тончайшие стенки альвеол принесенные ею из тканей углекислый газ и водяной пар и, забрав проникший в нее через эти же стенки кислород, в виде очищенной крови алого цвета разносит этот кислород по всем тканям организма, в которых и происходит действительный процесс дыхания («истинное тканевое дыхание») (фиг. 8).

Сюда же кровеносная система доставляет и другое рабочее вещество — питательные соки, вырабатываемые желудочно-кишечной пищеварительной системой. Назначением этой системы является переработка непосредственно неусваиваемых первичных пищевых продуктов путем расщепления их на более простые, растворимые и усваиваемые вещества. Последние и идут на питание клеток и межклеточного вещества, заполняющего пространство между клетками. Именно в тканях и происходит, наконец, тот обмен веществ, без которого существование организма невозможно, нарушение и прекращение которого приводят к его заболеванию и гибели. При нормальном ходе обмена в тканях происходит окончательное создание новых органических веществ, свойственных человеческому организму: из расщепленных первичных белков воссоздаются новые белки, частично идущие на построение живого вещества, частично откладываемые в виде запасных белковых включений. Из сахаристых веществ создается животный крахмал — «гликоген». Кроме того, к числу запасаемых человеческим организмом питательных веществ, им самим вырабатываемых из питательных соков, относятся и накопления жира.

Все эти процессы требуют расхода энергии, так же как и мышечная работа человеческого организма (сокращение мускулов, сердца и т. п.), а равно и сопровождающих эти процессы чисто тепловых явлений. Эта энергия и добывается человеческим организмом за счет окислительных процессов, идущих в той же клеточной ткани, при помощи доставляемого кровеносной системой кислорода воздуха. Окисление и последующее расщепление жиров и крахмалов (углеводов) приводят к образованию углекислого газа и воды. Тот же процесс разрушения белковых веществ приводит к расщеплению их до углекислого газа, воды и азотистых и аммиачных веществ. Образовавшиеся вода и азотистые вещества выделяются человеческим организмом через почки и потовые железы; углекислота и водяной пар удаляются в атмосферу через легкие.

Таким образом, легкие, а равно и система кровообращения, являются лишь вспомогательными органами дыхания, которое на самом деле происходит в тканях организма. В этом смысле

Легкие являются не органом дыхания, а «вдыхательно-выдыхательным» аппаратом, грубой аналогией которого является, например, тягодутьевая система котельной установки, в которой свежий воздух «вдыхается» дутьевым вентилятором (а в примитивных установках — и самой топкой), а продукты распада — топочные газы — «выдыхаются» дымососным вентилятором или трубой в атмосферу.



Фиг. 8. Упрощенная схема кровеносной системы человека.

Кровообращение обеспечивается работой сердца, которое представляет собой у человека двоянную насосную станцию, каждая из двух частей которой — левая и правая — является своеобразным двухступенчатым насосом в виде предсердия и сердечного желудочка (фиг. 8). Правое предсердие забирает всю отработавшую кровь, несущую продукты распада — углекислоту и воду с растворенными в последней аммиачными веществами. Вода с аммиачными соединениями выделяется, как указывалось, через почки и потовые железы, а частично в виде пара

поступает в легкие вместе с углекислотой. При своем сжатии предсердие проталкивает эту кровь через односторонний клапан (подобный клапану поршневого насоса) в правый желудочек, который, сжимаясь в свою очередь, проталкивает кровь в легкие для указанного выше газообмена (малый круг кровообращения). Из легких кровь, обогащенная кислородом, поступает в левое предсердие, которое представляет собой первую ступень второго сердечного насоса. При сжатии предсердия эта кровь гонится через такой же односторонний клапан в левый желудочек, откуда она сжатием желудочка проталкивается по артериям во все ткани (большой круг кровообращения). Красное кровяное вещество — гемоглобин — обладает замечательной способностью быстро воспринимать кислород и выделять углекислоту. К сожалению, оно не обладает этой способностью по отношению ко второму окислу углерода — угарному газу (окиси углерода). Попадая через легкие в кровь, окись углерода связывается с гемоглобином, не выделяясь обратно и заставляя его терять способность воспринимать свежий кислород, из-за чего и происходит отравление организма и удушье.

Таким образом, воздушная атмосфера является тем огромным резервуаром, из которого человеческий организм (как и другие животные организмы), представляющий собой своеобразную энергетическую станцию, черпает для получения энергии одно из двух необходимых ему рабочих веществ — окислитель в виде свободного кислорода воздуха. Вторым рабочим веществом такой энергостанции являются питательные вещества, воспринимаемые организмом и как бы играющие роль топлива, которое при окислении выделяет известное количество тепла, запасенного в этом веществе при его возникновении. Освобождающаяся при этом энергия частично тратится в виде тепла, а частично в другой форме идет на сложные химические процессы, сопровождающие преобразование органических тканей. Отбросными продуктами, удаляемыми организмом через дыхательную систему, являются выдыхаемый обратно воздушный азот и продукты «сгорания» (окисления) углерода и водорода: двуокись углерода  $\text{CO}_2$  (углекислота) и водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ . Все это не раз давало повод называть человеческий организм (а равно и организм животных) своеобразным «двигателем внутреннего сгорания».

## 5. ЧТО НАЗЫВАЕТСЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ?

Однако в технике далеко не все окислительные процессы, протекающие при непременном выделении энергии, называются «процессами горения». Все описанные выше процессы медленного окисления чисто химического или биохимического характера, а равно и окислительные процессы живых растительных или животных организмов, идут так замедленно, что за единицу времени успевает выделиться ничтожное количество тепла. При таком медленном тепловыделении тепло это успевает рассеяться,

что не дает процессу окисления перейти в высокотемпературную область быстрого его протекания, сопровождаемого видимым свечением и появлением пламени. Именно такой процесс быстрого окисления с выделением за единицу времени значительных количеств тепла, успевающих поддерживать его на уровне достаточно высоких температур, и носит в технике название «процесса горения»<sup>13</sup>.

Так, например, тонкая железная проволочка отказывается «гореть» в воздухе, но быстро сгорает в струе чистого кислорода. В воздухе она может только медленно окисляться (ржаветь), постепенно образуя на поверхности слой окиси железа. Объясняется это тем, что выделяющееся при окислении железа умеренное количество тепла не в состоянии поднять температуру процесса до необходимого высокого уровня, так как при этом прогревается не только продукт окисления — окись железа, но и впутывающийся в процесс воздушный азот, который сам в окислительном процессе остается мертвой примесью, но требует на свой прогрев значительного количества тепла. Гораздо «горячее» становится такой процесс при отсутствии этого балластного азота, т. е. в чистом кислороде, так как за исключением неизбежной потери тепла на наружное охлаждение, все выделяющееся тепло в этом случае идет только на прогрев получающейся окиси железа. В струе чистого кислорода тонкая железная проволока быстро горит, разбрасывая во все стороны светящиеся раскаленные частицы окиси железа.

Процесс горения, как всякий окислительный процесс, требует для своего протекания наличия двух рабочих веществ: окислителя, способного достаточно быстро вступать в соединение с окисляемым веществом, и этого окисляемого вещества, которое обычно называют топливом.

Окислителем может служить любое вещество, содержащее кислород, свободный или связанный, но могущий во время реакции перейти в свободное состояние и вступить в окислительный процесс. Окислителем последнего типа является, например, азотная кислота, почти две трети которой (по весу) составляет кислород, способный выделиться из ее состава и участвовать в процессе окисления. Понятно поэтому, что азотная кислота является значительно более сильным окислителем, чем воздух, в составе которого (по весу) кислорода меньше одной четверти. Наиболее сильным окислителем является чистый кислород, который может применяться для процесса горения как в газообразном, так и в жидком виде<sup>14</sup>.

## 6. ТОПЛИВО И ОКИСЛИТЕЛЬ

В быту и широкой технике единственным окислителем, практически применяемым, является атмосферный воздух. Его монопольное положение, несмотря на то, что он представляет собой вследствие значительной разбавленности азотом окислитель

сравнительно слабый, объясняется его неограниченной доступностью. Менее доступные и сравнительно дорогостоящие окислители применяются только в специальной технике, в которой стремятся к достижению особенно высоких температур. Как мы видели это на примере с железной проволочкой, воздушный азот требует на свой собственный нагрев значительного количества выделяемого при окислительной реакции тепла, что резко снижает температурный уровень всех воздушных процессов горения. Обычно он не превышает 1 500—1 800° С, в то время как при более сильных окислителях достигается температура в несколько тысяч градусов.

Топливом может называться любое вещество, способное вступить с воздухом в быстрый окислительный процесс (горение) с развитием высоких температур, который, раз начавшись самопроизвольно (самовоспламенением) или принудительно (поджиганием), в состоянии поддерживаться до исчерпания запаса этого топлива в возникшем очаге горения<sup>15</sup>. Техническое значение любой сорт топлива приобретает при соблюдении трех условий:

1) значительного удельного тепловыделения на единицу веса, а особенно — на единицу объема;

2) достаточной активности к вступлению в процесс горения в воздухе;

3) достаточной распространенности и доступности для массового применения.

Совершенно исключительное значение в этом отношении имеют топлива природного происхождения:

1. Газообразные: природные горючие газы, в которых основой является метан.

2. Жидкие: нефть и ее производные погоны — бензин, керосин, лигроин, моторные масла, мазут.

К ним же следует причислить и горючие сланцы, представляющие собой пористое минеральное твердое вещество, пропитанное нефтеподобной горючей массой.

3. Твердые: каменный уголь, бурый уголь, торф, древесное топливо и всевозможные твердые горючие отбросы промышленных производств (солома, лузга, отбросы лесопильного производства и т. п.).

К этому списку присоединяются многочисленные топлива искусственного происхождения, получаемые либо путем специальной переработки тех или иных природных топлив, либо в виде горючих отбросов различных производственных процессов. Наиболее важное техническое применение имеют:

1) генераторный, светильный, коксовальный и другие газы, получаемые при расщеплении или раскислении молекул природных топлив при воздействии высоких температур;

2) коксы, полукоксы, древесный уголь, получаемые в виде твердого остатка при разложении природных углей, торфа и древесины под воздействием достаточно высокой температуры в специальных условиях;

3) искусственные жидкие топлива, получаемые специальной переработкой при повышенных давлениях и температурах, обеспечивающих частичное разложение органических молекул нефтей, горючих сланцев, каменных углей и других твердых топлив (при искусственном, в случае надобности, ожирении их за счет присадки водорода). Сюда же можно отнести и некоторые отходы переработки органических красящих веществ.

При получении таких искусственных топлив из природных органических материалов стараются либо совсем изолировать процесс от непосредственного воздействия воздушной атмосферы, либо создать такие условия, при которых это воздействие было бы строго ограничено и управляемо. Неуправляемое, стихийное вмешательство воздушной атмосферы в преобразование природных горючих материалов оказывается губительным и приводит к уменьшению выхода полезных продуктов, ухудшению их качества или даже полному уничтожению первичного вещества путем его непроизводительного сгорания.

Простым примером приготовления искусственного топлива может служить примитивное, полукустарное производство древесного угля в земляных угольных ямах, на дне которых часть древесины сгорает для выделения тепла, необходимого для обогрева всей остальной массы древесного материала, заполняющего яму. Для ограничения доступа воздуха в обугливаемую теплом древесную массу ее сверху прикрывают дерном. Получающийся от разложения древесины газ заполняет яму, препятствуя чрезмерному проникновению атмосферного воздуха в образующуюся угольную массу, которую иначе он мог бы сжечь совсем до золотого остатка. Заторможенное поступление воздуха в угольную кучу должно быть достаточным лишь для частичного сжигания древесины, обеспечивающего необходимый температурный режим всего процесса.

Получение промышленных коксов из каменных и бурых углей и торфа производится без доступа воздуха путем внешнего обогрева через стенки коксовального аппарата (реторты или печи). Выделяющийся коксовый газ может быть также использован в качестве газообразного топлива.

Само собой разумеется, что при сознательной организации горения топлива с использованием воздушной атмосферы поступление воздуха в процессе должно быть регулируемым, чтобы сделать этот процесс поддающимся управлению как в качественном, так и в количественном отношении. Раз начавшийся в каком-либо месте процесс горения, будучи предоставлен самому себе, может не обеспечить нужной производительности или, наоборот, развиться до масштабов стихийного бедствия, способного уничтожить весь наличный горючий материал за счет неограниченного поступления воздушного кислорода в образовавшийся и постепенно перемещающийся очаг горения. Если мы заинтересованы в длительном поддержании процесса горения на открытом воздухе, то его непрерывное протекание в воздуш-

ной окислительной среде требует непрерывного или своевременного периодического поступления свежего топлива в очаг горения.

Очевидно, что прекращение горения может сводиться к разобщению (изоляции) окислителя и топлива в создавшемся очаге горения. Однако, как мы знаем, не при всех условиях соприкосновения (контакта) окислителя с топливом может протекать процесс быстрого окисления, называемый горением. Достаточно было бы, не нарушая контакта окислителя с топливом, перевести процесс в область низкой температуры, т. е. сильно охладить его за счет какого-нибудь интенсивного отнятия выделяющегося тепла, без которого процесс не сможет удержаться на уровне необходимой ему высокой температуры. Если переохладение процесса действительно возникает (в естественном или принудительном порядке), горение само собой прекращается (затухает) даже при наличии уже образовавшейся готовой горючей смеси из окислителя и топлива, между которыми в таком случае может установиться только весьма медленный беспламенный процесс окисления, описанный ранее.

## 7. ЧТО ТАКОЕ ОЧАГ ГОРЕНИЯ?

Таким образом, мы приходим к следующему представлению о том, что такое очаг горения.

Очагом горения следует называть такое место, в котором соблюдаются три основных условия его образования:

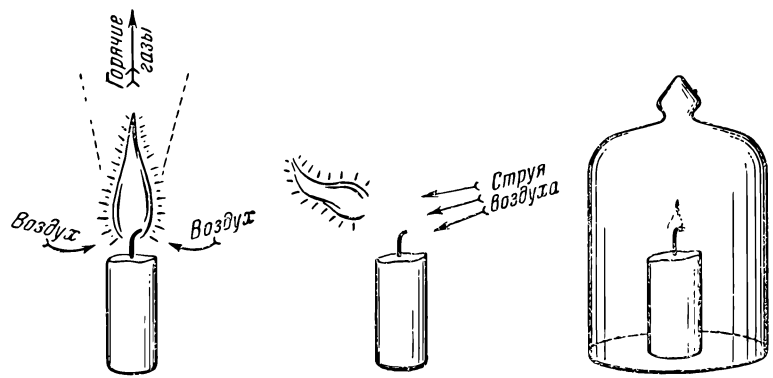
- 1) непрерывная подача окислителя (воздуха);
- 2) непрерывная подача топлива;

3) непрерывная подача тепла, необходимого для поддержания процесса на достаточно высоком температурном уровне.

Начальное возникновение очага горения при наличии образовавшейся горючей смеси из окислителя и топлива может произойти путем самовоспламенения этой смеси или принудительного ее поджигания (зажженная спичка, факел, электрическая искра и т. п.). После возникшего таким путем воспламенения процесс горения в удовлетворительно организованном очаге устанавливается на определенном температурном уровне, непрерывно поддерживаемом теплом, вновь выделяющимся при сгорании свежих порций топлива. Таким образом, удовлетворительный очаг горения сам себя автоматически питает необходимым ему теплом. Говоря современным производственным языком, можно сказать, что для непрерывного поддержания очага горения следует организовать совместное сочетание трех потоков: теплового (энергетического) и двух материальных — окислителя и топлива. Нарушение любого из этих трех обязательных условий приводит к прекращению работы очага горения.

Простой иллюстрацией сказанного может служить горение в воздухе комнатной свечи (фиг. 9). Зажженная свеча не прекращает устойчивого горения в воздухе до тех пор, пока хватает

содержащегося в ней горючего (воска, стеарина, парафина и др.). Факелок свечи в спокойном воздухе приходит в установившееся на длительный период времени состояние и при хорошем фитиле принимает даже вполне устойчивую форму. Если же на него достаточно сильно подуть, факелок отрывается от фитиля, сносится в сторону и там через несколько мгновений потухает. Очаг горения нарушается на фитиле вследствие несоблюдения третьего основного условия: топливо и окислитель попрежнему находятся



*а* — нормальный факелок в спокойном воздухе при соблюдении всех трех условий очага горения.

*б* — момент сдувания факелка с фитиля струей воздуха.

*в* — факелок под стеклянным колпаком, затухающий из-за исчезновения кислорода.

Фиг. 9. Горение свечи в воздухе.

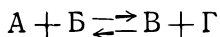
во взаимном соприкосновении на фитиле, но уже отсутствует необходимая высокая температура. Очаг горения нарушается также в самом оторвавшемся от фитиля факелке, так как не соблюдается первое основное условие: в факелке еще поддерживается некоторое время достаточно высокая температура и имеется поступление кислорода воздуха, но прекращена подача топлива. Второе условие мы можем нарушить, поместив горящую свечу под плотный стеклянный колпак. Постепенно, по мере израсходования кислорода воздуха под колпаком, очаг горения окажется окруженным мертвыми газами — азотом, углекислотой и водяными парами — и погаснет от прекращения подачи к нему окислителя.

## Глава третья

# КАК СТРОЯТСЯ И РАЗРУШАЮТСЯ ТОПЛИВНЫЕ МОЛЕКУЛЫ?

### 1. СТРОЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ МЕТАНОВОГО РЯДА

Все химические реакции представляют собой процессы превращения одних веществ (исходных, начальных) в другие вещества (конечные), которые получают уже новые свойства. Говоря в самом общем смысле, реакции эти могут идти в обе стороны: «прямою» — от веществ А и Б к веществам В и Г.



с выделением свободной энергии (тепла) и «обратную» — от веществ В и Г к веществам А и Б, но в этом случае уже при затрате посторонней энергии (тепла) <sup>16</sup>.

В мертвой (неорганической) природе все обратные реакции, требующие затраты энергии, идут труднее прямых. В этом проявляется общее стремление неорганической природы к соблюдению энергетической экономии при протекании процессов, приводящих к перераспределению атомов и образованию новых, энергетически более «дешевых» молекул. Количество выделившегося при этом тепла и свидетельствует о достигнутой при таком преобразовании молекул экономии. В связи с этим в земной природе наблюдается известное стремление к преимущественному стихийному (самопроизвольному) протеканию именно тепловыделяющих реакций с возникновением более экономных молекулярных построек. Однако при наличии достаточно высокой температуры и избыточного тепла могут «самопроизвольно» протекать и теплopotребляющие реакции, создавая энергетически более «сложные» и «дорогие» молекулы, которые, таким образом, как бы запасают в себе добавочно воспринятую энергию.

Но на земле накоплением энергии в своих молекулах особенно занимается живая, «органическая» природа, способная создавать самые сложные по конструкции молекулы, накапливающие в себе значительные запасы солнечной энергии.

Из всех химических элементов совершенно исключительной способностью в этом отношении обладает углерод С, атомы кото-

рого, связываясь друг с другом, с атомами других элементов и в первую очередь с водородом Н, являются основой построения всех органических молекул. Это свойство углерода объясняется тем, что у его атома имеется наиболее значительное число свободных связей («валентностей»), способных прочно присоединять к нему атомы других элементов (веществ) или взамен атомов целые соединения их, если в этих соединениях оказываются временно незанятыми свободные связи в соответствующем количестве<sup>17</sup>.

Простейшие органические молекулы представляют собой соединения из атомов углерода и водорода и носят название «углеводородов», являющихся основой всех органических соединений. Полное насыщение водородом атом углерода получает тогда, когда все присущие ему четыре связи идут на присоединение к нему четырех атомов водорода, каждый из которых обладает только одной свободной связью. Такой насыщенный углеводород носит название метана и дает начало весьма длинному ряду «насыщенных» углеводородов, которые в современной химии называют «метановыми» или «парафиновыми».

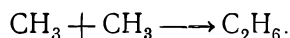
Вес атома углерода в 12 раз тяжелее веса атома водорода. Если вес атома водорода принять за единицу, то весовой состав метана, молекула которого  $\text{CH}_4$ , будет, как понятно, содержать  $12 + 4 = 16$  единиц, определится из простого расчета:

$$\text{водорода } \frac{4}{16} = 0,25 \text{ кг/кг, или } 25\%;$$

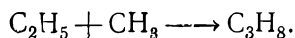
$$\text{углерода } \frac{12}{16} = 0,75 \text{ кг/кг, или } 75\%.$$

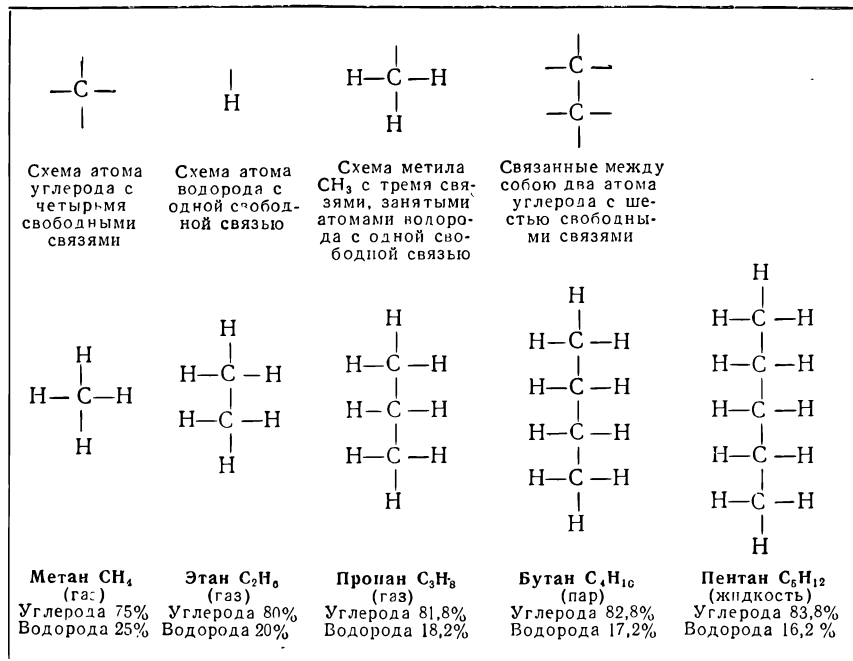
Остальные углеводороды метанового ряда имеют несколько более сложное строение, но если внимательно всмотреться, то оказывается, что все они построены по очень однообразному и, по существу, весьма простому правилу.

Представим себе, что у молекулы метана временно оказался оторванным один из четырех атомов водорода (фиг. 10). У такого осколка метановой молекулы, следовательно, окажется незанятой одна связь, и вещество это, носящее название «метила», окажется крайне неустойчивым. Тогда такой свободной единичной связью метил может заменить собой любой атом водорода в любой органической молекуле, в том числе и в самом метане. Такая замена метилом одного из водородных атомов в метане создает молекулу другого газообразного вещества, носящего название этана ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), как бы полученного по схеме



Если теперь в свою очередь в молекуле этана заменить атом водорода тем же метилом, то возникнет еще несколько более сложная молекула газообразного вещества — пропана ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), как бы полученного по схеме

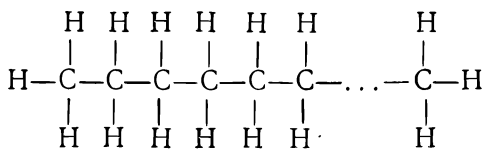




Фиг. 10. Начальные первые члены метанового ряда углеводородов. Общая формула ряда  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ;  $n$  — число атомов углерода в молекуле.

Из молекулы пропана совершенно таким же образом можно получить молекулу бутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) и т. д. При этом все время будет соблюдаться одно и то же правило замены атома водорода метилом и закономерно увеличиваться в последующих молекулах число атомов углерода и водорода. Если число углеродных атомов в молекулах метанового ряда обозначить буквой  $n$ , то, как легко заметить, число водородных атомов в тех же молекулах будет всегда равно  $(2n + 2)$ . Таким образом, общей формулой для любых молекул метанового ряда будет  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ , где число углеродных атомов  $n$  может принимать любые значения, начиная с единицы и выше.

Общее строение молекулы метанового ряда схематически будет таким:



Столь длинных атомных цепочек, характерных для органических соединений, совершенно не знает мертвая неорганическая

природа, хотя к ней и приходится причислять сам углерод, которому собственно и принадлежит эта исключительная способность, составляющая его замечательное свойство<sup>18</sup>.

Чем сложнее (длиннее) такая молекула, т. е. чем больше атомов углерода и водорода в ней сумели связаться, тем она становится тяжелее и тем больше энергии она в себе запасает, отдавая эту энергию в виде свободно выделяющегося тепла при своем разрушении<sup>19</sup>. Наиболее легкие метановые углеводороды представляют собой при 0° С и атмосферном давлении газы (метан, этан, пропан), более тяжелые являются жидкостями, а самые тяжелые — твердыми веществами (парафины).

Существует немало других углеводородных рядов, у которых начальный, простейший углеводород отличен по построению от метана, что придает всему такому ряду специфические свойства. Но как бы ни был построен начальный углеводород, остальные, более сложные углеводороды этого ряда строятся по тому же однообразному и простому правилу замены одного из атомов водорода метилом ( $\text{CH}_3$ ), как и в метановом ряду. В метановом ряду (фиг. 10) атомы углерода связаны между собой прочной единичной связью, и наибольшее число углеродных связей предоставлено в нем для присоединения водородных атомов, почему метановые углеводороды и называются «насыщенными». Ряды с такой же разомкнутой цепочкой, как у метанового ряда, но с двойной ( $\text{C}=\text{C}$ ) или тройной ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ) связью углеродных атомов и, следовательно, с меньшим числом углеродных связей, отданных на присоединение водорода, носят название «ненасыщенных». Такие соединения сравнительно менее стойки по отношению к нагреву и окислению: Самым нестойким углеводородом оказывается ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), обладающий тройной углеродной связью. Он является начальным углеводородом весьма непрочно-го короткого ряда и представляет собой, как известно, легко воспламеняющийся взрывоопасный газ, широко применяемый, например, в сварочном деле.

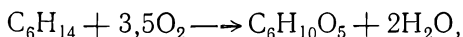
Существуют углеводородные ряды и с замкнутыми углеродными цепочками (ароматические, полиметиленовые). Таким углеводородом является, например, бензол, являющийся начальным углеводородом бензольного ряда.

## 2. УГЛЕВОДЫ, ЖИРЫ И БЕЛКИ

Вернем свое внимание строению углеводородистых веществ, в основу которых положены углеводороды метанового ряда, играющие огромную роль в построении живых организмов.

Так, например, вещество, составляющее оболочку клеточки растения и потому носящее название «клетчатки», содержит шесть атомов углерода, десять атомов водорода и пять атомов кислорода ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ). Происхождение такой молекулы упрощенно можно себе представить в виде окисления метанового угле-

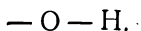
водорода «гексана», содержащего шесть атомов углерода ( $C_6H_{14}$ ), который преобразовывается в клетчатку по схеме



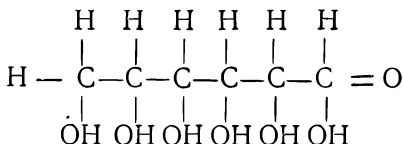
причем присоединение трех с половиной молекул кислорода (семи атомов) сопровождается отщеплением двух молекул воды. Молекулы клетчатки живут при этом не в одиночку, а связываются с другими такими же молекулами в длинную цепочку, образуя сплошное тело клетчатой оболочки. Это тоже замечательное своеобразное свойство органических молекул — создавать такие большие сплошные молекулы, без чего было бы невозможно существование живой материи. Однако чем большее число таких первичных органических молекул сцепляется в одну большую вторичную молекулу, тем менее прочной она становится по отношению ко всяким разрушительным воздействиям (нагреванию, окислению и т. п.).

Клетчатка относится к тому типу углеводородных окислов, которые носят несколько формальное название «углеводов», так как в них соотношение между числом атомов кислорода и водорода соответствует их соотношению в молекуле воды (один атом кислорода связан с двумя атомами водорода). Действительно, десять атомов водорода в первичной молекуле клетчатки соответствуют пяти атомам кислорода, т. е. соединение их как бы представляет собой пять молекул воды ( $H_{10}O_5 = 5H_2O$ ). К «углеводам» принадлежат и все разновидности сахаров и крахмалов, играющих весьма важную роль в составе живой материи.

Однако никакие молекулы воды на самом деле не включаются в состав углеводов. Углеводы представляют собой, подобно углеводородам, ту же углеродную цепочку с присоединенными к ней атомами водорода, в которой часть водородных атомов заменена особой группой, носящей название «гидроксильной», схема которой представляется следующим образом:



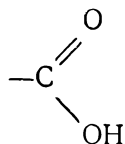
Как видно из схемы, «гидроксил» имеет одну свободную связь со стороны кислорода и в этом смысле как бы равнозначен атому водорода, который он и замещает в соответствующих органических молекулах. Примером может служить строение простых сахаров, которые в настоящее время представляют себе по следующей схеме:



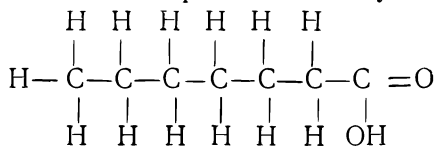
Две черточки означают двойную связь между последним атомом углерода и одним атомом кислорода. Более сложный, так называемый тростниковый сахар можно получить соединением двух таких молекул, если у одной из них отнять атом водорода, а у

другой — один гидроксил и связать эти молекулы освободившейся у каждой из них связью.

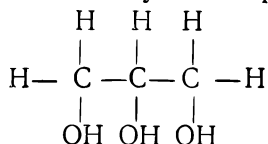
Не менее важную, чем углеводы, роль в составе тканей живых растений и животных играют органические соединения, носящие название жиров и белков. Молекулы жиров представляют собой сложные соединения, возникающие от сочетания молекул жирных кислот и глицерина. Жирные кислоты представляют собой углеводородные цепочки с теми же атомами углерода, но в них один атом углерода связан с особой группой, носящей название «карбоксила» (карбоксильная группа), которая и придает им кислотные свойства. Строение карбоксила представляют себе в виде схемы



в которой одна из четырех связей углеродного атома остается свободной и ею он может присоединяться к углеводороду. Простая жирная кислота имеет строение по следующей схеме:

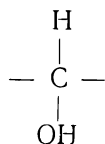


У глицерина же строение молекулы изображается схемой

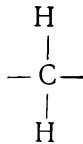


Молекула жира образуется при соединении трех молекул жирной кислоты с одной молекулой глицерина с выделением трех молекул воды. Жирные кислоты в живых клетках носят еще более сложный характер, но строятся сложные жиры таким же образом.

При жизнедеятельности растений весьма важным процессом является процесс превращения углеводов в жиры, происходящий под воздействием солнечного излучения и приводящий к раскислению углеводных молекул, т. е. к их «восстановлению», а следовательно, к накоплению в живом организме растения солнечной энергии. При этом характерной для углеводов, как мы это видели в приведенных схемах, является несколько раз повторяющаяся группа

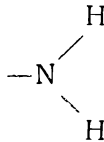


которая в жирах заменяется аналогичной группой

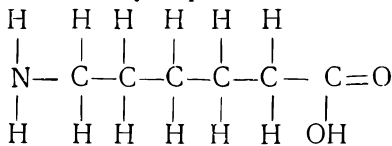


Белковые вещества, без которых невозможна жизнь ни одного живого организма, также являются весьма сложными по своему строению.

По сути дела это те же углеводороды, к которым, помимо уже упоминавшейся карбоксильной группы (COOH), присоединена так называемая аминогруппа (NH<sub>2</sub>), как бы представляющая собой осколок молекулы аммиака NH<sub>3</sub>, водный раствор которого называется нашатырным спиртом. В органических соединениях азот проявляет себя как обладатель трех полноценных связей. Поэтому схема аминогруппы будет выглядеть так:



т. е. она также обладает одной незанятой связью, которая может присоединяться к углеводородам, создавая так называемые аминокислоты — азотистые вещества, входящие в сложный состав белков. Примером такой аминокислоты может служить схема с уже знакомой нам шестиуглеродной основой:



на левом конце которой находится аминогруппа (NH<sub>2</sub>), а на правом — карбоксил (COOH).

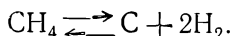
Ознакомившись на этих немногочисленных, сравнительно простых, но весьма поучительных примерах с тем, какими приемами живая материя создает свои сложные молекулярные постройки при помощи затрачиваемой на это дело энергии или, иначе говоря, накапливая эту энергию в своих молекулах, обратимся к другим сторонам вопроса, интересующим цели нашего изложения.

Когда живая материя отмирает, оставляя нам свои лишённые жизни сложные молекулярные сооружения, мы легко убеждаемся в том, насколько они непрочны и подвержены разрушению. Они быстро гибнут не только при процессах гниения, возникающих от нападения на них бесчисленных армий бактерий, жаждущих питания, но и при других процессах, начинающихся под воздействием более простых физических и химических факторов, в первую очередь нагрева и окисления.

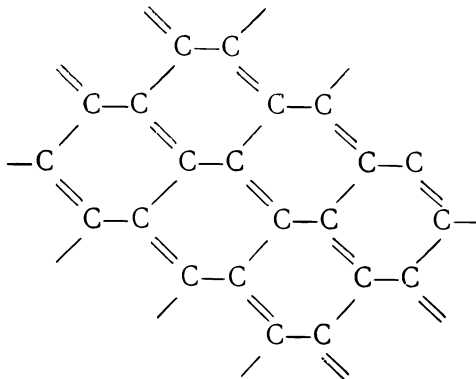
### 3. РАЗРУШЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Уже при достаточно длительном воздействии температуры примерно  $66^{\circ}\text{C}$  гибнут живые организмы всех бактерий (на этом основан процесс пастеризации молока и консервов), а при температуре около  $110\text{--}115^{\circ}\text{C}$  заметно начинают разрушаться и некоторые органические молекулы. Это учитывают, например, при искусственной тепловой сушке всевозможных органических веществ и, в частности, топлива, не давая температуре в сушилке подниматься выше  $105^{\circ}\text{C}$ .

Губительное воздействие повышенной и, тем более, высокой температуры при нагреве без доступа воздуха заключается в том, что при этом расшатываются связи между отдельными атомами или звеньями атомов. Это происходит тем скорее и при тем меньшей температуре, чем слабее эти связи, а наиболее непрочные связи, как уже отмечалось, принадлежат наиболее сложным органическим молекулам. Они распадаются при этом на более простые звенья, которые за счет освободившихся связей по-новому комбинируют свои атомы в соединения, способные выдерживать данную температуру. Если температуру еще повысить, то и уцелевшие от распада звенья начинают разваливаться в свою очередь вплоть до возникновения самых простейших, наиболее стойких к нагреву атомарных сооружений. Последними будут разваливаться самые простые углеводородные молекулы, которыми начинаются те или иные углеводородные ряды, например, метан ( $\text{CH}_4$ ), этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ), бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ). Из них наиболее крепко построенной является молекула метана, однако и она начинает окончательно разрушаться при температурах, превышающих  $600^{\circ}\text{C}$ , распадаясь на углерод и водород по схеме



Атомы углерода со своими четырьмя свободными связями отдельно существовать в земных условиях не могут и комбинируются (связываются) в твердые углеродные кристаллы графита по шестиугольной схеме:



которые становятся видимыми для глаза в виде сажистых частиц. Отщепление таких твердых сильно раскаленных частиц углерода при горении различных жирных веществ и приводит к яркому свечению пламени, во многих случаях используемому для осветительных целей (свечи, керосиновые лампы и т. п.). Как видно из схем, кристаллическая решетка графита имеет вид плоскостей (с чередующимися двойными и одиночными связями углеродного атома), которые придают ему свойства слоистой системы. Эти слои связаны и между собой, но весьма непрочны и способны менять (увеличивать) расстояния между собой, позволяя другим веществам, в частности кислороду и азоту, проникать между слоями и застревать там без фактической химической связи, чисто механическим путем.

В довольно наглядном виде процесс распада сложных органических молекул можно наблюдать внутри огневого факела любой свечи (парафиновой, стеариновой, восковой). Само горение идет в этом факелке только снаружи, где частицы горючего газа встречаются уже с частицами кислорода, вступая с ними в соединение. Эти наружные горючие частицы перехватывают весь поступающий из атмосферы кислород, не давая ему проникнуть внутрь факелка.

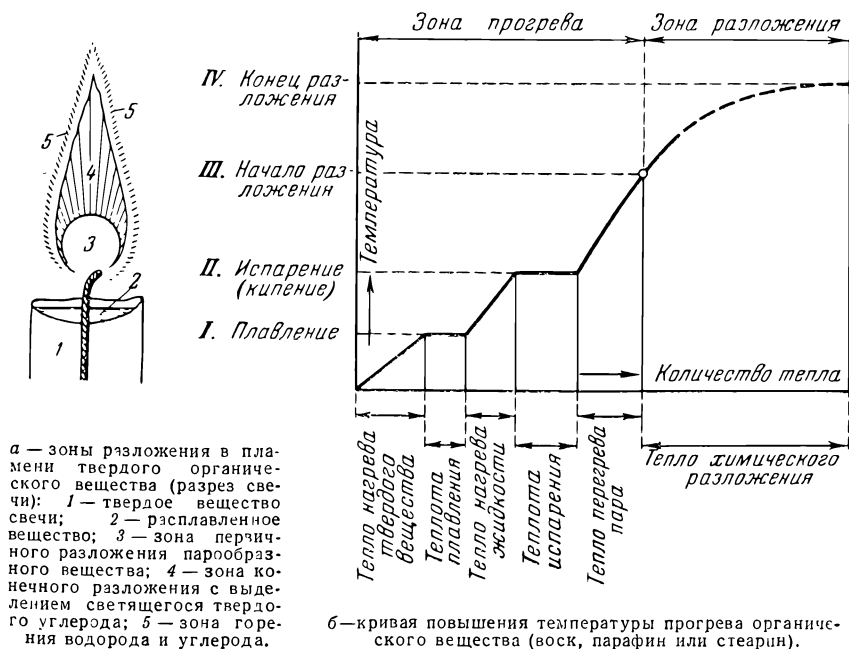
Такая огневая оболочка создает для частиц, летящих кверху внутри факелка, зону высоких температур, при воздействии которых они и испытывают последовательные стадии все более глубокого разложения вплоть до расщепления самых стойких углеводородных молекул на водород и сажу. Последние и сгорают в верхних частях огневой оболочки, если там не возникает переохладения или недостатка кислорода, приводящих к появлению копоти (фиг. 11).

Наблюдая горение свечи, мы видим, как твердое вещество свечи, расплавленное в некотором количестве лучистым нагревом от пламени, впитывается фитилем и подается к корню факелка, где оно под воздействием более высокой температуры испаряется и поступает снизу в самый факелок, питая его топливом. В нижней части пламени легко различима прозрачная темная (несветящаяся) зона, в которой углеводородный пар проходит начальные стадии разложения. В верхней внутренней части пламенного факелка возникает ярко светящаяся зона, свидетельствующая о том, что именно здесь происходит окончательное расщепление уже газообразных простейших углеводородов с обильным выделением раскаленных твердых частичек углерода. Погрузив на самый короткий срок в такое пламя холодную — стеклянную палочку и вынув ее, мы увидим, что часть ее, побывавшая во внутренней светящейся зоне, покрыта налетом сажи, а соседнее место, побывавшее только в огневой оболочке пламени, окажется покрытым капельками воды, сгустившейся из водяных паров, возникающих от сгорания водорода<sup>17</sup>.

Этот водород, как и обнаруженный сажистый углерод, и являются последней стадией длинного последовательного процес-

са разрушения сложнейших первоначальных молекул органического происхождения.

На фиг. 11 показан общий ход всего теплового процесса, наблюдаемого при горении вещества свечи. По горизонтали показано увеличивающееся количество тепла, воспринимаемое веществом (например, парафином), а по вертикали — температура вещества, воспринимающего это тепло. Сначала при прогреве твердого вещества его температура растет до какого-то предела, при



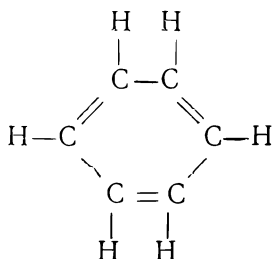
Фиг. 11. Прогрев и разложение твердых углеводов.

котором вещество начинает плавиться. Затем тепло продолжает расходоваться уже не на повышение температуры этого вещества, а на его переход из твердого состояния в жидкое (расход на «скрытое» тепло плавления), при котором температура остается постоянной, что показано первым горизонтальным участком кривой. После перехода в жидкое состояние прогрев вещества уже в виде жидкости снова приводит к повышению его температуры. На определенном температурном уровне подъем температуры остановится во второй раз, свидетельствуя о начавшемся переходе жидкости в парообразное состояние (тепло расходуется на «скрытую» теплоту парообразования). Затем уже в парообразном состоянии начнется расход тепла на перегрев пара, т. е. на повышение его температуры. До сих пор характер такой ломаной кривой для твердых углеводов совершенно аналогичен

кривой перехода водяного льда сначала в жидкое, потом в парообразное состояние. Однако это продолжается только до какой-то критической температуры, отмеченной на фиг. 11 точкой *K*. При дальнейшем притоке тепла к уже газообразному веществу (перегретому пару; температура растет, плавно замедляясь) углеводородные молекулы окажутся неустойчивыми и начнут разрушаться, последовательно распадаясь на более стойкие осколки, которые в дальнейшем, разрушаясь в свою очередь, приведут к окончательному распаду вещества на углерод и водород.

#### 4. РАЗРУШЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ ПРИ ПОСТЕПЕННОМ ОКИСЛЕНИИ

Мы уже убедились, что реакции окисления органических молекул являются также процессами разрушительными (в противоположность созидательным процессам раскисления), если говорить о судьбе первичных углеводородных молекул. Постепенно присоединяя к себе атомы кислорода, углеводородная молекула теряет способность сопротивляться как воздействию повышенной температуры, так и дальнейшему воздействию кислорода. В этом отношении атомы кислорода, сумевшие войти в состав углеводородной молекулы, играют как бы роль своеобразной «пятой колонны», способствуя ускорению гибели первоначально стойкой «углеводородной крепостцы». Это видно на примере такого стойкого к окислению вещества, как бензол ( $C_6H_6$ ) — простейшего ароматического углеводорода, молекула которого представляет собой своеобразную замкнутую цепочку, как бы сооруженную по принципу «круговой обороны» по схеме,



в которой атомы углерода связаны между собой чередующимися двойными и одиночными связями. При нормальной температуре бензол практически равнодушен к присутствию кислорода и на воздухе не способен окисляться. Если в такой молекуле один из водородов по уже знакомому нам правилу замещения заменить гидроксилом (ОН), то получится молекула фенола ( $C_6H_5O$ ) — ядовитого вещества, широко применяемого в водном растворе при дезинфекции под названием «жарболки» (карболовая кислота). Вещество это уже проявляет слабую способность окисления на воздухе. Следующая ступень окисления молекулы бензола приводит к возникновению весьма охотно окисляющегося веще-

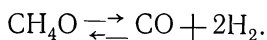
ства — гидрохинона ( $C_6H_6O_2$ ), применяемого, например, в фотографии. Наконец, чрезвычайно сильной способностью к быстрому окислению на воздухе отличается следующий окисел бензола, носящий название пирогаллола ( $C_6H_6O_3$ ). Пирогаллол представляет собой белый порошок, щелочной раствор которого применяется при определении состава топочных газов для выяснения наличия в них свободного кислорода. Оставление такого раствора на воздухе приводит к немедленному быстрому поглощению кислорода, сопровождающемуся сильным нагревом, что свидетельствует о бурно протекающей реакции окисления вплоть до полного насыщения раствора кислородом. Описанные свойства окислов бензола для наглядности сведены в табл. 3.

Таблица 3

Название вещества	Молекулярная формула	Способность к окислению при нормальной температуре
Бензол . . . . .	$C_6H_6$	Нулевая
Фенол . . . . .	$C_6H_6O$	Слабая
Гидрохинон . . . . .	$C_6H_6O_2$	Сильная
Пирогаллол . . . . .	$C_6H_6O_3$	Очень сильная

Совершенно аналогично этому проявляют себя и окислы углеводородов другого типа, в частности метановые углеводороды. Весьма нестойки в отношении нагрева и окисления глубоко окисленные молекулы «углеводов» и, в частности, клетчатка ( $C_6H_{10}O_5$ ), составляющая основу древесины, легко разлагающаяся (обугливающаяся) при нагреве без доступа воздуха, а при нагреве с доступом воздуха образующая легко воспламеняющуюся газообразную горючую смесь. Это в значительной мере отличает углеводы, представляющие собой твердые вещества, от чистых или малоокисленных твердых (или жидких) углеводородов, которые проявляют при нагреве известную стойкость и переходят, как мы уже видели (воска, смолы, жиры), сначала в жидкое состояние, потом — в парообразное и начинают распадаться только в сильно перегретом газообразном состоянии.

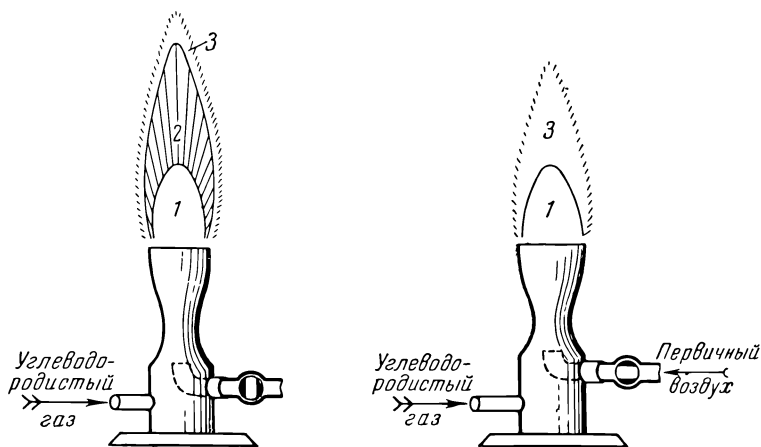
Распад молекул частично окисленных углеводородов под воздействием повышенных и высоких температур принимает несколько другой характер. Так, например, метиловый спирт  $CH_4O$  при расщеплении его молекулы даст продукт распада в виде окиси углерода  $CO$  и водорода по схеме



Отсутствие раскаленных частиц твердого углерода в пламени спирта и объясняет возникновение полупрозрачного слабо светящегося факелка с лиловато-синеватым пламенем, характерным для горения водорода (фиолетовое пламя) и угарного газа (си-

нее пламя). Для того чтобы спиртовое пламя, обладающее весьма высокой температурой, заставить ярко светиться, следует ввести в него какое-нибудь огнеупорное тело, дающее яркий накал<sup>20</sup>.

Можно, наоборот, заставить пламя жирных углеводородов потерять светимость, воспользовавшись их способностью быстро присоединять к осколкам своих распадающихся молекул кислород воздуха. С этой целью в зону повышенной температуры (зо-



а — кран первичного воздуха закрыт. б — кран первичного воздуха открыт.

Фиг. 12. Разрезы пламени газовой горелки при горении углеводородистого газа.

1 — прозрачная зона первичного разложения углеводородов; 2 — светящаяся зона конечного разложения углеводородов; 3 — зона горения.

ну начального разложения) следует подать некоторое количество воздуха, который в дальнейшем будем называть «первичным». Кислород первичного воздуха начнет вмешиваться в процесс разложения органических молекул, способствуя отщеплению углерода уже не в твердом виде, а подобно примеру со спиртом в виде прозрачной окиси углерода (CO). На фиг. 12 показан характер изменения (уменьшения) светимости пламени газовой горелки при вводе в газ соответствующего количества первичного воздуха, достаточного для перевода всего углерода в окись углерода.

На этом же принципе основано устройство известной керосиновой кухни «керогаза», в которой предварительное вмешательство первичного воздуха в процесс разложения керосиновых паров приводит к уничтожению способности керосинового газа выделять твердый углерод. В керогазе керосин начинает от этого гореть полусветящимся прозрачным пламенем, в то время как в примусе и, тем более, в керосиновой осветительной лампе этот же керосин дает ярко светящееся пламя.

## 5. ТЕПЛОВАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ТОПЛИВА ПЕРЕД СГОРАНИЕМ

В техническом обиходе редко приходится иметь дело с простым по однородности молекул топливом. В таких случаях это чаще всего какой-нибудь простейший горючий газ, например: окись углерода, водород, ацетилен и т. п. Могут встретиться и однородные горючие жидкости, например бензол, метиловый или этиловый спирт. Однако гораздо чаще жидкие горючие масла являются целым набором веществ с различным составом и свойствами, растворенных друг в друге. Наиболее сложным топливом такого типа является сырая нефть, представляющая собой смесь самых различных масел от легких (бензинов) до самых тяжелых (асфальтенов). Пользуясь тем, что эти масла кипят (испаряются) при различных температурах, их можно отделить друг от друга целыми группами, что и делается при отгонке бензинов, керосинов, всевозможных моторных масел, начиная с солярового масла и кончая тяжелым моторным топливом, затем целой гаммы смазочных масел от легких до тяжелых и вязких. В виде конечного остатка таких перегонок получается мазут, который в основном применяется как топливо. Однако все эти маслянистые вещества, даже в чистом, несмешанном виде, представляют собой еще достаточно сложные смеси углеводородов с разными составом и свойствами. Капля такого топлива, попадая в очаг горения, прежде всего подвергается предварительному испарению, перегреву и последующему расщеплению, т. е. своеобразному процессу газификации с последовательными стадиями физического, а потом и химического преобразования, после чего уже в сильно преобразованном, упрощенном газообразном состоянии такое «топливо» вступает в процесс горения.

Подобный ход предварительных преобразований мы видели на примере вещества свечи (стеарина, парафина или воска). Если вернуться к фиг. 11, то можно констатировать после всего сказанного, что огневой факелок свечи напоминает собой своеобразный «организм», живущий до тех пор, пока в его огневой оболочке (огневой «ткани»), в которую поступают газифицированное топливо и кислород воздуха, происходит правильный «обмен веществ». Огромную роль в этом правильном обмене играет внутренняя полость факелка — эта важная подготовительная зона процесса, функции которой в какой-то мере напоминают функции «пищеварительной системы»: ее задача состоит в том, чтобы совершенно неусваиваемый огневой оболочкой первичный питательный материал (стеарин, парафин или воск) путем сложных процессов расщепления и частичных процессов восстановления и окисления переработать в простейшие газообразные «усваиваемые» питательные вещества, способные вступать во взаимодействие с кислородом в тонкой огневой оболочке факелка свечи.

Частицы твердого топлива представляют собой еще более сложную смесь органических веществ. Жирные вещества нахо-

дятся в них в сравнительно небольшом количестве. Так, например, можно отогнать из каменного угля каменноугольное масло. Если же предварительно провести процесс ожирнения каменного угля, искусственно обогатив его водородом (под значительным давлением и при достаточно высокой температуре), то такое ожирненное вещество отгонкой при различных температурах выдаст подобно нефти целую группу масел, начиная с бензинов и кончая разными тяжелыми маслами, хотя они и будут обладать несколько отличными от нефтяных масел свойствами.

В составе каменных и бурых углей содержится значительно больше сильно окисленных и потому непрочных твердых углеводородов (так называемых «гумусовых веществ»), которые при нагреве не плавятся, как маслянистые (так называемые «битуминозные») вещества, а сразу же при сравнительно умеренных температурах распадаются на газ и твердый обугленный остаток. Части природного топлива, улетучивающиеся в виде газа или пара при сильном нагреве до высокой температуры без доступа воздуха, носят название «летучих» топлива. Количество их выясняется по убыли в весе первоначальной пробы размельченного топлива, прогретой до определенной температуры в специальном тигле. Углистый твердый коксовый остаток может при этом оказаться спекшимся, но может также сохранить первоначальное порошкообразное состояние. Спекаемость коксов некоторых каменных углей объясняется наличием в этих углях достаточного количества маслянистых плавящихся веществ (битумов), которые сначала при умеренном прогреве переходят в жидкое или пластическое состояние, склеивая между собой и неплавящиеся частицы, а потом и сами затвердевают, обугливаясь с выделением газа при дальнейшем повышении температуры\*.

Характерный в среднем выход летучих веществ у различных твердых топлив приводится в табл. 4, из которой явствует, что выход летучих уменьшается по мере увеличения «химического» возраста топлива, т. е. по мере увеличения степени химической переработки первичного растительного материала в естественных условиях. Приведем данные для чистой горючей массы.

Неизбежность разложения всякого топлива в высокотемпературных топочных условиях, предшествующего процессу их сжигания, приводит к тому, что в очагах горения *истинным* топливом оказывается не исходное топливное вещество, играющее роль «топливного сырья», а по крайней мере две разновидности его глубокой тепловой переработки: газообразные осколки первичных молекул, получающиеся в результате возгонки и расщепления, и твердый углерод в виде кокса.

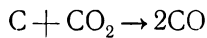
Дело еще осложняется тем, что при наличии высоких температур, вызываемых тепловыделением очага горения, в последнем начинают охотно протекать и обратные, восстановительные реак-

---

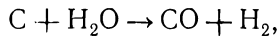
\* Такая же судьба суждена пластическому куску теста, если ему предоставляют время перегреться в слишком жаркой духовке и превратиться в своеобразный кусок твердого кокса.

Название топлива	Выход летучих, % по весу	Характер коксового остатка
Древесина . . . . .	80	Неспекшийся (древесный уголь)
Торф . . . . .	75—70	Неспекшийся
Бурый уголь . . . . .	60—45	"
Молодые каменные угли . .	45—25	Неспекшийся или слабо спекшийся
Жирные (битуминозные) угли	25—15	Спекшийся
Тощие угли . . . . .	15—10	Слабо спекшийся или неспекшийся
Полуантрациты . . . . .	10—7	Неспекшийся
Антрациты . . . . .	5—3	"

ции частичного раскисления продуктов полного сгорания (углекислоты и водяного пара) с образованием горючих газов и в первую очередь окиси углерода и водорода, например по схемам

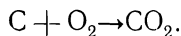


и



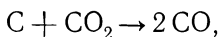
которые требуют на свое осуществление затраты тепла, всегда имеющегося в избытке в любом топочном процессе. Этот газ, присоединяясь к продуктам разложения летучих, завершает предварительную газификацию топлива, вступающего в окончательный окислительный процесс в сильно упрощенном газообразном состоянии, легко усваиваемом очагом горения. Эта часть твердого топлива, переработанного в предварительной зоне, постепенно смешиваясь с воздухом, горит на лету в топочном объеме, создавая пламенный процесс, представляющий собой как бы совокупность множества факельных очагов горения.

До последнего времени считалось, что горение твердого углеродистого остатка, называемого коксом, имеет совсем другой характер, так как в этом случае топливо и окислитель находятся в различных физических состояниях: топливо — в твердом, а окислитель — в газообразном. Представляли себе, что твердый углерод в состоянии вступать в непосредственную реакцию с кислородом по уже приводившейся схеме

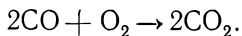


На самом деле новейшие исследования показывают, что окончательное окисление чистого углерода идет гораздо сложнее и сопровождается также своеобразным предварительным «газификационным» процессом. Таким образом, так же как и остальное «топливное сырье», углерод в первоначальном твердом виде «не-

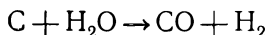
усваиваем» в очаге горения. Указанная предварительная газификация приводит к одновременному образованию углекислого газа и окиси углерода. При этом часть углекислого газа раскисляется при высоких температурах по схеме



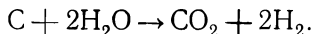
после чего, как эта вторичная окись углерода, так и первичная доокисляются по схеме



При наличии воды или водяного пара еще охотнее идет газификация углерода по схемам



и



Обе эти схемы дают горючий газ, содержащий водород. Так, кокс, практически не выделяющий летучих (ранее от него отогнанных), казалось бы, должен был в слое гореть без пламени (вернее, с коротким окисным пламенем). При смачивании же его водой или подпаривании воздуха, идущего на горение, горящий слой кокса выдает в топочный объем относительно длинное пламя за счет горения указанного водородистого газа, получаемого предварительной газификацией кокса при воздействии на него влаги.

Все сказанное выше убеждает нас также и в том, что даже простейшие газообразные, а тем более парообразные органические газы (метан, этилен, ацетилен, пары бензина или керосина и т. п.) сами по себе «негорючи», пока не окажутся предварительно преобразованными до простейших составляющих в виде смеси осколков молекул, атомов и уцелевших или образовавшихся молекул окиси углерода и водорода ( $CO$  и  $H_2$ ). Несколько худший результат возникает при нехватке собственного кислорода в органической молекуле для ее разложения с выходом окиси углерода, вместо которой расщепление дает выпадение твердого сажистого углерода, так как он сам еще должен пройти стадию газификации. В этом смысле, скажем, метиловый спирт ( $CH_4O$ ) — «горючее» самого метана ( $CH_4$ ), из которого он произошел. Однако, как мы видели, можно довольно легко помочь и метану поскорее перейти в «усваиваемую» для горения форму, введя на ранних стадиях газификации некоторое недостающее ему количество первичного кислорода, которое не даст выделяться саже и успеет перевести углерод метановой молекулы в газообразное предварительное состояние в виде той же окиси углерода. Когда же, как это еще принято, говорят о «горении» метана или другого газообразного углеводорода, то это не что иное, как упрощение, игнорирующее важную промежуточную подготовительную стадию и интересующееся только самим конечным эффектом, за которым скрывается истинный ход процесса,

## Глава четвертая

### ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТОПЛИВА

#### 1. ЧЕМ БОЛЬШЕ ОКИСЛЕНО ТОПЛИВО, ТЕМ МЕНЬШЕ В НЕМ ЗАПАС ТЕПЛА

Солнечная энергия, достигая земной поверхности, играет огромную роль в энергетике земли. Это — вечный «труженик», непрерывно производящий неисчислимое количество работы<sup>21</sup>. Простейшим примером титанической работоспособности лучистой солнечной энергии в земных условиях является ее роль «земного водовоза». Ежесекундно огромные массы воды испаряются за счет расходования этой лучистой теплоты, поднимаются в воздух и в пределах тропосферы переносятся в другие районы земного шара, чтобы там низринуться на землю вновь в виде сгустившихся в капли или снежинки водных потоков. Трудно представить себе грандиозные масштабы такой насосной станции, которая могла бы своей работой заменить эту работу солнечной энергии по всему водообороту, обеспечивающему земное водоснабжение.

Как и всякая другая разновидность энергии, лучистая энергия обладает способностью преобразовываться в любые виды энергии: тепловую, механическую, электрическую или энергию химических превращений, затрачиваясь в последнем случае на протекание теплопотребляющих химических реакций. Как уже упоминалось в своем месте, зеленое вещество растений — хлорофилл — способствует тому, чтобы улавливаемая растением солнечная энергия не переходила в подавляющем своем количестве в тепло и не приводила бы, таким образом, к губительному для растений повышению температуры, а производительно тратилась бы в виде химической энергии на созидательную работу построения новых сложных молекулярных сооружений, разбиравшихся в предыдущей главе.

Подобно тому как материя не может исчезнуть и только переходит из одного состояния в другое, так и энергия может только преобразовываться из одного вида в другой, принимая в некоторых случаях скрытые формы. На испарение 1 кг воды тратится определенное количество тепла, зависящее от давления, при кото-

ром образуется пар. Это количество тепла как бы приобретает временно «скрытую» форму, так как идет не на повышение температуры кипящей жидкости, а на работу по переводу жидкости в парообразное состояние. Затраченная энергия при этом не исчезает, а переходит в теплосодержание 1 кг пара, возвращаясь в том же самом количестве в виде свободно выделенного тепла при обратном сгущении (конденсации) этого пара в жидкость.

Совершенно аналогично этому солнечная энергия, использованная растением для преобразования и постройки новых органических молекул, накапливается этими молекулами в скрытом виде и выдается ими обратно в виде свободно выделенного тепла при их частичном или полном разрушении в процессе промежуточного окисления или полного сгорания.

Постройка и преобразование органических молекул в организмах животных и человека не связаны с непосредственным потреблением солнечной энергии. Для этой цели служит энергия, уже накопленная в органических веществах растениями или животными, идущими в пищу и играющими роль «топлива» в окислительных процессах, происходящих за счет кислорода вдыхаемого воздуха в тканях живущих организмов.

Итак, мы выяснили, что процесс окисления молекулы углеводорода сопровождается потерей (рассеянием) запасенного в ней в скрытом виде тепла, причем потеря эта тем больше, чем глубже окислен углеводород, т. е. чем больше атомов кислорода он к себе присоединил. Постепенно окисляемая углеводородная молекула как бы спускается на более низкие энергетические уровни и достигает нулевого уровня, когда полностью разваливается на углекислоту (углекислый газ  $\text{CO}_2$ ) и воду или водяные пары ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Оба эти продукта полного окисления углерода и водорода, ранее входившие в начальную углеводородную молекулу, сами далее уже окисляться не могут и не обладают никаким добавочным запасом тепла, который они могли бы выделить в свободном виде.

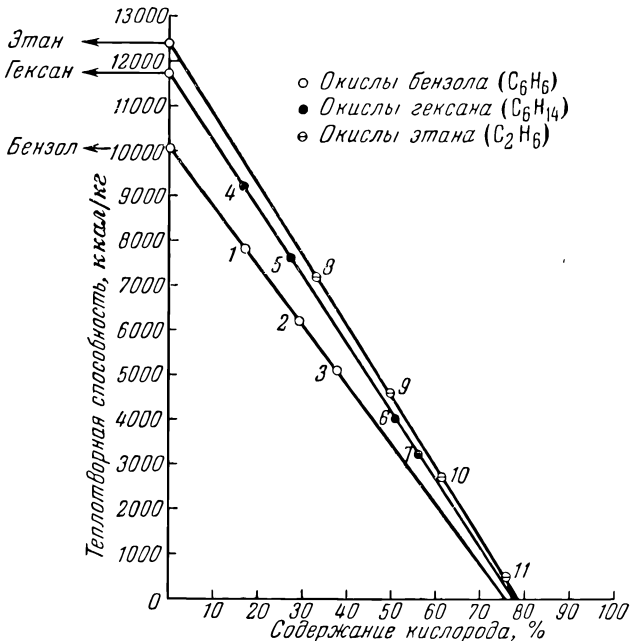
Наоборот, в обратном процессе раскисления или «восстановления» органическая молекула накапливает запас связанного («скрытого») тепла, доводя его до наибольшей возможной величины при полном раскислении, т. е. при переходе в состояние чистого углеводорода.

Всем этим и определяется теплопроизводительность любого топлива органического происхождения, всегда содержащего в основной своей части (без примесей) углерод, водород и кислород. Она становится тем ниже, чем больше оказывается окисленной углеводородная основа данного топлива. Наиболее высоких значений она достигает в топливах, состоящих из практически неокисленных углеводородов (например, нефть, природный газ).

## 2. ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТОПЛИВА

Теплопроизводительность топлива, отнесенная не к единичной молекуле, а к 1 кг вещества и выраженная в больших калориях (килокалориях), является одной из важнейших характеристик топлива для оценки его сравнительных качеств. Эту характеристику принято называть «теплотворной способностью топлива» (ккал/кг) <sup>22</sup>.

Падение теплотворной способности от наивысшего значения у чистого углеводорода до нулевого значения у продуктов его полного окисления иллюстрируется на фиг. 13.



Фиг. 13. Падение теплотворной способности (запаса тепла в ккал/кг) углеводородов с увеличением содержания кислорода в их окислах.

1 — фенол  $C_6H_6O$ ; 2 — гидрохинон  $C_6H_4O_2$ ; 3 — пирогаллол  $C_6H_2O_3$ ; 4 — пинакольный спирт  $C_6H_{14}O$ ; 5 — пинаколь  $C_6H_{14}O_2$ ; 6 — манит  $C_6H_{14}O_6$ ; 7 — глюкоза  $C_6H_{12}O_6 + H_2O$  и клетчатка  $C_6H_{10}O_5 + 2H_2O$ ; 8 — этиловый спирт  $C_2H_6O$ ; 9 — этилен-гликоль  $C_2H_4O_2$ ; 10 — уксусная кислота  $C_2H_4O_2 + H_2O$ ; 11 — щавелевая кислота  $C_2H_2O_4 + 2H_2O$ .

Здесь по горизонтали отложено весовое содержание кислорода в молекулах окислов первичного углеводорода, включая и отделяющуюся на отдельных этапах окисления воду, а по вертикали — теплотворная способность, если выделяемое тепло отнести к суммарному весу как получаемого окисла, так и отделяющейся при этом воды. Такая «условная» теплотворная способность поучительна тем, что закон ее падения принимает простой вид наклонной прямой линии, указывающей на пропорциональ-

ное снижение запаса тепла по мере увеличения в углеводородных окислах содержания кислорода. Так постепенно разрушительная работа кислорода, проникающего в состав молекулы, приводит к полной потере запаса тепла, когда-то столь трудолюбиво накапливавшегося во время созидательного периода построения углеводородной молекулы.

Чистый остаток молекулы после частичного отделения воды будет, понятно, беднее кислородом и, следовательно, истинная теплотворная способность, т. е. теплопроизводительность, отнесенная только к 1 кг этого чистого остатка без выделившейся попутно воды, будет соответственно выше.

Из всех чистых углеводородов самой высокой теплотворной способностью обладает метан (13 300 ккал/кг). Это объясняется тем, что в нем, как уже отмечалось, все четыре свободные связи углеродного атома отданы на присоединение четырех атомов водорода, и весовое содержание водорода достигает наибольшего значения (25%) по сравнению со всеми другими углеводородами, а водород теплопроизводительнее углерода больше чем в 4 раза. В самом деле, количество тепла, выделяемое 1 кг водорода при сгорании его в воду, равно 34 180 ккал/кг, а 1 кг углерода (графита) — только 7 840 ккал/кг.

Если сжечь 0,25 кг свободного водорода и 0,75 кг свободного углерода, то в сумме выделится тепла

$$\begin{array}{r} 0,25 \cdot 34\,180 = 8\,545 \text{ ккал} \\ 0,75 \cdot 7\,840 = 5\,880 \text{ ккал} \\ \hline \text{Итого на 1 кг} \\ \text{смеси . . .} \quad 14\,425 \text{ ккал} \end{array}$$

Получаемая разница  $14\,425 - 13\,300 = 1\,125$  ккал представляет собой скрытое количество тепла, потребовавшееся на перестройку молекул метана и кислорода в молекулу двууглекислого газа и воды ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Такие же сопоставления можно сделать и для других углеводородов, из которых особый интерес представляют ацетилен ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) и бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), так как при разном строении их молекул они содержат совершенно одинаковые весовые количества углерода и водорода. Расчетные сопоставления сведены в табл. 5.

Таблица 5

Название газа	Содержание, %		Состояние при 0°C и атмосферном давлении	Тепловыделение на 1 кг, ккал/кг		
	С	Н		фактическое	по норме углерода и водорода	разница
Ацетилен .	92,3	7,7	Газ . . .	12 000	9 860	+ 2 140
Бензол . .	92,3	7,7	Жидкость	10 080	9 860	+ 220
Метан . .	75,0	25,0	Газ . . . .	13 300	14 425	- 1 125

Разница объясняется совершенно разными расходами энергии на построение молекул. Молекула метана при своем возникновении выделяет избыточное тепло, а при разрушении, следовательно, требует его назад, уменьшая выделяемую при ее сгорании порцию тепла. Молекулы же бензола и особенно ацетилена при возникновении забирают тепло, а при разрушении возвращают его, прибавляя это тепло к своей теплопроизводительности против нормальной теплопроизводительности соответствующих количеств углерода и водорода. В связи со всем этим нельзя вывести вполне удовлетворительную общую формулу теплотворной способности топлив органического происхождения, основанную на подсчетах по содержанию углерода и водорода с учетом их теплопроизводительности в свободном состоянии. Обычно в таких формулах кислороду, содержащемуся в самом топливе, приписывается отрицательная теплопроизводительность, одинаковая для любых органических соединений. При таком счете всегда известная часть скрытых теплот органических соединений остается неучтенной и формулы оказываются недостаточно надежными для отдельных разновидностей топлива. С этой точки зрения давнишнее стремление многочисленных авторов к созданию сверхуниверсальных формул для теплотворной способности топлив в настоящее время надо считать научно необоснованным. Если теплотворная способность топлива зависела бы только от его состава, то, например, у бензола и ацетилена, имеющих одинаковый состав (при разном строении молекул), она оказалась бы одинаковой.

### 3. РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОПЛИВ

Основываясь на отмеченном ранее прямолинейном характере падения условной теплотворной способности углеводородных окислов по мере увеличения в них содержания кислорода и вводя некоторые поправки для перехода на истинные теплотворные способности, можно связать последние с составом топлива следующим рядом расчетных формул, в которых буквами С, Н и О обозначено соответственно содержание углерода, водорода и кислорода, выраженное в долях килограмма ( $кг/кг$ )<sup>23</sup>.

Таблица 6

Название топлива	Расчетная формула теплотворной способности (высший предел)
Древесное топливо . . .	$9\,250 \cdot C + 27\,700 \cdot H - 3\,460 \cdot O$ ккал/кг
Торф . . . . .	$8\,880 \cdot C + 26\,640 \cdot H - 3\,330 \cdot O$ "
Бурый уголь . . . . .	$8\,700 \cdot C + 26\,100 \cdot H - 3\,260 \cdot O$ "
Битуминозные каменные угли . . . . .	$8\,550 \cdot C + 25\,600 \cdot H - 3\,200 \cdot O$ "
Антрациты . . . . .	$8\,400 \cdot C + 25\,100 \cdot H - 3\,150 \cdot O$ "
Мазут (нефть) . . . . .	$8\,880 \cdot C + 26\,640 \cdot H - 3\,330 \cdot O$ "
Природный газ . . . . .	$8\,880 \cdot C + 26\,640 \cdot H - 3\,330 \cdot O$ "

При расчетах топочных устройств и теплообменников обычно типа принято учитывать, что тепло, идущее на испарение готовой (балластной) влаги топлива, а также влаги, образующейся от сгорания водорода, является потерянными для тепловой работы установки. В связи с этим в технике подобного рода установился обычай все расчеты вести не на полное количество тепла, выделяемое при сгорании 1 кг топлива («высшая теплотворная способность»), а на выделенное тепло за вычетом указанного тепла парообразования. Такая инженерная характеристика носит название «низшей» теплотворной способности топлива (*ккал/кг*).

В условиях протекания воздушных процессов горения можно принять, что на каждый килограмм испаряемой влаги в среднем тратится округленно 600 *ккал* (или 6 *ккал* на каждый процент влажности). Количество влаги, образующейся от сгорания водорода, легко устанавливается из соотношения атомных весов: если принять вес атома водорода за единицу, то в атоме кислорода будет 16 таких единиц. При образовании молекулы воды два атома водорода соединяются с атомом кислорода, следовательно, молекула воды содержит  $2+16=18$  весовых единиц, т. е. весит в 9 раз больше водорода, из которого она образовалась. Таким образом, если известно весовое содержание водорода в 1 кг топлива, то его надо увеличить в 9 раз, для того чтобы определить количество влаги, образующейся от сгорания водорода, в килограммах на 1 кг топлива. Полное количество влаги, которое должно испариться при сгорании 1 кг топлива, будет равно сумме влаги, образовавшейся от сгорания водорода, и влаги, заключенной в 1 кг топлива в виде балласта. Тогда тепло, затрачиваемое на испарение, будет равно:

На испарение влаги, образовавшейся	
от сгорания водорода . . . . .	600 · 9 Н <i>ккал/кг</i>
На испарение балластной влаги . . . . .	600 · W <i>ккал/кг</i>
Всего на испарение . . . . .	600 (9 Н + W) <i>ккал/кг</i>

Вытя из полной («высшей») теплотворной способности эту теплоту испарения, получим «низшую» теплотворную способность топлива (*ккал/кг*), которой и принято пользоваться в технических расчетах.

Если известна низшая теплотворная способность чистой горючей массы топлива, то пересчет теплотворной способности рабочего топлива, содержащего негорючие примеси (золу+влагу), на низшую не представит труда. При вычислении низшей теплотворной способности самой горючей массы уже учитывается расход тепла на испарение влаги, возникающей от сгорания водорода. Остается только вычислить, сколько тепла выделит та доля горючей массы, которая фактически имеется в 1 кг забалластированного топлива, и уменьшить это тепло на тепловой расход, идущий на испарение балластной влаги, содержащейся в этом топливе ( $600 \cdot W$  *ккал/кг*)<sup>23</sup>.

В табл. 7 приводятся данные с указанием содержания углерода, водорода, кислорода и серы, а также обоих пределов теплотворной способности для чистой (безбалластной) горючей массы основных видов топлива.

Т а б л и ц а 7

Название топлива	Состав горючей массы *, кг/кг				Теплотворная способность, ккал/кг	
	С	Н	О	S	высшая	низшая
Древесное топливо . . . . .	0,50	0,06	0,43	0	4 800	4 500
Торф молодой . . . . .	0,52	0,065	0,40	0	5 100	4 750
Торф средний . . . . .	0,58	0,060	0,34	0	5 600	5 300
Торф сильно разложившийся	0,63	0,055	0,30	0	6 100	5 800
Бурые угли подмосковные .	0,67	0,050	0,20	0,07	6 600	6 330
Бурые угли челябинские . .	0,72	0,050	0,20	0,02	6 900	6 630
Каменный уголь длиннопла- менный . . . . .	0,76	0,055	0,12	0,05	7 750	7 450
Каменный уголь газовый . .	0,81	0,055	0,085	0,04	8 150	7 850
Каменный уголь жирный . .	0,84	0,050	0,055	0,04	8 400	8 130
Каменный уголь спекающийся	0,88	0,045	0,040	0,03	8 600	8 360
Каменный уголь тощий . . .	0,90	0,040	0,025	0,02	8 550	8 330
Полуантрацит . . . . .	0,92	0,025	0,025	0,02	8 350	8 200
Антрацит . . . . .	0,94	0,015	0,015	0,02	8 150	8 070
Мазут . . . . .	0,870	0,115	0,010	0	10 700	10 080
Керосин . . . . .	0,860	0,140	0	0	11 300	10 500
Бензин . . . . .	0,850	0,150	0	0	11 500	10 650
Горючие сланцы эстонские .	0,765	0,092	0,110	0,02	8 900	8 400
Богхеды . . . . .	0,760	0,100	0,140	0	8 800	8 360
Природный газ (саратовский)	0,765	0,235	0	0	12 400	11 150
Метан . . . . .	0,75	0,25	0	0	13 300	11 950
Этиловый спирт . . . . .	0,522	0,13	0,348	0	7 100	6 400
Водород . . . . .	0	1,00	0	0	34 180	28 780
Ацетилен . . . . .	0,925	0,075	0	0	12 000	11 600
Оксись углерода . . . . .	0,43	0	0,57	0	2 440	2 440

\* Без содержания азота.

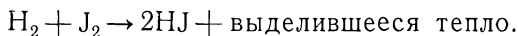
## Глава пятая

### ЧТО УПРАВЛЯЕТ СКОРОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ?

#### 1. ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ — ГЛАВНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Всякий организуемый человеком технический процесс должен обеспечивать желательную (заданную) производительность, иначе говоря, протекать с определенной скоростью. Может потребоваться, чтобы эта производительность была переменной и, следовательно, организуемый процесс был в заданных пределах производительности легко управляем. Наибольшие требования в этом отношении предъявляются к транспортным двигателям, обслуживающим передвижные агрегаты. Однако множество топочных и горелочных устройств неподвижных установок также принадлежит к аппаратам, работающим на переменной нагрузке. Управлять таким аппаратом значит прежде всего управлять скоростью протекания топочного процесса. Для этого в первую очередь следует осознать, какие причины вызывают ускорение или торможение процессов горения. Рассмотрим прежде всего причины химического характера.

Возьмем для примера один из простейших случаев окислительной химической реакции, в которой «топливом» является газообразный водород ( $H_2$ ), а «окислителем» — газообразный иод ( $J_2$ ), соединяющиеся в молекулы газообразного иодоводорода ( $HJ$ ) с выделением теплоты сгорания по схеме



Для того чтобы осуществилась такая реакция, нужно прежде всего образовать саму горючую смесь и этим заставить молекулы водорода встречаться, сталкиваться с молекулами иода. Образование новых молекул иодоводорода будет происходить тем быстрее, чем чаще будут возникать такие столкновения, а возникать они будут тем чаще, чем больше число способных к реакции молекул в смеси, т. е. чем больше удельное содержание (концентрация) в ней исходных реагирующих между собой веществ.

Таким образом, скорость протекания рассматриваемой реакции (как и всякой химической реакции) зависит от concentra-

ции в смеси реагирующих веществ. Если смесь сильно разбавлена каким-нибудь посторонним, не участвующим в реакции веществом, то необходимые столкновения молекул реагирующих веществ возникают реже и реакция протекает медленнее.

В рассматриваемом случае скорость реакции образования иодоводорода одновременно пропорциональна концентрации как водорода, так и иода (так как на каждую молекулу водорода тратится молекула иода), т. е. пропорциональна произведению обеих концентраций. А это равносильно тому, что скорость образования иодоводорода дважды пропорциональна концентрации любого из реагирующих веществ: водорода или иода (т. е. пропорциональна квадрату концентрации любого из этих двух веществ) <sup>24</sup>.

В газообразных смесях на скорость реакции воздействует общее давление, под которым находится смесь. При сильных разрежениях, например, редкие молекулы, блуждающие в разреженном пространстве, сталкиваются реже и реакция замедляется.

Но исключительной силой воздействия на скорость реакции обладает температура. Для иллюстрации возьмем ту же реакцию образования иодоводорода в очень слабом, однопроцентном растворе. Время, необходимое для полного завершения реакции между водородом и иодом в 1 см<sup>3</sup> раствора при разных температурах (при однопроцентном растворе), показано в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Температура		Продолжительность реакции
в абсолютных градусах	в градусах столбундусной шкалы	
273	0	30 тыс. млрд. лет (т. е. реакция практически не идет)
500	227	Около 11 суток
600	327	Около часа
800	527	1 сек.
1 000	727	0,01 сек.

Область низких температур является областью очень замедленного протекания химических реакций. При переходе же на повышенные и высокие температуры эти реакции чрезвычайно резко ускоряются. Такое исключительно резкое усиление активности реагирующих молекул с повышением температуры следует объяснить прежде всего губительным воздействием температуры на первичные молекулы, приводящим к расшатыванию или полному разрушению внутримолекулярных связей между атомами, без чего обмен этими атомами между реагирующими веществами практически невозможен. Разрушительное действие повышенных и высоких температур на органические молекулы мы уже видели ранее. Однако термическая прочность молекул неодинаковых веществ, т. е. способность их сопротивляться разрушительному воз-

действию температуры, различна, вследствие чего различные реакции при одной и той же температуре идут с разной степенью активности<sup>25</sup>.

По мере усиления прогрева находящиеся в непрерывном движении молекулы начинают метаться со все большими скоростями, так как часть воспринимаемой ими энергии переходит в энергию их поступательного движения. Увеличение скорости движения молекул делает их столкновения между собой все более частыми и энергичными, ускоряя тем самым распад первичных молекул и образование новых, энергетически более простых и термически более прочных.

Чем выше возникающая температура, тем быстрее идут процессы распада молекул и обмена их атомами, т. е. тем скорее идет реакция. А возникающая температура процесса зависит от удельного расхода тепла, необходимого для прогрева получающихся продуктов сгорания.

Если в горючей смеси находится только расчетное количество чистых топлива и окислителя, то образуется наименьшее количество продуктов сгорания, которые, воспринимая тепло, нагреваются до наивысшей возможной температуры. При этом, как понятно из всего предыдущего, реакция идет особенно быстро. Если же в горючей смеси имеется избыток окислителя или топлива, не имеющий возможности за недостатком топлива или окислителя вступить в реакцию, то выделенное тепло реакции будет частично тратиться на прогрев этого избытка окислителя или топлива и температура процесса будет соответственно снижена. То же произойдет, если вместо избытка окислителя или топлива в горючую смесь ввести какую-нибудь постороннюю примесь, которая сама не будет принимать участия в процессе, но будет отвлекать на свой прогрев соответствующее количество тепла (например, азот воздуха, если горение идет в воздухе, а не в чистом кислороде). Вызываемое этими причинами общее понижение температуры процесса сразу же скажется на скорости его протекания, соответственно ее замедляя.

В табл. 9 показаны расчетные (теоретические) температуры горения некоторых топлив в воздухе и чистом кислороде, иллюстрирующие сказанное выше.

Т а б л и ц а 9

Топливо	Температура горения, °С	
	при горении в воздухе	при горении в кислороде
Водород . . . . .	2 000	4 000
Окись углерода . . . . .	2 100	4 450
Метан . . . . .	2 500	4 500
Углерод . . . . .	2 000	5 000

Тормозящее действие посторонних примесей в горючей смеси должно также возникать и потому, что наличие в смеси инерт-

ных молекул приводит к увеличению числа холостых соударений с ними, соответственно уменьшая число полезных столкновений в единицу времени между молекулами, могущими прореагировать друг с другом.

Указанные в табл. 9 температуры являются только предельно мыслимыми, в том случае, если все выделяющееся тепло тратится только на нагрев получающихся продуктов сгорания. Практически достижимые температуры всегда будут заметно ниже вследствие неизбежных тепловых потерь на излучение в окружающую среду, недожог и т. п.

## 2. ЧРЕЗМЕРНО ВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕПЯТСТВУЮТ ОБРАЗОВАНИЮ МОЛЕКУЛ

Чем выше температура, достигаемая в процессе, тем скорее протекают все процессы разрушения первичных молекул, ускоряя тем самым и весь ход прямой реакции. Однако постепенно именно само повышение температуры становится препятствием для развития «прямой» реакции, так как с повышением температуры все охотнее начинает идти «обратная» реакция с поглощением тепла, не давая тем самым прямой реакции доходить до конца.

Таким образом, воздействие температуры на скорость реакции перерождается. В известных пределах повышение температуры резко способствует ускорению хода прямых реакций за счет ускорения разрушения первичных молекул, учащения числа столкновений между ними и увеличения энергии этих столкновений, воздействуя на самые медленные последовательные операции, задерживающие обмен атомами между топливом и окислителем. Но с переходом в область очень высоких температур любая компоновка атомов в молекулы становится все труднее, атомы и простейшие осколки молекул теряют способность образовывать сколько-нибудь сложные молекулярные постройки и начинают устойчивое независимое существование. На солнце при температуре не менее  $6\,000^{\circ}\text{C}$  молекулярных соединений не наблюдается, и все вещества на поверхности солнца находятся в атомарном состоянии\*.

Явление разъединения атомов и простейших осколков молекул, приводящее к распаду первичных молекул под воздействием высоких температур, носит название «термической (тепловой) диссоциации». Оно сопровождается значительным расходом тепла. В процессах горения диссоциация становится заметной, постепенно усиливаясь, начиная примерно с  $1\,800\text{—}2\,000^{\circ}\text{C}$ . В связи с этим расчетные температуры, приведенные в таблице 9 и подсчитанные без учета термического распада молекул, растущего с температурой, являются условными. На самом деле эти температуры будут соответственно ниже и особенно существен-

---

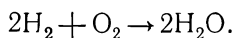
\* А в зонах солнца с еще более высокой температурой должны существовать разрушенные атомы в виде голых ядер, лишенных электронных оболочек.

но ниже для кислородных смесей, при которых по указанным выше причинам процесс горения переходит на высокотемпературный уровень. Однако проведенный нами качественный разбор сущности явления не меняется от поправок подобного характера.

Все реакции горения, даже простейшие из них (например, горение водорода или окиси углерода), принадлежат к реакциям сложного типа. Изучение скорости их протекания одно время даже стало вызывать сомнение в приложимости к ним тех фундаментальных закономерностей современной химии, при помощи которых удавалось для более простых реакций описывать воздействие на скорость реакции количества действующих веществ и температуры, о чем говорилось выше. Однако все снова встало на свое место, когда додумались, что обычная схема записи хода реакции, к которой нас приучала классическая молекулярная химия, не отражает истинного хода таких реакций.

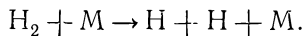
### 3. РЕАКЦИЯ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА ИМЕЕТ ЦЕПНОЙ ХАРАКТЕР

Изображая реакцию горения водорода, раньше удовлетворялись такой схемой:

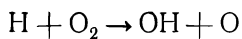


Однако такого рода запись представляет собой только нечто подобное поварскому рецепту, рассказывающему лишь о том, что надо взять две молекулы водорода и молекулу кислорода, чтобы получить две молекулы воды. На самом же деле таким путем реакция не идет, и участвующие в ней вещества претерпевают целую цепь преобразований, прежде чем будет достигнут окончательный результат. Звенья этой цепи представляют собой последовательно возникающие более простые, элементарные реакции, но чтобы их записать, следует отказаться от привычки старой молекулярной химии все реакции записывать в молекулах. Последовательную цепь простейших реакций, описывающих сгорание водорода в воду, с более современной точки зрения можно изобразить таким образом:

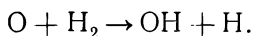
1. Какая-нибудь быстрая посторонняя молекула  $M$  с большой энергией ударила молекулу водорода и расщепила ее на два атома водорода, а сама отошла в сторону; схема будет такой:



2. Любой из двух атомов водорода, будучи крайне неустойчив и, следовательно, крайне химически активен, сталкиваясь с молекулой кислорода  $\text{O}_2$ , расщепляет ее в свою очередь, присоединяя один из атомов кислорода к себе и образуя уже известный нам гидроксил  $\text{OH}$ , оставив в свободном виде атом кислорода по схеме

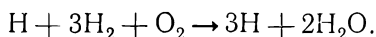


3. Оставшийся свободным весьма активный атом кислорода, сталкиваясь с новой молекулой водорода  $H_2$ , расщепляет ее и присоединяет к себе атом водорода, превращаясь в новый гидроксил и оставляя второй водородный атом свободным по схеме



4. Гидроксил  $OH$ , который, как мы уже знаем, имеет, подобно водороду одну незамещенную связь, что делает его крайне химически активным, сталкиваясь со следующей молекулой водорода  $H_2$ , расщепляет ее, присоединяя к себе водородный атом, т. е. превращаясь, наконец, в молекулу воды и оставляя второй водородный атом свободным.

Этим последовательным набором звеньев цепи завершается единичный цикл, приводящий к образованию конечных молекул воды и размножению новых активных атомов водорода, развивающих и ускоряющих продолжение реакции. Общий итог следует при такой трактовке процесса записывать в виде схемы



Следовательно, каждый атом водорода порождает в итоге три новых свободных атома водорода и две конечные молекулы воды. Эти три активных атома водорода начинают действовать в свою очередь, тем самым в 3 раза ускоряя ход реакции и порождая не только конечные молекулы воды, но и новые девять активных атомов водорода, и т. д. При таком ходе реакция получает сильнейший саморазгон, практически мгновенно распространяется по всему объему реагирующей смеси, т. е. носит взрывной характер. Такому взрыву или быстрому воспламенению предшествует некоторый период задержки, связанный с первичным зарождением и необходимым минимальным накоплением активных центров в виде атомов водорода и кислорода или гидроксидов.

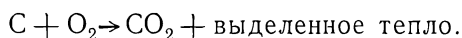
Все реакции *горения* имеют подобный взрывной характер и характеризуются известным периодом задержки, коротким или более или менее длинным, когда кажется, что реакция не пошла, а на самом деле она еще не накопила достаточного количества активных, неустойчивых веществ, необходимых для начала саморазгона. Возникают, однако, и такие обстоятельства, когда цепи начинают обрываться вследствие того, что активные атомы или гидроксиды снова комбинируются в неактивные молекулы. При таких обстоятельствах, если обрыв цепей идет быстрее, чем зарождаются новые активные элементы, реакция может прекратиться или не состояться вообще.

Горение окиси углерода имеет еще более сложный ход и принадлежит к так называемым «сложным цепным реакциям». Но самые сложные цепи возникают при горении углеводорода. Сколько-нибудь надежных схем таких цепей не придумано, и

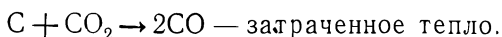
попытки их рассмотрения представляются нам пока еще весьма мало поучительными. Во всяком случае все углеводороды, прежде чем сгореть, проходят ряд последовательных подготовительных стадий, пока процесс сгорания не «освоит» их окончательно. Возможно, что часть этих подготовительных явлений относится не столько к самому цепному процессу горения, сколько к предварительному термическому расщеплению, на чем мы уже достаточно подробно останавливались ранее. Эти предварительные стадии протекают значительно легче и быстрее, если в зоне их протекания находится свободный кислород, способствующий такого рода преобразованиям, или если кислород уже содержится в составе органических молекул вследствие их частичной окисленности.

#### 4. ОКИСЛЕНИЕ УГЛЕРОДА СОПРОВОЖДАЕТСЯ ПОБОЧНЫМИ РЕАКЦИЯМИ

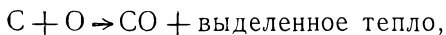
Не менее сложно протекает и такая, казалось бы, простая реакция, как сгорание углерода в углекислоту, которую обычно и до сих пор записывают в виде схемы



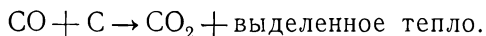
Такая схема представляет собой тоже не более чем рецепт получения углекислоты. По поводу характера окисления твердого углерода долгое время существовали две противоположные точки зрения. Одна из них утверждала, что сначала по указанной выше схеме должна получиться углекислота, а затем по реакции обратного типа может получиться окись углерода (с соответствующей затратой тепла) по схеме.



Другая точка зрения держалась того мнения, что сначала должна образоваться окись углерода с соответствующим выделением тепла по схеме



после чего окись углерода сгорает в углекислоту, выделяя соответствующее количество добавочного тепла по схеме



В настоящее время при помощи более тонких экспериментальных исследований убедились, что первичными продуктами окисления твердого углерода являются одновременно и углекислота и окись углерода в несколько различных соотношениях в зависимости от температуры, при которой идет процесс. Чем выше температура, тем больше начинает преобладать выход окиси углерода. При умеренных температурах, не превышающих  $1200^\circ \text{C}$ , можно считать, что оба эти газа выходят в одинаковых

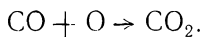
количествах. Газификация твердого углерода может идти и при помощи водяного пара по двум схемам:

- 1)  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$  (высокотемпературный процесс);
- 2)  $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$  (сравнительно низкотемпературный процесс).

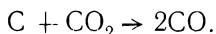
Такие процессы специально организуются в так называемых газогенераторах — приборах, предназначенных для производства горючего газа из твердого топлива. Аналогичный процесс можно создать и для жидкого топлива.

Так или иначе можно считать доказанным факт, что прямая реакция превращения твердого углерода в углекислоту сразу до конца не идет, а проходит промежуточные стадии. Процесс осложняется тем, что при развиваемых на поверхности твердого углерода высоких температурах весьма вероятными становятся реакции восстановления тем же углеродом углекислоты по уже приводившейся схеме ( $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ ), после чего в присутствии кислорода воздуха возможно полное или частичное выгорание окиси углерода ( $CO + O \rightarrow CO_2$ ). Эти побочные явления восстановления углекислоты углеродом и догорания окиси углерода в воздушном кислороде, казалось бы, сильно затемняют истинную картину хода процесса. Однако можно представить себе весь ход сгорания углерода в достаточно четкой и понятной форме.

Представим себе, что имеется раскаленная твердая углеродная поверхность (фиг. 14), которую омывает поток воздуха, как это показано стрелками. Поток кислородных молекул воздуха стремится проникнуть к поверхности раскаленного углерода, но встречает на своем пути обратный поток горячей газообразной окиси углерода, которую он и сжигает в углекислоту по схеме

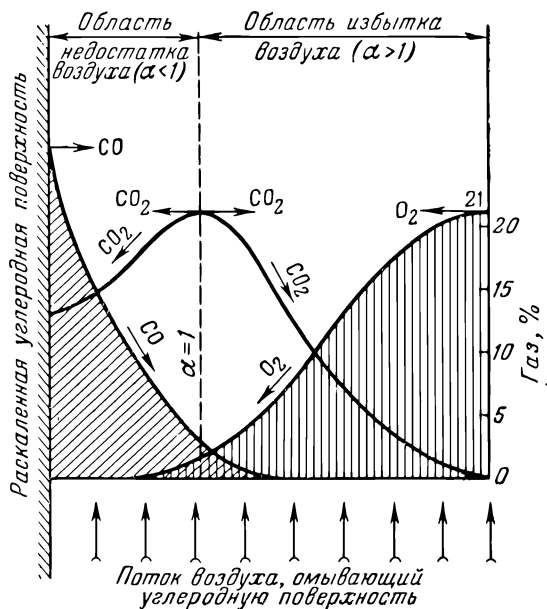


При этом молекулы кислорода, расходуясь на такую реакцию, исчезают (постепенное падение кривой концентрации кислорода по мере приближения к поверхности углерода), а вместо них возникают новые молекулы углекислоты. В этом месте концентрация углекислоты в общем составе газа окажется наибольшей, и она будет отсюда распространяться как в поток воздуха (направо), который ее увлекает за собой, так и к поверхности твердого углерода (налево), окружая последнюю. Тогда раскаленная поверхность углерода, «не дождавшись» кислородных молекул, перехваченных по дороге окисью углерода, начинает охотно реагировать с углекислотой, отнимая у нее часть присвоенного ею кислорода по схеме



Вследствие такого хода процесса наибольшая концентрация окиси углерода окажется на месте ее образования, т. е. у самой поверхности твердого углерода, откуда молекулы этого горюче-

го газа будут распространяться в обратную сторону в поток, навстречу поступающим извне молекулам воздушного кислорода. Здесь, как указывалось, молекулы окиси углерода и перехватывают молекулы воздушного кислорода, не давая им добраться до углеродной поверхности. Исчезновение молекул окиси углерода вследствие окисления их кислородом по мере их удаления от породившей их углеродной поверхности показано падением кривой концентрации  $\text{CO}$ .



Фиг. 14. Характер изменения концентраций газов около раскаленной поверхности углерода, омываемой потоком воздуха.

Воздушный кислород стремится проникнуть к поверхности углерода, чтобы вступить с ним в окислительную реакцию. По дороге его перехватывает окись углерода, которая, соединяясь с кислородом, превращается в углекислоту. Углекислота из зоны наибольшей концентрации распространяется направо в поток воздуха, который ее уносит, и налево к раскаленной поверхности углерода, где она частично восстанавливается в окись углерода, из-за чего у углеродной поверхности концентрация окиси углерода становится наибольшей. Отсюда окись углерода распространяется направо, навстречу кислороду.

Такая схема процесса логична и правдоподобна, так как устраняет кажущиеся противоречия в характере его протекания и служит иллюстрацией того, каким образом такое «плохо усваиваемое» топливо, как твердый углерод, за счет газификационных предварительных процессов превращается в легко усваиваемое газообразное топливо. Эта усвояемость в значительной мере

облегчается, когда в виде небольшой добавки в дело вмешивается некоторое количество водяного пара (или водорода). Известно, что воспламенение кокса (углерода) ускоряется при некотором умеренном смачивании его водой\*. Наличие водяного пара или водорода является непременным условием развития цепной реакции сгорания окиси углерода.

Итак, приведенная схема убеждает нас в том, что даже такое простое твердое топливо, как чистый углерод, прежде чем окончательно сгореть, проходит предварительные стадии газификации, превращающей его в топливо газообразное. Как уже подчеркивалось, при достаточно высоких температурах газификационные процессы, требующие затраты тепла, начинают протекать с весьма большой скоростью. Высокая температура поверхности углерода, несмотря на протекание на ней восстановительных теплотребляющих реакций, объясняется тем, что общий итог такого процесса со всеми его промежуточными стадиями всегда остается положительным в смысле обильного тепловыделения, достаточного для накала углеродной поверхности.

---

\* Не следует смешивать такое смачивание с приемом, употребляемым при работе на слоевых топках с угольной мелочью (штыбом). В последнем случае кочегары поливают мелочь для того, чтобы она не уносилась из топки, подхваченная газовоздушным потоком, в неиспользованном виде.

## Глава шестая

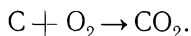
# СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ

### 1. ИЗБЫТКИ ОКИСЛИТЕЛЯ ИЛИ ТОПЛИВА В СМЕСИ ТОРМОЗЯТ СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Качество газообразных горючих смесей, состоящих из какого-нибудь газообразного топлива и воздуха, определяется не только свойствами этого топлива и воздуха, но и взятым при образовании смеси соотношением между ними. В этом смысле существенно, имеется ли в горючей смеси избыток воздуха или топлива. В первом случае часть воздуха окажется неиспользованной, но при хороших условиях протекания процесса может быть достигнуто полное сгорание и выделено все тепло топлива. Во втором случае неиспользованной окажется часть топлива, полное сгорание не осуществится, и часть тепла останется невыделенной.

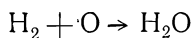
Чтобы не было никаких избытков, смесь следовало бы составлять при таких соотношениях, когда на каждый килограмм топлива приходилось бы количество килограммов воздуха, вытекающее из расчетов реакций горения. Расчетное или так называемое «теоретическое» количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, легко выясняется из атомарных соотношений соответствующих реакций полного окисления.

Рецепт получения углекислоты из углерода и кислорода записывается, как мы знаем, в следующем виде:



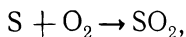
Если, как это обычно делается, принять вес атома водорода за единицу весового измерения<sup>26</sup>, то атом углерода (округленно) будет обладать 12, а атом кислорода — 16 такими единицами. Так как на атом углерода (12 единиц) надо израсходовать два атома кислорода (32 единицы), то на каждую весовую единицу углерода приходится  $\frac{32}{12} = 2,67$  весовой единицы кислорода. В 1 кг воздуха содержится только 0,232 кг кислорода. Поэтому, чтобы набрать 2,67 кг кислорода, следует израсходовать на каждый килограмм сжигаемого углерода 11,5 кг воздуха, так как  $0,232 \cdot 11,5 = 2,67$  кг кислорода.

Такой же расчет реакции сгорания водорода



показал бы нам, что на каждый килограмм водорода необходимо потратить 8 кг кислорода, которые содержатся в 34,5 кг воздуха.

В свою очередь 1 кг серы, сгорающей в сернистый ангидрид по рецепту



потребуется расхода 1 кг кислорода или 4,3 кг воздуха.

Таким образом, расчетными нормами полного сгорания являются соотношения, приведенные в табл. 10.

Таблица 10

На 1 кг топлива	Расходуется	
	кислорода	воздуха
Углерода . . . . .	2,67 кг	11,5 кг
Водорода . . . . .	8,0 "	34,5 "
Серы . . . . .	1,0 "	4,31 "

По этим нормам легко рассчитать необходимый удельный расход кислорода или воздуха на 1 кг любого топлива, содержащего углерод, водород, серу и собственный кислород. 1 кг кислорода содержится в 4,31 кг воздуха; соответственно этому сокращается необходимый расход воздуха при сжигании 1 кг топлива, содержащего собственный кислород.

В табл. 11 даются удельные расходы кислорода и воздуха для некоторых газообразных топлив.

Таблица 11

Топливо	Необходимый (расчетный) расход на 1 кг топлива	
	кислорода	воздуха
Водород . . . . .	8,0 кг	34,5 кг
Ацетилен . . . . .	3,07 "	13,25 "
Метан . . . . .	4,0 "	17,25 "
Окись углерода . . . . .	0,58 "	2,5 "
Этиловый спирт* . . . . .	2,08 "	9,0 "

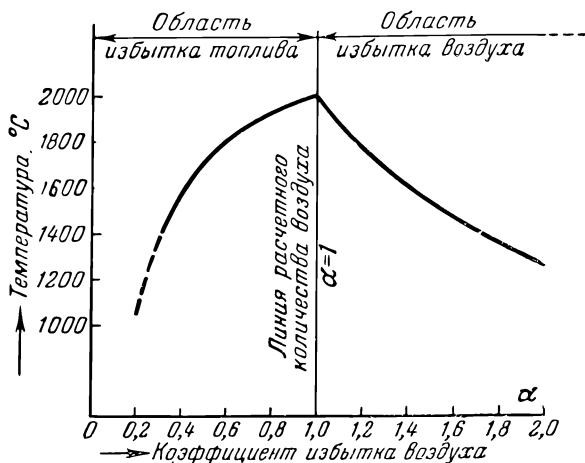
\* До горения — жидкость, при горении — газифицированные пары.

Понятно, что всякое отклонение от расчетных норм в меньшую или большую сторону будет свидетельствовать либо об избытке топлива, либо об избытке воздуха окислителя в горючей смеси.

Показателем таких избытков служит отношение фактического содержания окислителя в смеси к необходимому расчетному количеству. Это отношение носит название «коэффициента избытка окислителя», а для воздушных смесей — «коэффициента избытка воздуха» ( $\alpha$ ), причем оно показывает, во сколько раз фактическое количество окислителя в смеси больше расчетно необходимого:

$$\alpha = \frac{\text{фактическое количество окислителя}}{\text{расчетное количество окислителя}}$$

Если отношение меньше единицы, это свидетельствует о наличии избытка топлива; если оно больше единицы, то о наличии избытка окислителя. При отсутствии избытков как топлива, так и окислителя это отношение становится равным единице<sup>27</sup>.



Фиг. 15. Расчетная температура горения водородно-воздушной смеси. Температура падает и в сторону избытка топлива (водорода) и в сторону избытка воздуха.

При данных свойствах топлива и окислителя изменение численного значения коэффициента избытка оказывает решающее воздействие на тепловой (температурный) результат горения, почему он и является важнейшей характеристикой смеси. Очевидно, что при избытке топлива в смеси, т. е. при соответствующем недостатке окислителя, часть топлива останется неиспользованной и пропорционально этому несгоревшему остатку топлива выделится меньше тепла. Вместе с тем при этом уменьшенном тепловыделении будут прогреваться не только продукты сгорания, но и вся несгоревшая часть топлива, соответственно понижая общую температуру процесса. При наличии избытка окислителя в смеси все топливо будет выгорать и выделится все тепло, запасенное в нем. С увеличением же избытка окислителя будет также падать температура процесса за счет необходимого прогрева

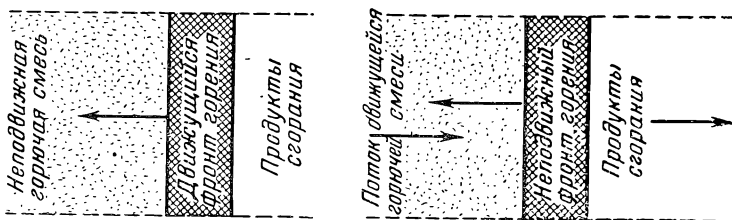
избыточного окислителя. Любой избыток как топлива, так и окислителя играет, таким образом, роль балласта подобно балластной примеси любого инертного газа, и воздействие этих избытков на температурный эффект такое же снижающее, как, например, воздействие балластного азота воздуха, которое уже рассматривалось ранее. На фиг. 15 показано примерное изменение температуры процесса горения водородно-воздушной горючей смеси при изменении избытков воздуха.

Такой ход температурной кривой при изменении коэффициента избытка воздуха\* является типичным для всех горючих смесей как воздушных, так и кислородных при любых газообразных топливах. Во всех случаях наибольшая достижимая температура будет соответствовать коэффициенту избытка, равному единице, т. е. расчетному содержанию окислителя в смеси.

Такое сильное изменение температуры с изменением избытка окислителя (в частности, воздуха) не может не отразиться на скорости протекания реакции горения смеси, которая, как мы видели, резко повышается с увеличением температуры процесса.

## 2. СКОРОСТЬ НОРМАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

В качестве очень удобной характеристики скорости выгорания горючей газообразной смеси служит линейная скорость распространения фронта пламени по этой смеси (в метрах в секунду). Если приготовленную однородную газообразную горючую смесь поджечь с одного конца, то при обычном спокойном горе-



а — неподвижная горючая смесь; фронт горения надвигается на нее с „нормальной“ скоростью распространения пламени ( $m/sec$ ), оставляя за собой продукты сгорания.

б — горючая смесь движется слева направо со скоростью, равной встречной скорости распространения пламени, вследствие чего фронт пламени остается неподвижным.

Фиг. 16. Схемы распространения фронта воспламенения (фронта горения) по неподвижной и движущейся горючей однородной смеси.

нии скорость, с которой возникший фронт горения (воспламенения) будет надвигаться на эту неподвижную смесь по мере ее выгорания, оказывается значительно умереннее, чем можно было бы ожидать на первый взгляд. Ее называют «нормальной скоростью распространения пламени» или «нормальной скоростью горения» (фиг. 16). В табл. 12 приводятся наибольшие значения

\* В дальнейшем для краткости вместо «коэффициента избытка воздуха» будем применять термин «избыток воздуха».

нормальных скоростей горения для некоторых воздушных и кислородных горючих смесей при атмосферном давлении и первоначальной температуре смеси 0°С.

Т а б л и ц а 12

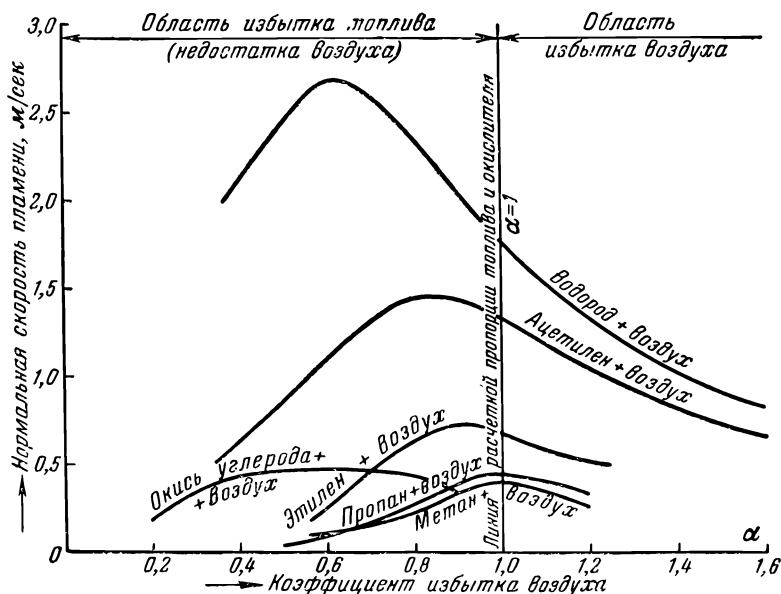
Топливо	Нормальная скорость, м/сек	
	в смеси с воздухом	в смеси с кислородом
Водород . . . . .	2,5	9,0
Ацетилен . . . . .	1,4	—
Оксид углерода с добавкой водяного пара и водорода . . . . .	0,42	1,1
Бензол с добавкой водорода . . . . .	0,38	—
Метан . . . . .	0,37	4,5
Пары ацетона . . . . .	0,32	—
Пары бензина . . . . .	0,12	—

Быть может, ни одна характеристика не представляет так ярко химическую природу горючей смеси, как скорость нормального распространения пламени, в которой отражается степень активности как топлива, так и окислителя. Значение степени активности окислителя видно из сопоставления величин скорости распространения пламени при чисто кислородных и воздушных смесях: чисто кислородные смеси имеют значительно более высокие скорости по сравнению с воздушными смесями, засоренными (забалластированными) азотом воздуха, не принимающим участия в химической реакции. Это в значительной мере следует отнести за счет снижения температуры процесса при воздушных смесях, так как то же количество выделившегося тепла тратится в этом случае на прогрев не только продуктов сгорания, но и азота воздуха, количественно преобладающего в смеси. Всякая прибавка мертвой (нераагирующей) примеси ведет к такому снижению температурного уровня процесса, а следовательно, и к его торможению (замедлению). Именно такой мертвой прибавкой и является избыток топлива или окислителя в горючей смеси, что и приводит к весьма существенной зависимости скорости распространения пламени от величины избытка воздуха (или другого окислителя). Такие зависимости для некоторых воздушных горючих смесей показаны на фиг. 17.

### 3. СРАВНЕНИЕ ХОДА КРИВЫХ ТЕМПЕРАТУРЫ И НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

Простое сопоставление хода кривых изменения температуры процесса в зависимости от величины избытка воздуха (фиг. 15) и изменения нормальной скорости пламени в зависимости от того же избытка (фиг. 17) показывает, что на скорость распростране-

ния пламени решающее влияние оказывает именно температура процесса. Обе кривые\* проходят в средней своей части через наибольшие значения и снижаются с него в обе стороны: направо — в сторону увеличивающегося избытка воздуха и налево — в сторону увеличивающегося избытка топлива. Однако обращает на себя внимание несовпадение в положении наибольших значе-



Фиг. 17. Скорость распространения пламени в однородных воздушных смесях в зависимости от избытка воздуха в смеси.

Вертикальная линия при  $\alpha = 1$  соответствует расчетному количеству воздуха, необходимому для реакции полного сгорания. Левее этой вертикали лежит область избытка топлива (недостатка воздуха,  $\alpha < 1$ ), правее — область избытка воздуха ( $\alpha > 1$ ).

ний температуры (всегда соответствующих избытку воздуха, равному единице, т. е. расчетному количеству воздуха) и нормальных скоростей пламени (всегда лежащих хотя и вблизи избытка воздуха, равному единице, но несколько левее, в области некоторого избытка топлива в смеси). Это неполное соответствие показывает, что температура не является единственной причиной изменения скорости нормального распространения пламени и на величину скорости оказывают некоторое влияние и другие причины, связанные с концентрациями топлива и окислителя в смеси. Все это полностью соответствует нашим представлениям о том, что скорости реакций зависят и от концентраций и в особенности от температуры процесса, о чем рассказывалось в предыдущей главе.

\* Сопоставление следует вести по водородным кривым, хотя характер кривых остается одинаковым для любого топлива.

Можно сказать, что скорость нормального распространения пламени является в прямом смысле характеристикой «горючести» смеси. Степень активности топлива в горючей смеси должна в значительной мере зависеть от прочности строения молекул топлива, т. е. скорости их распада под воздействием повышающегося прогрева и предварительного частичного окисления, предшествующих их полному сгоранию. Наименьшие скорости распространения пламени соответствуют смесям, в которых топливо представлено наиболее прочными углеводородными молекулами, требующими предварительного завершения замедленных стадий превращения их в более простые и действительно «готовые» к вступлению в процесс горения вещества.

Резким снижением температурного уровня процесса следует в первую очередь объяснить и то обстоятельство, что при слишком низких и слишком высоких значениях избытка воздуха смесь теряет свою горючесть. Слишком «бедная» горючим смесь, забалластированная чрезмерным избытком воздуха, негорюча и отказывается воспламениться. Такое же явление имеет место и при слишком «богатой» топливом смеси. Границы горючести по бедным и богатым пределам содержания топлива в смеси при атмосферном давлении и 0° С иллюстрируются табл. 13.

Таблица 13

Топливо	Пределы содержания топлива в смеси (пределы горючести), %	
	нижний (бедный)	верхний (богатый)
Водород . . . . .	4,0	74,2
Ацетилен . . . . .	2,5	80,0
Окись углерода . . . . .	12,5	74,2
Метан . . . . .	5,0	15,0
Пропан . . . . .	2,4	9,5
Этилен . . . . .	2,8	28,6

Всякий предварительный прогрев горючей смеси приводит к росту ее активности, увеличивая скорость распространения пламени и расширяя границы ее горючести. Это объясняется тем, что повышение начальной температуры смеси ускоряет процесс расшатывания внутримолекулярных связей, подготавливающий молекулы топлива и окислителя к распаду и обмену атомами для образования продуктов сгорания. Кроме того, внесение в очаг горения некоторого добавочного количества тепла за счет предварительного подогрева смеси повышает соответственно температуру процесса горения, ускоряя тем самым его протекание.

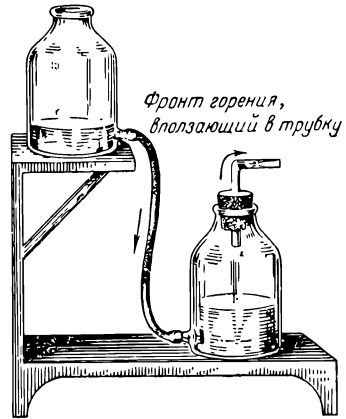
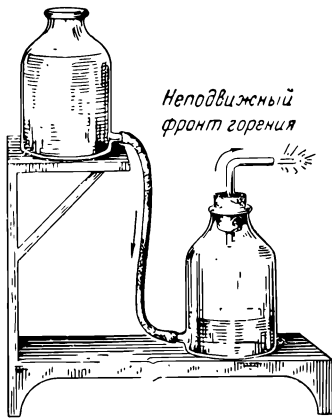
Нормальная скорость распространения пламени служит не только яркой сравнительной характеристикой горючести различных газообразных горючих смесей, но и характеристикой, суще-

ствённой для технического применения таких смесей. Организуя техническое горение этих смесей, мы должны позаботиться о том, чтобы фронт пламени остановился и практически не сдвигался с места в течение всего времени горения подожженной смеси. Для этого необходимо подавать вперед торючую смесь с такой же скоростью, с какой сам фронт пламени надвигается навстречу горючей смеси, т. е. со скоростью нормального распространения пламени, характерной для данной горючей смеси. При соблюдении известных условий, о которых речь впереди, удается добиться этого и придать фронту пламени устойчивость и управляемость в известных границах. Понятно, что при слишком медленной подаче смеси в организовавшийся очаг горения фронт пламени, если он движется навстречу с большей скоростью, сойдет с места и распространится, например, по подающей трубке внутрь сосуда, содержащего готовую горючую смесь. Вследствие завихрений, возникающих при этом в объеме горючего газа, пламя может практически мгновенно распространиться по всему объему горючей смеси, вызвав явление, подобное взрыву<sup>28</sup>. Непрочный сосуд может при этом разлететься на куски (фиг. 18) вследствие внезапного скачка давления в нем, связанного с практически мгновенным изменением объема газа в сосуде\*.

Если длинную трубку, заполненную газообразной горючей смесью, поджечь с одного конца, то при известных условиях спокойное нормальное горение смеси может перейти в так называемую детонацию газов. Детонация газов представляет собой совершенно особый случай сверхбыстрого распространения фронта пламени по газовой смеси со скоростями, исчисляемыми километрами в секунду. Это связано с распространением по объему газа так называемой «ударной волны», представляющей собой быстро движущийся слой сильно сжатого газа, возникающий, например, в воздухе при каком-нибудь взрыве. Любое сжатие газа сопровождается соответствующим повышением его температуры, а в этом случае сильное внезапное сжатие вызывает и сильный температурный скачок. Возникновение такой волны в горючей смеси приводит к немедленному самовоспламенению последней<sup>29</sup>. Вследствие этого скорость распространения фронта пламени будет определяться уже не нормальной скоростью, характерной для обычных условий выгорания смеси, а скоростью распространения самой ударной волны, вызывающей воспламенение. Детонация газов может произойти не только от внешней ударной волны, возникшей от какого-нибудь взрыва, но и развиться, как указывалось, из нормального горения вследствие увеличения поверхности фронта пламени за счет его искривления по сечению трубки, возникающего в свою очередь вследствие различия в скоростях распространения.

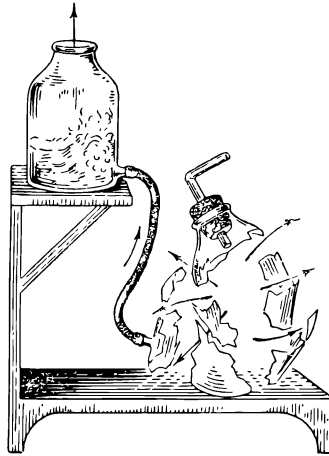
\* При таком внезапном воспламенении сколько-нибудь значительного количества газа в сосуде, газ, практически мгновенно расширяясь от нагрева за счет выделившегося тепла, вызывает этим скачкообразное повышение давления, создающее значительную силу, способную разрушить сосуд.

Сверхбыстрое детонационное горение характерно, в основном, для кислородных смесей, хотя этой способностью обладают и некоторые наиболее активные воздушные смеси, например водородные и ацетиленовые, в которых топливо характеризуется осо-



а — устойчивый факел пламени, когда верхнего сосуда выжимают из нижнего сосуда газообразную горючую смесь через трубку наружу, и фронт пламени остановился, так как скорость подачи смеси вперед уравновешена обратной скоростью распространения пламени.

б — прорыв пламени внутрь трубки вследствие того, что скорость распространения пламени больше скорости подачи горючей смеси (мало давление воды, выжимающей смесь).



в — фронт пламени по трубке проник в объем горючей смеси в нижней бутылке; взрыв бутылки вследствие практически мгновенного сгорания всего объема горючей смеси и внезапного изменения объема газа.

Фиг. 18. Установившийся и неустановившийся фронты пламени.

бой нестойкостью, т. е. особо значительной химической активностью молекул. В случае возникновения внешней ударной волны могут прореагировать и некоторые воздушные смеси, не детонирующие при обычном зажигании.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ НА ЕЕ ГОРЕНИЕ

Ни процессы медленного окисления (типа выветривания), ни сверхбыстрое окисление (детонационное горение) не получают в современной промышленной технике практического применения, вынуждая пока считаться с ними как с явлениями отрицательными, вредными. Вся современная огнетехника построена на применении таких окислительных процессов, которые характеризуются умеренными скоростями распространения фронта пламени по горючей смеси, заранее созданной или, чаще всего, создаваемой внутри самого топочного пространства при раздельной подаче топлива и окислителя к очагу горения.

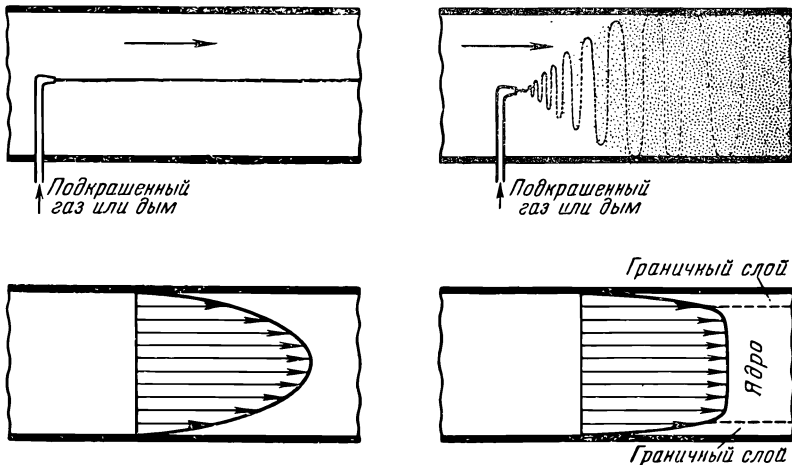
Готовые горючие газообразные смеси имеют ограниченное применение, в основном, из-за узких пределов регулируемости горелок, характеризующихся сравнительно малой производительностью (некоторые печные установки, лабораторные горелки). Если готовую горючую смесь подавать слишком медленно, возникает опасность проскока пламени внутрь горелки и возможность внезапного воспламенения смеси внутри смесеобразовательной части устройства. Если же, наоборот, увеличивая нагрузку горелки, постепенно ускорять подачу газа, то довольно скоро пламя становится неустойчивым и, в конце концов, срывается.

Для устойчивого фронта пламени весьма существенен характер движения газового потока. Всякий обычный газ или жидкость обладает ограниченной текучестью, тем меньшей, чем больше вязкость вещества. Газы по сравнению с жидкостями обладают сравнительно малой вязкостью, но и она при соответствующем заторможенном движении оказывается достаточной, чтобы при течении газов по трубке выравнивать направление движения соседних струек и заставить их двигаться параллельно друг другу.

При таком замедленном (заторможенном) движении потока все соседние струйки воздействуют друг на друга: медленно движущиеся тормозят движущиеся более быстро, и наоборот. Такое внутреннее трение газовых струек друг о друга создает своеобразный профиль скоростей по сечению трубы: у неподвижной стенки заторможенный поток сам движется практически с нулевой скоростью, которая постепенно растет к центру трубки, где и достигает наибольшего значения (фиг. 19). При таком спокойном струйчатом движении потока струйки газа практически не смешиваются друг с другом, в чем можно убедиться при помощи простого опыта. Для этого достаточно ввести в газовый поток тонкую струйку хорошо видимого цветного газа (или дыма)<sup>30</sup>, которая протянется параллельно оси потока, не размываясь в стороны.

Если же начать ускорять поток данного газа (или жидкости) по той же трубке, то после известного предела течение газа (или жидкости) изменит свой характер: движение струек станет взбудораженным, хаотическим, подкрашенная струйка немедлен-

но распространится по всему сечению трубки, свидетельствуя о том, что все струйки перемещаются не только вперед, но и поперек потока, энергично перемешиваясь и теряя свою индивидуальность (обособленность). Таким образом, относительно ускоренное движение газа (или жидкости) характеризуется интенсивным перемешиванием отдельных частей потока, что приводит к выравниванию профиля скоростей по всему ядру потока (фиг. 19). Газ (или жидкость) как бы теряет в этом ядре свои вязкие свойства. Они проявляются только у самых стенок трубки,



а — спокойно-струйчатое, заторможенное течение газа или жидкости по трубе („ламинарное“ течение): верх — струйка краски, не размешиваясь, движется вдоль трубы; низ — характер распределения скоростей потока по сечению трубы; наибольшая скорость — на оси трубы, наименьшая — у тормозящей стенки трубы.

б — хаотическо-смесительное ускоренное течение газа или жидкости по трубе („турбулентное“ течение): верх — струйка краски быстро рассеивается (размывается) по всему сечению потока; низ — характер распределения скоростей потока по сечению трубы; выравненные скорости — по всему ядру потока, замедленные скорости — в граничном слое у стенок трубы, тормозящих поток и успокаивающих его хаотическое течение.

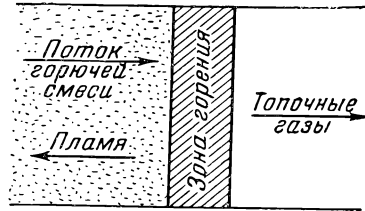
Фиг. 19. Различный характер движения газа (или жидкости) по трубам.

которые, тормозя движение ближайших краевых слоев потока, как бы «причесывают» их, мешая развиться в них поперечному перемещению (хаотическому движению) и заставляя эти слои двигаться параллельно, подобно тому как это имело место в первом случае.

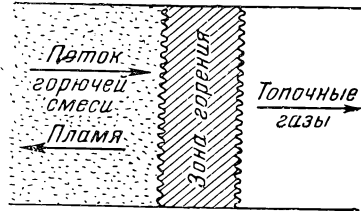
Возвращаясь к «нормальной скорости распространения пламени» (фронта горения), которая, как мы убедились, ярко отражает собой химическую природу горючей смеси, следует теперь уточнить, что такой характер горения принимает лишь при указанном спокойно-струйчатом движении готовой горючей смеси, т. е. достаточно заторможенном течении потока. С переходом на взбудораженное, хаотическое смесительное движение потока меняет свою величину и скорость распространения фронта пламени,

увеличиваясь с ростом скорости потока. Это показывает, что при ускоренном движении газовой смеси скорость распространения пламени начинает зависеть не столько от химических свойств этой смеси, сколько от степени хаотичности движения газовых частиц, т. е. от интенсивности их смешения между собой, которая растет с увеличением средней скорости потока. Таким образом, факторы химического воздействия на протекание процесса горения начинают уступать свою решающую роль факторам физического характера: чем интенсивнее хаотичность движения частиц

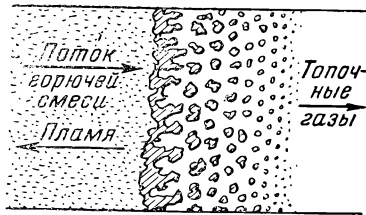
*а* — гладкий фронт пламени при спокойном параллельно-струйчатом течении потока горючей смеси.



*б* — волнистый с несколько увеличенной вследствие этого поверхностью фронт пламени при мало развитой хаотичности течения газообразной горючей смеси.



*в* — трепаный фронт горения с оторванными и дробящимися отдельно горящими газовыми частицами, окруженными сгоревшими топочными газами, при сильно развитой хаотичности течения горючей смеси.



Фиг. 20. Вид фронта пламени при различном характере течения газообразной горючей смеси.

газа в потоке, тем неровнее и больше становится поверхность пламени, тем большее количество газовой смеси одновременно воспламеняется, т. е. тем больше сгорает газа в единицу времени. Такое ускоренное выгорание и приводит к соответствующему увеличению скорости распространения фронта пламени в условиях хаотического смесительного движения потока газа. Она может в этом случае увеличиться в несколько раз против обычных скоростей распространения пламени при спокойно-струйчатом движении потока именно за счет развития поверхности фронта пла-

мени, который получает сначала волнующийся, неровный характер, а при дальнейшем ускорении потока — трепаный характер с отрывом отдельных горящих частичек газа (фиг. 20). Зависимость «нормальной» скорости распространения пламени от избытка воздуха при таком течении потока сохраняет примерно тот же вид кривой, ниспадающей как в сторону недостатка, так и в сторону избытка воздуха при наибольшем значении этой скорости в центральной части. Это снова указывает на достаточно явственное влияние температуры, от которой ускоряется или замедляется химическая реакция. Но местоположение наибольшего значения скорости еще сильнее смещается в область избытка топлива в смеси, и сама кривая становится плавнее. Таким образом, химическая сторона процесса отходит на задний план, а на передний план выдвигаются явления чисто физического порядка, регулирующие обмен веществ в потоке и расширяющие зону, охваченную горением (процессы смесеобразовательного характера).

Во всех горелках сколько-нибудь промышленного значения имеют дело именно с сильно ускоренными течениями воздушных и газовых потоков, вызванными значительными удельными нагрузками, при которых движение отдельных частиц (объемов) воздуха и газа принимает явно хаотический характер, и явления смесеобразовательного порядка начинают играть решающую роль в протекании процессов горения в газоздушном потоке.

---

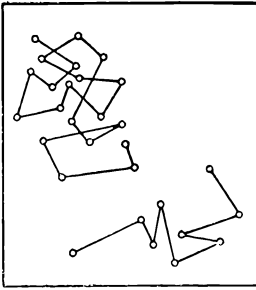
## Глава седьмая

### СМЕСЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

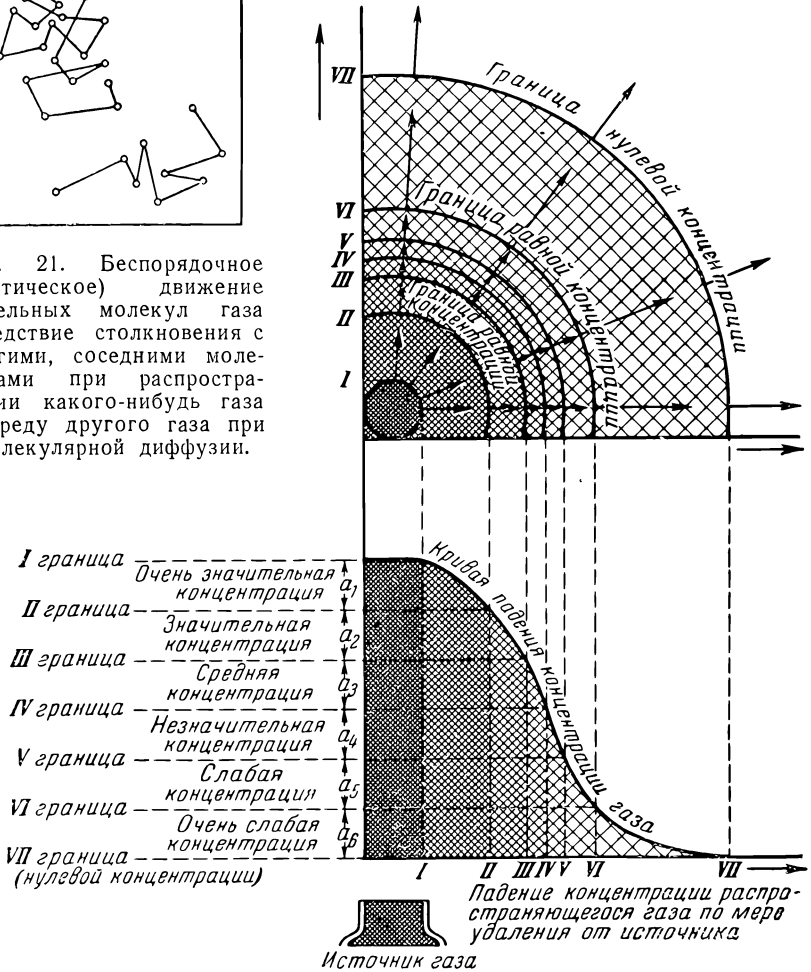
#### 1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАЗОВЫХ МОЛЕКУЛ В ОБЪЕМАХ ЗА СЧЕТ НЕПРЕРЫВНОГО ДВИЖЕНИЯ

Самым медленным процессом смесеобразования при соприкосновении двух газов является процесс проникновения молекул одного газа в среду молекул другого, носящий название молекулярной диффузии. Стоит в одном конце комнаты открыть сосуд с каким-нибудь летучим, легко испаряющимся веществом или газом, как молекулы вещества, сосредоточенные в этом сосуде, начнут распространяться по всей комнате даже тогда, когда в комнате и сосуде давление газов оказывается одинаковым, т. е. нет разности давлений, которая насильственно проталкивала бы один газ в другой. Если распространяющееся из возникшего источника вещество обладает достаточно сильным запахом, то из простого опыта мы убеждаемся, что такое распространение в спокойной атмосфере комнаты происходит с весьма умеренной скоростью.

Между тем само это распространение обязано непрерывному и крайне быстрому движению каждой молекулы в отдельности, скорость которого исчисляется в сотнях и тысячах метров в секунду. Замедленность же проникновения новых молекул в спокойную газовую среду вызывается тем, что они, пробираясь через плотную толпу молекул этой среды, многократно сталкиваются с ними, мечутся в стороны, взад и вперед, совершая хаотическое движение и проходя весьма длинный зигзагообразный путь (фиг. 21). Процесс считается завершенным, когда молекулы нового газа равномерно рассеются по всему объему среды. Скорость такой молекулярной диффузии, направленная под прямым углом («нормально») к фронту распространяющегося газа, оказывается прямо пропорциональной разности его концентраций, приходящейся на единицу пути распространения<sup>31</sup>. На схеме на фиг. 22 показаны линии одинаковых концентраций газа, распространяющегося из источника в окружающую среду. Концентрация этого газа на каждой последующей линии меньше, чем на предыдущей, на одинаковую постоянную величину. При таком



Фиг. 21. Беспорядочное (хаотическое) движение отдельных молекул газа вследствие столкновения с другими, соседними молекулами при распространении какого-нибудь газа в среду другого газа при молекулярной диффузии.



Фиг. 22. Постепенное падение концентрации распространяющегося газа в посторонней газовой среде (расстояния между границами по высоте равны, т. е.  $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = a_6$ ).

правиле изображения распространение газа по среде будет происходить тем быстрее, чем гуще ложатся линии\*.

\* Такой же прием изображения применяется на географических картах, на которых показывается крутизна рельефа местности. При постоянной разнице в уровнях линии равных высот будут ложиться тем гуще, чем круче подъем возвышенности.

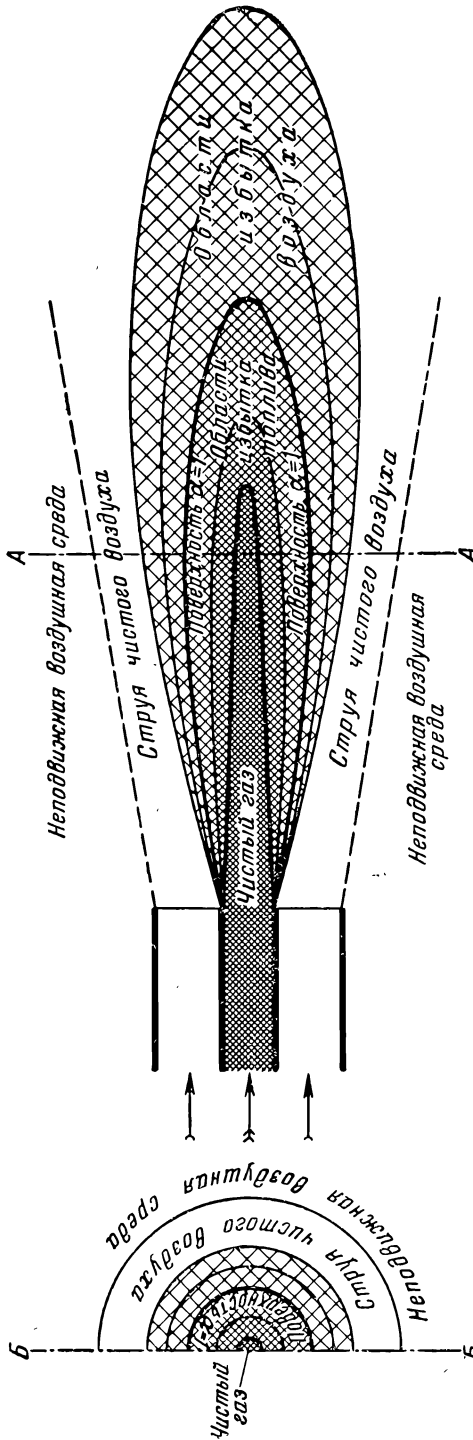
## 2. ОБРАЗОВАНИЕ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ ЗА СЧЕТ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ

Если представить себе, что топливный газ пришел в непосредственное соприкосновение с воздухом, то, даже при отсутствии других побудительных причин, достаточно одной весьма медленной молекулярной диффузии, т. е. взаимного проникновения молекул газа и воздуха в соседние области, чтобы начала постепенно образовываться «горючая смесь», которая может оказаться использованной для организации процесса горения. Это можно себе мысленно представить в виде схемы, изображенной на фиг. 23.

Поток газа из центральной трубки и поток воздуха из кольцевой трубки, окружающей центральную, вытекают с одинаковыми средними скоростями в воздушное неподвижное пространство. Если их скорости не только одинаковы, но и достаточно умеренны, чтобы создалось спокойно-струйчатое течение обоих газов, то около границы их соприкосновения возникнет зона смешения за счет беспорядочного зигзагообразного движения каждой отдельно взятой молекулы. Фронты взаимного проникновения газа и воздуха в этой смесеобразующей зоне можно по предыдущему расчленить поверхностями равных концентраций с убыванием концентрации газа в сторону воздушного потока и таким же убыванием концентрации кислорода воздуха в сторону потока газа. Внешней границей зоны смешения будет внутренняя поверхность потока чистого воздуха, а внутренней границей — внешняя поверхность потока чистого газа.

При таком характере изменения концентраций обоих смесеобразующих веществ внутри зоны смешения найдется и такая поверхность, на которой соотношение концентраций топливного газа и кислорода воздуха будет как раз равно расчетному. Иначе говоря, в числе других возникает поверхность (обведенная на фиг. 23 для наглядности темным контуром), на которой коэффициент избытка воздуха будет равен единице ( $\alpha = 1$ ). Эта поверхность разделит всю зону смешения на внутреннюю область с избытком топлива (и недостатком воздуха) и внешнюю область с избытком воздуха (и недостатком топлива).

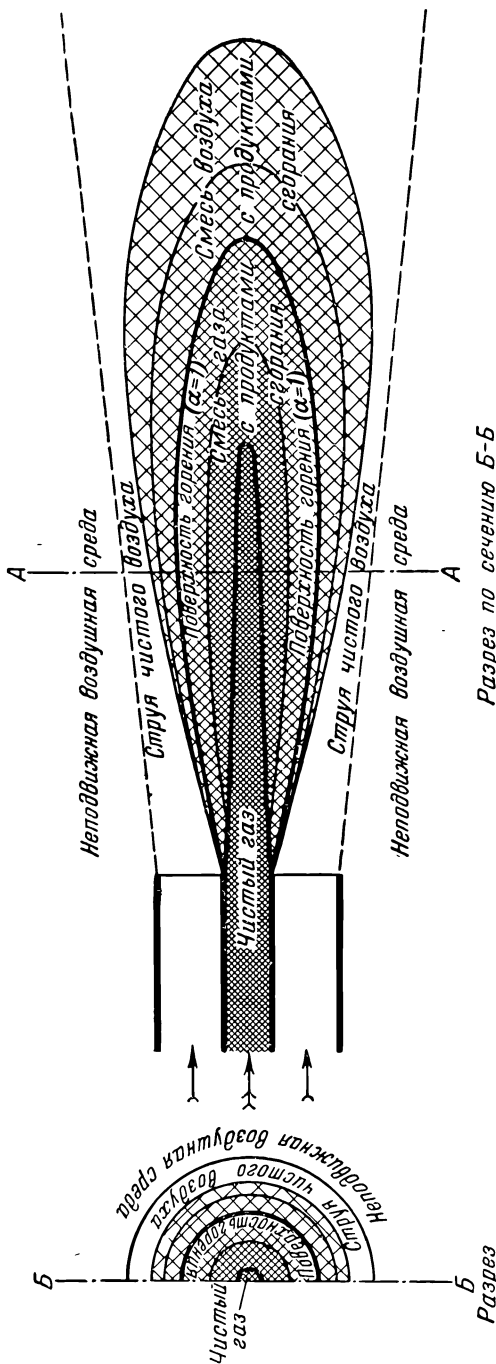
Если теперь поджечь такую зону смешения огоньком или искрой, т. е. создать местный очажок высокой температуры, то немедленно по всей этой естественно образовавшейся поверхности расчетного соотношения топлива и воздуха ( $\alpha = 1$ ) возникнет устойчивый фронт горения. Первоначально этот фронт горения может зародиться и на другой какой-нибудь поверхности, например во внешней области зоны смешения, где имеется избыток воздуха. Однако на такой поверхности он удержаться не сможет, так как оставшиеся неиспользованными избыточные молекулы кислорода продолжат свое движение внутрь области с избытком топлива, перенося реакцию горения, а следовательно, и весь фронт пламени в глубь зоны смешения. По этой же причине фронт пламени не удержится и в области избытка топлива,



**Продольный разрез по сечению Б-Б**  
**Поперечный разрез по сечению А-А**

Фиг. 23. Распространение молекул газообразного топлива в воздухе при одинаковой скорости потоков газа и воздуха за счет молекулярной диффузии.

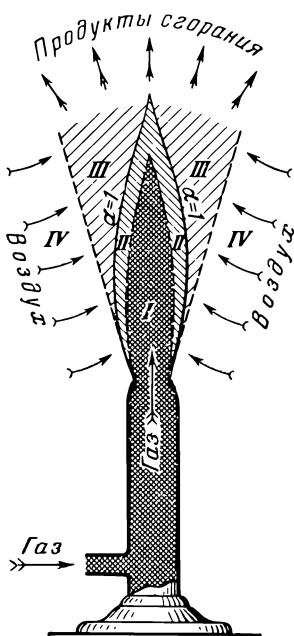
Сплошными линиями обозначены поверхности одинаковой концентрации газа, убывающих в сторону окружающего газ потока чистого воздуха. Средн. всей этой зоны молекулярного смешивания возникает и такая поверхность (обведена темной линией), на которой соотношение топлива и воздуха точно соответствует расчетному (поверх. топливного газа, равного единице). Внутри этой поверхности образуется область избытка топлива (недостатка воздуха), а снаружи — область избытка воздуха (недостатка топлива).



Фиг. 24. Распространение молекул газообразного топлива и воздуха после воспламенения через толщу образующихся газообразных продуктов сгорания (движение молекул за счет молекулярной диффузии).  
 Молекулы газа из сердцевинной струи и молекулы воздушного кислорода из наружной кольцевой струи воздуха движутся навстречу друг другу к поверхности горения (поверхность  $\alpha = 1$ ), где превращаются в молекулы продуктов сгорания. Эти молекулы в свою очередь распро-

так как несгоревшие избыточные молекулы топлива (или продукты их расщепления) продолжают свое движение во внешнюю область зоны смешения с избыточным кислородом и в свою очередь будут стараться перенести туда горение.

Единственной поверхностью во всей зоне смешения, на которой не окажется избыточных молекул ни кислорода, ни топлива, является поверхность их расчетного соотношения (поверхность



Фиг. 25. Разрез факела.

Зоны факела: I — чистый газ (топливо); II — смесь газа с продуктами сгорания (газ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ); III — смесь воздуха с продуктами сгорания ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ); IV — атмосферный воздух. Между зонами II и III расположена поверхность фронта горения (поверхность  $\alpha = 1$ ).

с  $\alpha = 1$ ), вследствие чего на ней и прекратится всякое перемещение фронта горения, как это схематически показано на фиг. 24.

Как только установится устойчивый фронт горения, вместо «холодной» схемы зоны смешения (фиг. 23) возникает новая «горячая» схема (фиг. 24), несколько более сложная из-за появления новых молекул продуктов сгорания, которые невольно примут участие в общем смесеобразовании.

В самом деле, как ясно из предыдущего, на поверхности фронта горения все молекулы кислорода и топлива будут уничтожены и взамен них возникнут в большом количестве молекулы продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ). Отсюда они начнут пробираться в обе стороны: и во внутреннюю топливную зону и во внешнюю воздушную, т. е. от поверхности их наибольшей концентрации к обеим границам нулевой концентрации (фиг. 25). Распространившись по всей зоне смешения, эти газообразные продукты сгорания образуют в потоке нарастающую толщу мертвого, негорючего газа, через которую должны пробираться к фронту горения извне (со стороны воздуха) молекулы кислорода, а изнутри (со стороны топливного газа) — молекулы топлива. Теперь

внешняя область зоны смешения будет содержать в себе только продукты сгорания в смеси с воздухом, а внутренняя область — те же продукты сгорания в смеси с топочным газом. Впервые молекулы топочного газа и воздушного кислорода (или продукты их расщепления) будут встречаться только на разделяющей обе эти области поверхности расчетных соотношений между топливом и воздухом. Как и прежде, фронт пламени может стать устойчивым только на этой поверхности, вследствие чего пламя быстро найдет ее местоположение в пространстве и само укажет это местоположение с очевидной наглядностью.

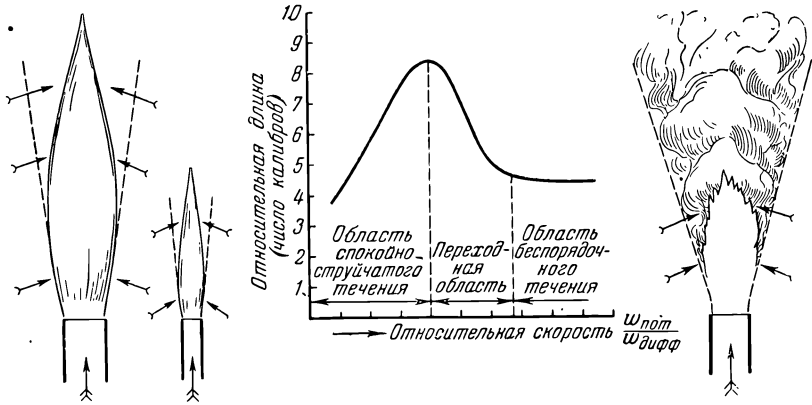
Вследствие указанной смены «холодной» схемы на «горячую», а также из-за сопутствующих этому тепловых явлений, поверхность расчетного соотношения топлива и воздуха (поверхность с  $\alpha = 1$ ) несколько сместится в пространстве. Однако она сохранит свою вытянутую вперед сигарообразную форму. Такой удлинненный факел горения возникает потому, что при чисто молекулярной диффузии процесс смесеобразования происходит крайне вяло и медленно, а следовательно, медленно, по мере образования горючей смеси, происходит и выгорание движущейся вперед струи топливного газа, который, прежде чем выгореть по всей своей толще, успевает пройти достаточно длинное расстояние от устья горелки.

Примерно такой же характер будет носить смесеобразование и при отсутствии спутного кольцевого потока воздуха, окружающего газовую струю, т. е. и при втекании этой струи непосредственно в неподвижную воздушную среду. В этом случае «горелка» получает самое примитивное оформление в виде единичной трубки, подающей газообразное топливо, а окружающая воздушная среда используется как источник окислителя. И в этом случае возникает зона смешения, которая после воспламенения и возникновения устойчивого фронта пламени будет представлять собой подобно предыдущему нарастающую вперед толщу мертвых продуктов сгорания, через которую навстречу друг другу будут пробираться из газовой струи молекулы топлива, а из воздушной среды — молекулы кислорода (и азота). Тот же медленный характер смесеобразования за счет молекулярной диффузии приведет к возникновению вытянутого огневого факелка с острием на конце (фиг. 25). Утонение факелка к концу понятно само собой: если представить себе газовый поток в виде охватывающих друг друга кольцевых слоев, то станет очевидным, что самый начальный слой, первым получающий необходимую порцию кислорода, выгорит скорее других, т. е. на самом коротком расстоянии от устья трубки, подающей газ. Он и создаст первый слой продуктов сгорания, через который придется пробираться другим молекулам кислорода, чтобы встретиться с молекулами топлива. Для второго слоя эта встреча невольно произойдет с некоторым опозданием, и сгорание этого более глубокого слоя состоится тогда, когда слой уже успеет пройти соответствующий скорости потока путь от устья горелки. С таким последовательным опозданием от слоя к слою кислородные молекулы доберутся, наконец, до самой глубинной, сердцевинной струйки топливного газа, что и произойдет в последнюю очередь в конце факелка.

Некоторое первичное расширение факелка в самом его корне объясняется тем, что струя топливного газа, как и всякая газовая струя, втекающая в вязкую воздушную среду, постепенно расширяется, встречая ее сопротивление.

Длина таких факелков зависит от ряда причин и в первую очередь от толщины газовой струи, т. е. от диаметра подающей

топливо трубки. Чем больше толщина потока топливного газа, тем дольше будет пробираться до его центра та часть молекул кислорода, которая вступит в реакцию с молекулами топлива (вернее, с продуктами их расщепления), движущимися по само-



а — вид факела при спокойно-струйчатом (ламинарном) течении газа.

б — кривая изменения относительной длины факела.

в — вид факела при беспорядочном (турбулентном) течении газа.

Фиг. 26. Изменение относительной длины факела пламени при увеличении скорости потока при спокойном и беспорядочном течении.

му центру этого потока, тем, следовательно, больший путь успеет пройти эта сердцевинная часть потока до момента его вступления в процесс горения. Этот пройденный путь и определит конечную длину факела (фиг. 26).

### 3. ГОРЕНИЕ УСКОРЯЕТСЯ ПРИ БОЛЕЕ БЫСТРОМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИИ ЗА СЧЕТ МОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ

Однако длина факела может меняться и на одной и той же горелке в зависимости от ее форсировки. Она будет увеличиваться с увеличением скорости потока, так как при больших скоростях поток будет успевать проходить и больший путь до момента окончательного выгорания его сердцевинной части. Это будет продолжаться до тех пор, пока спокойно-струйчатое \* (ламинарное) течение не переродится в беспорядочно-смесительное (турбулентное). Тогда вместе со скоростью потока начнет расти и интенсивность процесса смесеобразования за счет перемещения поперек потока уже целых объемов (молей) газа, как это изображено на фиг. 26. Такая вихревая (молярная) диффузия значительно расширит зону смешения и, увеличив количество образующейся в единицу времени смеси, соответственно увеличит и скорость выгорания топливного газа.

\* Первая, поднимающаяся часть кривой на фиг. 26.б.

Химические свойства образующейся горючей смеси, а следовательно, и химические свойства самого топлива перестают в этих случаях играть решающую роль в смысле воздействия на скорость выгорания смеси, так как в нормальных случаях во фронте пламени развиваются столь высокие температуры, что сама химическая реакция начинает протекать практически мгновенно и не задерживает горение: сколько горючей смеси успеет образоваться, столько ее немедленно и выгорает. Следовательно, в рассматриваемом случае регулятором скорости выгорания топлива становится скорость смесеобразования, растущая вместе со скоростью потока\*. Вследствие этого в области достаточно развившегося беспорядочно-смесительного течения газа происходит резкое уменьшение длины горящего факела, которая после известного предела остается одной и той же, не изменяясь при дальнейшем увеличении скорости потока (фиг. 26), так как чем больше эта скорость, тем быстрее идет и смесеобразование.

#### 4. РАЗЛИЧНЫЕ ПО ХАРАКТЕРУ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЛАСТИ ГОРЕНИЯ

Таким образом, имеются две крайние области горения: химическая или так называемая «кинетическая», в которой регулятором скорости выгорания смеси является скорость самой химической реакции, зависящей, как мы видели, от температуры, концентрации и давления в смеси, и физическая (ее называют «диффузионной»), в которой регулятором скорости выгорания является скорость смесеобразования, зависящая от вязкости газа, скорости потока, его геометрических размеров и других характеристик, которые могут воздействовать на характер течения потока и, следовательно, на интенсивность смесеобразования. Примером горения в первой области является выгорание готовой однородной газоздушной смеси, о которой рассказывалось в предыдущей главе. Примером горения во второй области является любой из так называемых диффузионных, т. е. смесеобразующих, факелов, рассматривавшихся в настоящей главе.

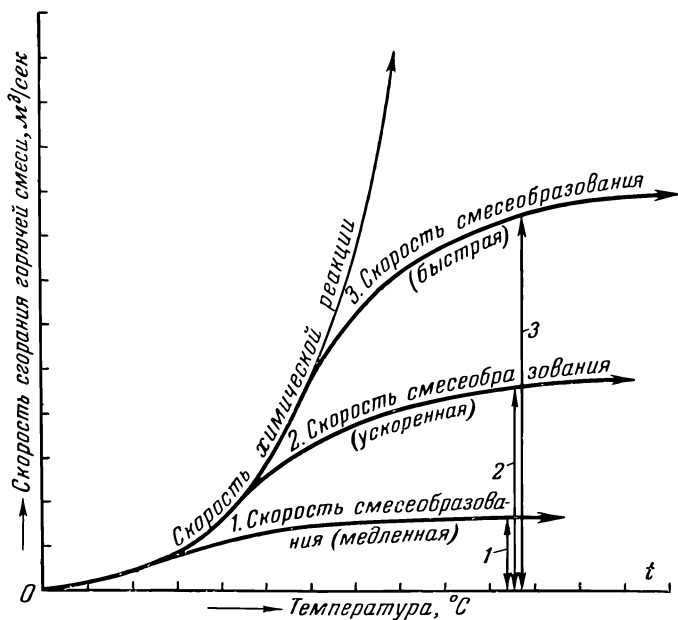
Понятно, что между этими крайними областями существует и широкая промежуточная область, в которой скорость выгорания топлива в той или иной мере окажется зависящей от всех перечисленных выше факторов и в которой, следовательно, процесс носит наиболее сложный характер.

Область химического воздействия на скорость выгорания топливного газа — это область низких концентраций и температур и весьма малых давлений в смеси, так как именно при этих усло-

---

\* На фиг. 26 показано изменение относительной длины факела в области спокойно-струйчатого течения потока газа (растет с увеличением скорости потока), в промежуточной области перехода от спокойно-струйчатого течения к беспорядочно-смесительному (падает вследствие резкого ускорения процесса смесеобразования) и, наконец, в области развившегося беспорядочно-смесительного течения (остается практически постоянной).

виях химическая реакция настолько замедляется, что сама становится тормозящим началом в горении даже тогда, когда нет никаких задержек в смесеобразовании, т. е. когда скорость смесеобразования несоизмеримо превышает скорость химической реакции. Область физического воздействия на скорость выгорания топливного газа — это область высоких концентраций и температур, в которой химическая реакция протекает практически бесконечно быстро и задержка в скорости горения падает на те факторы, которые заведуют скоростью смесеобразования.

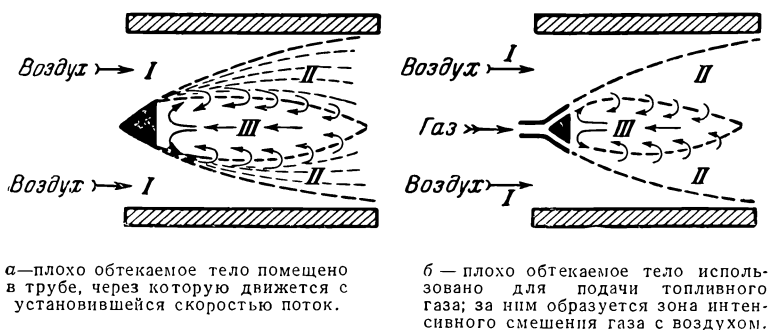


Фиг. 27. Характер роста скоростей выгорания горючей смеси при различных скоростях смесеобразования: медленной (1-я пологая кривая), ускоренной (2-я более крутая кривая) и быстрой (3-я круто поднимающаяся кривая).

Все три кривые при достаточно высокой температуре выходят на горизонталь (вернее, слабо наклонные, почти прямые линии), т. е. практически перестают расти с дальнейшим повышением температуры. Увеличение скорости выгорания в этой области (правая часть графика) возможно только за счет убыстрения смесеобразования. Тонкой, круто поднимающейся кверху линией показано влияние повышения температуры на скорость химической реакции, от которой скорость диффузионного горения вынужденно отстает из-за задержки смесеобразования.

На фиг. 27 показано, как росла бы скорость сгорания какого-нибудь топлива, если бы повышалась температура процесса. Тонкой линией изображен рост скорости самой химической реакции, чрезвычайно быстро, как это мы видели в гл. 5, увеличивающейся с ростом температуры (кривая, круто поднимающаяся в области высоких температур слева направо). Смесеобразующие же процессы практически не зависят от температуры. Какими бы медленными они ни были, в области очень низких температур они

Вполне успевают за медленно протекающей химической реакцией. Поэтому первое время фактическая скорость сгорания топлива идет по этой кривой. Однако в последующем, когда температура процесса по тем или иным причинам возрастет до достаточно большого уровня, химическая реакция станет протекать столь быстро, что скорость образования горючей смеси, а с нею вместе и фактическая скорость сгорания топлива, начнут все больше отставать от скорости самой химической реакции. В области достаточно высоких температур фактическая скорость сго-



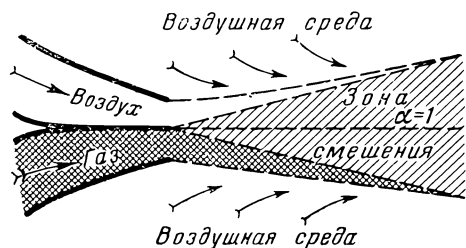
Фиг. 28. Характер течения газозвудушного потока за плохо обтекаемым телом.

*I* — зона невозмущенного течения; *II* — зона возмущенного течения; *III* — зона обратного течения.

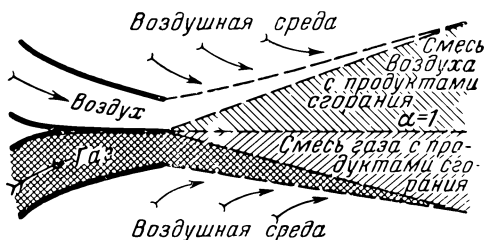
рания топлива при одной и той же скорости смесеобразования будет, следовательно, оставаться постоянной. Поэтому бессмысленно пытаться привлекать на помощь повышение температуры процесса, от которой фактическая скорость перестала зависеть. Ускорения процесса при протекании его в этой области можно добиться лишь за счет тех факторов, которые могут воздействовать на скорость *смесеобразования*. При улучшенном смесеобразовании фактическая скорость сгорания топлива отстанет от химической кривой позднее и кривая фактической скорости пойдет соответственно выше. Возможный ход кривых скоростей сгорания при различных скоростях смесеобразования показан на фиг. 27 кривыми, идущими в области высоких температур практически горизонтально. (Это означает, что скорость сгорания уже практически не зависит от изменения температуры).

Усилением беспорядочного течения всего потока в целях ускорения фактической скорости выгорания топлива можно добиться сравнительно ограниченного результата. Однако в нашем распоряжении имеются различные средства искусственного местного ускорения процесса смесеобразования. Для этого можно, например, создать на пути потока центры местных возмущений его течения в виде всевозможных препятствий, нарушающих устано-

вившийся характер этого течения. Такими местными «возмутителями» установившегося течения потока могут явиться плохо обтекаемые тела, введенные в поток, за которыми остается расширяющийся след возмущенного течения, постепенно затухающий. Вблизи же центра возмущения усилившееся местное смешение будет способствовать и ускорению сгорания топли-



а — холодная зона смешения (без горения).  
Для простоты изображения не указана дополнительная зона смешения со стороны воздушной среды (внизу).



б — зона смешения при горении образующейся горячей смеси.

Фиг. 29. Смешение струй топлива и воздуха под углом.

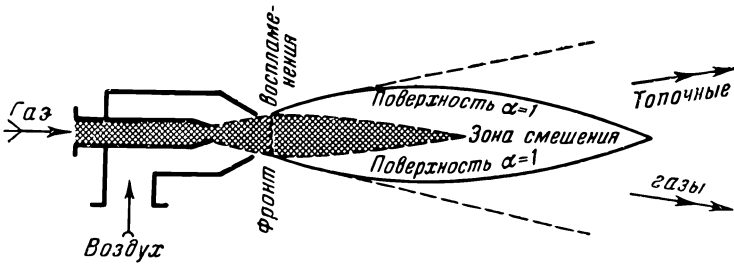
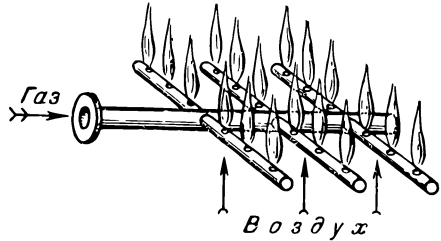
ва (фиг. 28). Этого же эффекта можно добиться и за счет насильственного внедрения одного потока в другой под соответствующими углами встречи потока топлива с потоком воздуха (фиг. 29). На этих приемах и построены различные конструкции газовых горелок, в которых предусмотрены различные направления (углы встречи) потоков воздуха и топлива и различные скорости их втекания в топочное пространство. В горелках наиболее сложного типа предусматриваются возможности изменения как величины этих скоростей, так и их взаимного направления (углов встречи). В таких горелках достигаются наиболее широкие пределы возможного изменения (регулировки) нагрузок,

иначе говоря изменения часового тепловыделения. Этими средствами регулируется и длина пламени, развиваемая горелками при разных режимах. На фиг. 30 показаны некоторые употребительные типы горелок для газообразного топлива.

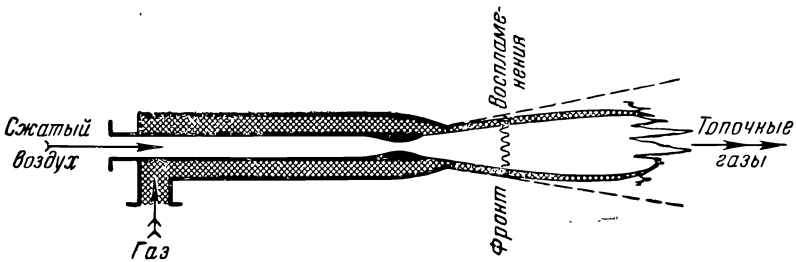
*a*—примитивная горелка с разветвленными трубками и многочисленными отверстиями для топливного газа.

Газ подается под небольшим давлением. Первичный воздух отсутствует. Весь воздух поступает из атмосферы естественным подсосом за счет трубной тяги.

Применяется в отопительных котлах, газовых ваннах, колонках и т. п.



*b* — разрез простой смешительной горелки с низким давлением. Газ поступает под давлением 150–250 мм вод. ст. Воздух подается под давлением 50–80 мм вод. ст. Первичное смешение происходит в концевой части горелки. Конечное смешение — в пределах топочной камеры.



*в* — разрез горелки высокого давления. Газ подается под давлением 150–250 мм вод. ст. Воздух — под давлением до 4 ат. Возникает трепаное, тюрпанообразное пламя.

Фиг. 30. Некоторые типы простейших газовых горелок.

Из рассказанного становится ясным, что именно способ сжигания топлива при *одновременном смешении* обладает особенно широкими пределами регулировки по нагрузкам, что и делает этот способ («диффузионное горение») наиболее распространенным в промышленной технике.

## Глава восьмая

### ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ

#### 1. СОСТАВ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ И ИХ СУММАРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

При полном сжигании в воздухе 1 кг беззольного топлива образуются топочные газы, в составе которых будут находиться: углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), водяные пары ( $\text{H}_2\text{O}$ ), избыточный кислород ( $\text{O}_2$ ) и азот ( $\text{N}_2$ ), в основном — воздушный, с небольшой добавкой азота, выделившегося из состава топлива.

Полный вес газов, получающийся при сгорании 1 кг топлива, будет равен сумме весов этого килограмма топлива и расчетного количества килограммов воздуха, увеличенного на тот его избыток, который был допущен в процессе. Эти несколько килограммов топочных газов нагреваются на сотни и тысячи градусов за счет тепла, выделившегося при сгорании килограмма топлива. При этом на каждый градус их нагрева затрачивается определенное количество калорий, которое носит название «суммарной теплоемкости» топочных газов. Величина суммарной теплоемкости зависит от количества образующихся из 1 кг топлива газов и их состава. Уже из табл. 11 мы видели, что разные топлива расходуют на свое сжигание самое различное количество воздуха и притом тем большее, чем выше теплотворная способность топлива. Понятно поэтому, что и удельный расход тепла на нагрев образующихся газов, т. е. суммарная теплоемкость газов, будет тем выше, чем выше теплотворная способность топлива. Кроме того, как мы знаем из предыдущего, количество образующихся газов сильно зависит от тех избытков воздуха, которые допускаются нами в реальных процессах горения: суммарная теплоемкость растет по величине с ростом избытка воздуха. В свою очередь состав топочных газов, зависящий от состава топлива, влияет на величину их суммарной теплоемкости из-за того, что удельный расход тепла на нагрев каждого газа в отдельности (удельная теплоемкость газа) заметно различен<sup>32</sup>. Особенно он велик по сравнению с другими топочными газами для водяных паров. В табл. 14 приведены некоторые данные по удельным теплоемкостям топочных газов для различных температур.

Название газа	Удельные теплоемкости газов при постоянном давлении в калориях на 1 кг газа при нагреве на 1° С при температуре, °С				
	0	100	500	1 000	1 500
Воздух . . . . .	0,24	0,241	0,261	0,283	0,295
Азот . . . . .	0,248	0,249	0,266	0,290	0,303
Кислород . . . . .	0,218	0,223	0,251	0,268	0,278
Углекислый газ . . . . .	0,194	0,219	0,277	0,310	0,325
Водяные пары . . . . .	0,444	0,452	0,509	0,593	0,658

Как видно из приведенных данных, теплоемкость водяного пара примерно в 2 раза больше теплоемкости других топочных газов.

В табл. 15 приведен состав топочных газов для различных топлив при различных избытках воздуха\*.

Чтобы получить суммарную теплоемкость топочных газов, нужно количества газов, приведенные в табл. 15, перемножить на их теплоемкости при соответствующих температурах, взятые из табл. 14, и сложить полученные произведения, относящиеся к этим температурам и соответствующим избыткам воздуха. Полученные таким расчетом численные значения суммарных теплоемкостей для трех температур (0, 1 000 и 1 500° С) и трех избытков воздуха ( $\alpha = 1,0$ ;  $\alpha = 1,2$  и  $\alpha = 1,4$ ) приведены в табл. 16.

Полная затрата тепла на нагрев топочных газов, полученных с 1 кг сожженного топлива, будет, как понятно, во столько раз больше суммарной теплоемкости, на сколько градусов фактически нагрелись эти газы, т. е. будет равна произведению суммарной теплоемкости на число градусов нагрева. При этом, поскольку, как это видно из табл. 14, удельные теплоемкости всех газов зависят от температуры, приходится саму суммарную теплоемкость подсчитывать по удельным теплоемкостям отдельных газов для данной интересующей нас температуры нагрева. Вычисленный таким образом расход тепла на нагрев топочных газов представляет собой запас тепла, воспринятый этими газами из всего тепла, выделенного топливом при его сгорании, т. е. теплосодержание топочных газов (на 1 кг сжигаемого топлива) при данной температуре нагрева. Следовательно:

*теплосодержание газов = (суммарная теплоемкость)  $\times$  (температура нагрева) ккал/кг топлива.*

На таких расчетах построены графики на фиг. 31, на которой показан ход кривых теплосодержания топочных газов для нескольких различных топлив при коэффициенте избытка воз-

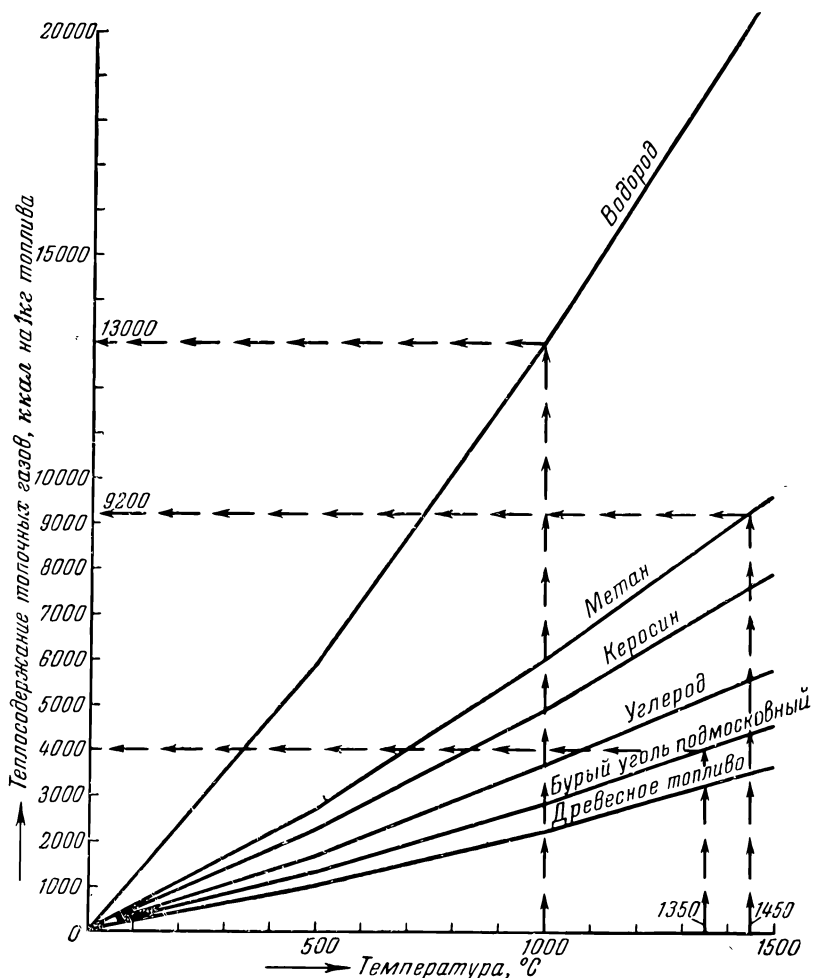
\* Рассчитан по составу горючей массы топлива, взятого из табл. 7 (стр. 61).

Таблица 15

Топливо	Содержание топочных газов, кг (на 1 кг сжигаемого топлива)										
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	α = 1,0			α = 1,2			α = 1,4		
			O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Сумма	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Сумма	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Сумма
Углерод . . . . .	3,67	0,0	0,0	8,83	12,50	0,54	10,59	14,80	1,07	12,18	17,10
Водород . . . . .	0,0	9,0	0,0	26,50	35,50	1,60	33,80	42,40	3,23	37,17	49,40
Метан . . . . .	2,75	2,25	0,0	13,20	18,20	0,72	15,48	21,30	1,58	18,42	25,00
Керосин . . . . .	3,16	1,26	0,0	11,30	15,70	0,67	13,53	18,60	1,37	20,23	21,60
Мазут . . . . .	3,20	1,04	0,0	10,80	15,00	0,65	12,95	17,80	1,30	15,10	20,60
Антрацит . . . . .	3,44	0,13	0,0	8,65	13,40	0,58	10,57	15,90	1,16	12,49	18,40
Каменный уголь газо- вый . . . . .	2,98	0,50	0,0	8,30	11,80	0,51	9,99	14,00	1,00	11,60	16,10
Бурий уголь подмо- сковный . . . . .	2,46	0,45	0,0	6,40	9,30	0,37	7,63	10,90	0,77	8,93	12,60
Торф средний . . . . .	2,14	0,54	0,0	5,70	8,40	0,35	6,85	9,90	0,67	7,93	11,30
Древесное топливо . . . . .	1,84	0,54	0,0	4,70	7,10	0,28	5,64	8,30	0,56	6,54	9,50

Таблица 16

Топливо	Значения суммарных теплоемкостей топочных газов, ккал на 1 кг топлива (на 1° С нагрева)									
	α = 1,0			α = 1,2			α = 1,4			
	0° С	1 000° С	1 500° С	0° С	1 000° С	1 500° С	0° С	1 000° С	1 500° С	
Углерод . . . . .	2,93	3,70	3,87	3,48	4,35	4,55	4,03	5,00	5,23	
Водород . . . . .	10,57	13,05	13,92	12,23	15,00	15,96	13,91	16,98	18,02	
Метан . . . . .	4,82	6,01	6,38	5,56	6,89	7,30	6,45	7,93	8,38	
Керосин . . . . .	3,98	4,91	5,28	4,68	5,73	6,14	5,40	6,58	7,02	
Мазут . . . . .	3,76	4,74	5,00	4,43	5,53	5,83	5,11	6,32	6,65	
Антрацит . . . . .	2,87	3,66	3,83	3,47	4,37	4,57	4,07	5,08	5,30	
Каменный уголь газовый . . . . .	2,86	3,62	3,82	3,39	4,24	4,47	3,89	4,84	5,09	
Бурий уголь подмосковный . . . . .	2,27	2,88	3,03	2,65	3,33	3,50	3,06	3,81	4,00	
Торф средний . . . . .	2,07	2,63	2,78	2,43	3,05	3,22	2,77	3,45	3,64	
Древесное топливо . . . . .	1,77	2,24	2,38	2,06	2,58	2,74	2,35	2,92	3,09	



Фиг. 31. Влияние температуры на теплосодержание топочных газов, получаемых при сгорании 1 кг топлива с расчетно-теоретическим количеством воздуха.

духа, равном единице (т. е. для расчетного соотношения между воздухом и топливом). Для получения теплосодержания топочных газов при нагреве до 1000 и 1500°С взяты суммарные теплоемкости при соответствующих температурах из табл. 16 и помножены на эти же температуры\*.

\* Так, например, подсчитывая теплосодержание топочных газов, образующихся от сгорания водорода при 1000°С, следует суммарную теплоемкость, равную в этом случае 13,05 ккал на 1°С нагрева и 1 кг сжигаемого водорода, умножить на 1000, что дает  $13,05 \cdot 1000 = 13\,050$  ккал/кг топлива. Аналогично этому теплосодержание топочных газов от сжигания 1 кг бурого угля при нагреве этих газов до 1500°С окажется равным  $3,03 \cdot 1500 = 4\,545$  ккал/кг.

Построенные на фиг. 31 графики теплосодержаний позволяют определить запас тепла в газах и для любых промежуточных температур, как это для примера показано стрелками на фиг. 31: для газов бурых углей при нагреве их до  $1\ 350^{\circ}\text{C}$  (теплосодержание газов равно  $4\ 000\ \text{ккал/кг}$  топлива); для газов от сгорания метана при нагреве их до  $1\ 450^{\circ}\text{C}$  (теплосодержание оказывается равным  $9\ 200\ \text{ккал/кг}$  сжигаемого метана); для газов от сгорания водорода при нагреве их до  $1\ 000^{\circ}\text{C}$  (теплосодержание равно  $13\ 050\ \text{ккал/кг}$  сжигаемого водорода).

Учитывая, что кривые теплосодержаний, как это видно из фиг. 31, очень умеренно отклоняются от прямых линий\*, нередко для простоты расчетов принимают, что суммарные теплоемкости не зависят от температуры. В этих случаях среднюю в интересующем нас промежутке температур суммарную теплоемкость принимают за постоянную величину. При таком упрощенном счете теплосодержание газов окажется прямо пропорциональным числу градусов нагрева и зависимость теплосодержания газов от температуры будет изображаться прямой линией.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СГОРЕВШИХ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ

Если представить себе, что все выделенное сгоревшим килограммом топлива тепло (т. е. его теплотворная способность) целиком пошло только на нагрев образовавшихся топочных газов, то согласно предыдущему для такого теоретического случая будет справедливо равенство

*теплотворная способность* = (*суммарная теплоемкость*)  $\times$  (*теоретическая температура*).

Следовательно, сама эта предельная (теоретическая) температура будет представлять собой частное от деления теплотворной способности топлива на суммарную теплоемкость:

$$t_{теор} = \frac{\text{теплотворная способность}}{\text{суммарная теплоемкость}} \text{ } ^{\circ}\text{C}.$$

На практике такие предельно высокие температуры не могут быть достигнуты потому, что в реальных топочных устройствах далеко не весь запас тепла, заключенный в  $1\ \text{кг}$  топлива, идет на нагрев топочных газов. При некотором несовершенстве смесеобразования чаще всего имеет место некоторый недожог топлива, т. е. неполнота тепловыделения.

Но даже в тех случаях, когда топливо сгорает полностью, часть выделенного тепла уходит не на нагрев газов, а на наружное охлаждение топочного устройства через его теплопроводящие стенки. Эта потеря тепла в какой-то мере всегда имеет место и в так называемых «горячих» топках, в которых стенки сооружены из мало теплопроводного материала в виде огнеупорных кирпичей изнутри и хорошей тепловой изоляции снаружи.

\* Что свидетельствует о сравнительно слабой зависимости средних теплоемкостей от температуры нагрева газов.

Нередко, однако, топочные стены сознательно покрывают изнутри специальными поверхностями нагрева, воспринимающими значительные количества тепла за счет теплообмена излучением и непосредственным соприкосновением с потоком горячих газов. Такой теплообмен, носящий название «прямой отдачи топки», может отвлечь от нагрева топочных газов весьма значительное количество тепла и, как понятно, тем большее, чем больше развиты эти внутритопочные поверхности нагрева. В этом случае топка получается сильно охлажденной, но тепло, уловленное таким способом, не теряется просто на наружное охлаждение, а полезно расходуется на нагревательные цели\*. В предельных случаях прямая отдача достигает 60 ÷ 65% теплотворной способности топлива, а на нагрев топочных газов остается не более 40 ÷ 45%. Если прямую отдачу топки, отнесенную к теплотворной способности топлива и выраженную в долях единицы, обозначить, как чаще всего принято, греческой буквой  $\sigma$  (сигма), то фактически достижимая температура газов, выдаваемых топкой, не будет превышать величины

$$t_{mon} = (1 - \sigma) \cdot t_{теор} = t_{теор} - \sigma \cdot t_{теор} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В этой разности температур величина произведения

$$\sigma \cdot t_{теор}$$

представляет собой то число градусов, которое теряется (по сравнению с теоретически возможной температурой) из-за охлаждения топки.

Если полнота тепловыделения не достигает единицы из-за недожога топлива, то при вычислении температуры топки это можно учесть таким же способом. Обозначив, например, коэффициент полноты сгорания (тепловыделения) топлива греческой буквой  $\varphi$  (фи), получим температуру выдаваемых топкой газов:

$$t_{mon} = t_{теор} - \sigma \cdot t_{теор} - (1 - \varphi) \cdot t_{теор} \text{ } ^\circ\text{C}$$

или, что то же,

$$t_{mon} = (\varphi - \sigma) \cdot t_{теор} = \varphi \cdot t_{теор} - \sigma \cdot t_{теор} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В этом выражении, как понятно, величина произведения  $(1 - \varphi) \cdot t_{теор}$  представляет собой число градусов, потерянных вследствие неполноты тепловыделения, а величина произведения  $\varphi \cdot t_{теор}$  — число градусов, теоретически возможное при данной степени полноты тепловыделения  $\varphi$ . Хорошо организованные топочные процессы достигают во многих случаях очень

\* Такой прием широко применяется в современных сильно экранированных трубчатыми поверхностями нагрева больших котельных топках, небольших жаротрубных котлах, нефтеперегонных печах и т. п.

высокой степени полноты тепловыделения, и коэффициент  $\varphi$  нередко приближается к единице, превышая значения  $\varphi = 0,95 \rightarrow 0,97$ . При этом потери от недожога связаны не столько с недогоранием продуктов разложения сложного органического топлива, появляющихся в топочных газах чаще всего в виде водорода ( $H_2$ ) и метана ( $CH_4$ ), или продуктов неполного окисления в виде окиси углерода (CO)\*, сколько с уклонением отдельных частиц этого топлива от предварительного процесса смесеобразования вследствие несовершенства его организации\*\*, а следовательно, и от вступления в процесс горения.

Обычно температура выдаваемых топкой газов лежит в пределах от 1 000 (сильно охлажденные топки при топливах с высоким  $t_{meop}$  или слабо охлажденные топки при топливах с низким  $t_{meop}$ ) до 1 500°С (слабо охлажденные топки при топливах с высоким  $t_{meop}$ ). Когда в топочной камере необходимо добиться еще более высоких температур (например, в металлургических и стекловаренных печах), прибегают к искусственному повышению теоретической температуры за счет высокого предварительного подогрева воздуха\*\*\*, а в некоторых случаях — к обогащению воздуха добавочным кислородом. В последнем случае на каждый килограмм сжигаемого топлива будет расходоваться меньше обогащенного таким способом окислителя, меньше получится топочных газов и соответственно уменьшится суммарная теплоемкость (удельный расход тепла на нагрев этих газов). Тогда при том же количестве выделенного сгоревшим топливом тепла топочные газы нагреются до более высокой температуры.

В современной котельной технике предварительный воздухоподогрев стал практически обязательным мероприятием, так как в достаточно мощных котельных установках стремятся к значительному развитию весьма активно работающих лучевоспринимающих поверхностей нагрева. Они повышают удельный съем пара в котле, но, как указывалось, весьма сильно охлаждают топочную камеру. Каждый градус подогрева воздуха повышает теоретическую температуру процесса горения примерно на 0,6 (при топливах с пониженным  $t_{mcop}$ ) или 0,8°С (при топливах с достаточно высоким  $t_{meop}$ ).

---

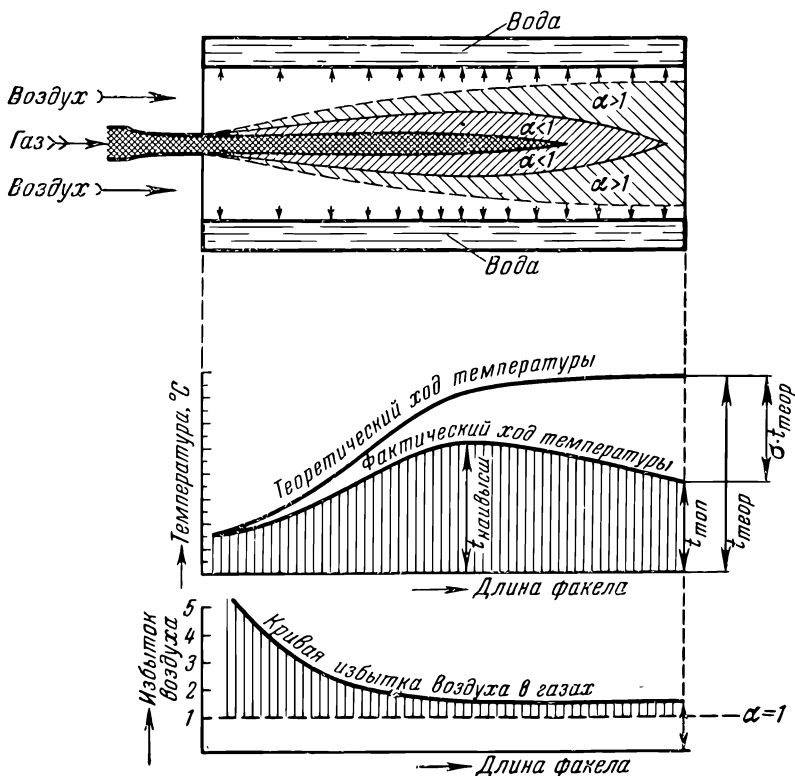
\* Так называемый «химический недожог»<sup>33</sup>.

\*\* Так называемый «механический недожог»<sup>34</sup>.

\*\*\* Предварительный подогрев топлива в отношении повышения теоретической температуры приносит мало пользы, так как в процессе горения воздух количественно преобладает: как мы видели, на 1 кг сжигаемого топлива идет несколько килограммов воздуха. Поэтому для повышения температуры процесса целесообразно нагревать только воздух.

### 3. ХАРАКТЕРНЫЙ ХОД ТЕМПЕРАТУРНОЙ КРИВОЙ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

Представим себе простейшую по форме топочную камеру в виде цилиндрической металлической трубы, снаружи охлаждаемой водой (фиг. 32). Степень охлаждения такой камеры будет очень значительной. Пусть через эту камеру движется непрерывный поток воздуха, в который вводится известное количество сложного органического топлива. Прежде чем вступить в процесс горения, такое топливо должно предварительно прогреться, пройти через процесс разложения (газификации), образовать смесь с воздухом, т. е. войти в соприкосновение с кислородом этого воздуха. Следовательно, весь этот сложный, после-



Фиг. 32. Простейшая схема цилиндрической охлаждаемой топки.

Ход температуры по длине топочной камеры по мере выгорания топлива. В неохлаждаемой (теоретической) топке наивысшая температура была бы достигнута в конечной зоне горения, где полностью выделилось бы все тепло топлива. В реальной охлаждаемой топке наивысшая температура достигается в средней зоне. Дальнейшее падение температуры вызывается продолжающимся охлаждением. В реальной охлаждаемой топке кривая температуры пойдет ниже теоретической из-за отнятия части тепла холодными поверхностями нагрета. Достигнув наивысшего значения где-нибудь в средней зоне, температура начнет падать к концу топки с того момента, когда оканчивающееся тепловыделение от сгорания остатков газа уже не сможет покрывать расход тепла, отнимаемого холодными поверхностями.

довательно развивающийся процесс вытянется в виде факела по длине топочной камеры.

Мысленно разделим эту камеру на несколько последовательных зон. Как мы видели при разборе хода процесса в диффузионном факеле \*, первыми войдут в процесс краевые частицы топлива, а сердцевинные будут проходить процесс смесеобразования и, следовательно, процесс сгорания, последовательно опаздывая. Таким образом, в первой зоне успеет вступить в реакцию горения и выделить тепло лишь ничтожная часть топлива, по отношению к которой введенный в топку воздух окажется в огромном избытке. Это в сущности и равносильно тому, как если бы в первой зоне мы организовали процесс с огромным избытком воздуха. Ничтожное количество выделяющегося в этой зоне тепла оказывается в состоянии прогреть всю массу воздуха с возникшими продуктами сгорания лишь до очень невысокой температуры. В следующей, второй зоне количество сгоревшего топлива заметно возрастет, а относительный избыток воздуха в газах заметно уменьшится. Это приведет к соответствующему росту температуры, которая и далее, от зоны к зоне, будет повышаться до тех пор, пока избыток воздуха в продуктах сгорания не упадет до окончательного значения, соответствующего полному сгоранию топлива (фиг. 32).

Если бы при таком ходе процесса сгорания стенки топки поднимали свою температуру вслед за газами до того же уровня и были бы абсолютно нетеплопроводны, то все тепло, выделяемое топливом, пошло бы только на нагрев топочных газов. Тогда в каждой отдельной зоне топки температура этих газов достигла бы теоретического уровня, соответствующего местному (зонному) избытку воздуха. В последних зонах топки, где избыток воздуха в топочных газах перестал бы меняться (выгорело все топливо), перестала бы меняться и теоретическая температура горения, как это показывает горизонтальный участок кривой подъема теоретической температуры процесса на фиг. 34, соответствующий такому же горизонтальному участку кривой, изображающей последовательное падение коэффициента избытка воздуха в топочных газах, прекращающееся только в конце достаточно развитой в длину топочной камеры.

Однако такой теоретический ход температурной кривой несуществен, так как практически неосуществима топка с нетеплопроводными стенками. В рассматриваемом же случае (фиг. 32) холодные стенки топки будут жадно воспринимать тепло, излучаемое на них огненным факелом, причем тем большее, чем выше температура пламени. Это тепло, отвлекаемое от нагрева газо-воздушного потока в топочной камере, приводит к резкому снижению хода кривой, изображающей фактический рост температуры движущегося по топке газо-воздушного потока. В каком-то определенном для данного режима топки месте

---

\* См. предыдущую главу.

температура потока (в среднем) достигнет наибольшей величины, после чего начнет падать в конце топочного пространства, где новое добавочное тепловыделение уже сходит на нет, вследствие того что горение заканчивается, а прямая отдача горячего потока холодным стенкам остается весьма значительной (фиг. 32).

Таким образом, в топочном объеме температурная кривая где-то достигает наибольшего значения, после чего начинает падать до той температуры, при которой топочные газы окончательно выдаются топкой в рабочие дымоходы. Падение это оканчивается, как понятно, тем больше, чем сильнее охлаждена топочная камера, т. е. чем больше развиты лучевоспринимающие поверхности нагрева, расположенные в этой топочной камере, иначе говоря, чем больше «прямая отдача» топки. Участок подъема температурной кривой показывает, что в этой части топочного объема тепловыделение *превышает теплоотдачу*, за счет чего и растет температура, а участок падения этой кривой показывает, что в этой части топочной камеры отдача тепла (охлаждение) *превышает тепловыделение*, из-за чего температура и падает\*.

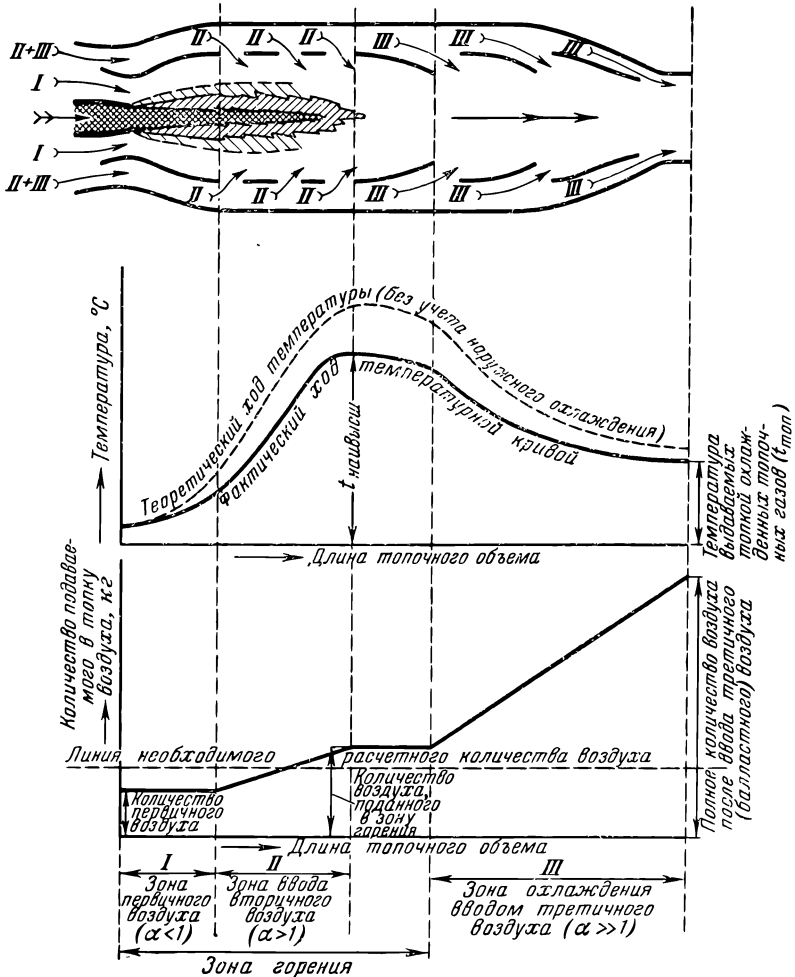
Если с течением времени ход температурной кривой в топочном объеме не меняется, это означает, что достигнуто скоростное («динамическое») равновесие, при котором скорость выделения тепла равна скорости отвода тепла из очага горения, иначе говоря топочный процесс достиг установившегося состояния. Всякое изменение топочного режима приводит к изменению температурной кривой, которая может стать более пологой или более крутой, причем изменится и местоположение ее вершины (наибольшей достигаемой температуры). Для этого достаточно изменить нагрузку топки, общий избыток воздуха или даже только его распределение по длине топочной камеры.

Распределение избытка воздуха по длине топочной камеры (по последовательным зонам) играет решающую роль в ходе процесса. Вместо того чтобы предоставить воздуху возможность вступать в процесс реагирования с топливом по мере самопроизвольного, стихийного образования горючей смеси, можно сознательно вводить воздух в топочную камеру в виде скоростных воздушных струй, создающих активные местные очаги смесеобразования по мере желательного развития процесса. В корень же фа-

---

\* Совершенно подобно этому происходит повышение или падение давления в паровом котле. Если давление растет (стрелка манометра поднимается), это означает, что котел вырабатывает в этот момент больше пара, чем его отводится к потребителю. Если же давление уменьшается (стрелка манометра падает), то это означает, что потребитель стал забирать больше пара, чем котел успевает вырабатывать. В первом случае уменьшают нагрузку топки, во втором ее увеличивают. Если же в действующем паровом котле стрелка манометра стоит на месте, это означает, что достигнуто скоростное (динамическое) равновесие, при котором скорость выработки нового пара оказывается равной скорости его расходования потребителем (паровой машиной, турбиной или системой нагревательных приборов).

кела (первые зоны) следует при этом подавать умеренное количество первичного воздуха, что создаст в них умеренные избытки воздуха, приведет к соответствующему повышению температуры, и, в свою очередь, ускорит процесс предварительной газификации органического топлива, подготавливающей его к окончательному вступлению в процесс. Такой ступенчатый подвод воздуха вызовет ступенчатое тепловыделение, а с ним вместе и ступенчатый подъем позонных температур. Этот прием может



Фиг. 33. Схема топки с воздушным охлаждением.

Зона горения делится на первичную (с подачей первичного воздуха в количестве, меньшем расчетно-необходимого) и вторичную, в которой воздух подается в количестве, соответствующем заданному избытку в самом процессе горения. В первичной зоне коэффициент избытка меньше единицы ( $\alpha < 1$ ), во вторичной зоне он несколько больше единицы ( $\alpha > 1$ ). В третью зону (за зоной горения) подается в большом количестве третичный воздух, разбавляющий топочные газы и тем значительно снижающий температуру выдаваемых топкой газов.

привести к значительно более быстрому и надежному завершению процесса сгорания топлива, почему он и применяется в специальных топках, работающих с большими тепловыми напряжениями. В этих случаях первичному воздуху предоставляется роль зачинателя, обеспечивающего лишь самое необходимое количество кислорода для начальных участков процесса, а вторичный воздух, подаваемый в зоны уже развивающегося горения, додает то количество кислорода, которое необходимо для полного завершения сгорания топлива (фиг. 33).

В случае надобности падающая часть температурной кривой может характеризоваться весьма крутым падением, для чего в часть камеры, которая расположена за зоной полного сгорания топлива, можно подать добавочный третичный воздух, роль которого сводится к разбавлению горячих топочных газов в целях снижения конечной температуры этих газов до заданного умеренного уровня (фиг. 33). Этот прием получил широкое применение в топках для газотурбинных установок, огневых сушилках, некоторых специальных печах пищевой промышленности и т. п.<sup>35</sup>

Если от топки требуется выдача топочных газов весьма умеренной температуры, которая достижима только при очень значительном разбавлении продуктов сгорания избыточным (балластным) воздухом, то такая подача добавочного балластного воздуха за зоной полного окончания процесса сгорания является единственно целесообразной, так как если бы этот балластный воздух ввести прямо в зону горения, он настолько снизил бы температуру процесса, что горение потеряло бы устойчивость и управляемость, а не то и просто оказалось бы неосуществимым. Во всяком случае при столь низких температурах в топочной камере процесс перешел бы в область химического торможения и не успевал бы завершаться в пределах топки: топка начала бы выдавать значительное количество недожженных газов, резко снизив полноту тепловыделения. Это в свою очередь способствовало бы дополнительному падению температуры, т. е. дальнейшему самопроизвольному ухудшению хода топочного процесса.

#### 4. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ПОТУХАНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ПРИХОДОМ И РАСХОДОМ ТЕПЛА

Теперь представляется вполне своевременным окончательно подчеркнуть, что устойчивый процесс горения является результатом достижения динамического равновесия в приходе и расходе тепла в любой части очага горения, но сделать это иными средствами рассуждения, вполне доступными после всего ранее изложенного.

Сопоставим ход кривой тепловыделения с ходом кривой теплоотвода при последовательном повышении температуры. Вспомним, что, как это следует из рассмотренной ранее фиг. 27,

ход кривой скорости выгорания какого-нибудь топлива, а следовательно, и скорость тепловыделения при повышении температуры процесса имеет вид, напоминающий латинскую букву S, т. е. в первой, низкотемпературной части кривая изогнута выпуклостью вниз, а в высокотемпературной части — вверх. Такой двойной изгиб кривой, как мы уже видели, объясняется тем, что в области очень низких температур весьма замедленно начинает протекать сама химическая реакция (область химического торможения процесса). Скорости реакции при этом столь незначительны, что даже такой сравнительно медленный физический процесс, как процесс смесеобразования, вполне поспевает за химической реакцией и даже может ее опережать. Но при дальнейшем повышении температуры процесса вначале идущая полого кривая химической реакции начинает все круче подниматься вверх\*, пока не доходит, наконец, то таких температур, при которых процесс смесеобразования уже перестает поспевать за химической реакцией, и процесс горения переходит из области химического торможения в область физического торможения. В этой области скорость выгорания топлива (а, следовательно, и тепловыделения) будет определяться только скоростью самого образования горючей смеси, которая практически не зависит от температуры. Поэтому при дальнейшем повышении температуры кривая тепловыделения перестанет подниматься вверх по кривой химической реакции и, отстав от нее, начнет изгибаться вправо, выходя на горизонталь: температура в этой (диффузионной) области перестанет ускорять сгорание топлива, скорость которого становится практически постоянной.

В свою очередь отвод тепла от очага горения в виде тепло-содержания покидающих этот очаг топочных газов будет расти с повышением температуры процесса, как мы это видели из фиг. 31, почти по прямой, слабо приподнимаясь кверху. Примерно такой же характер имеет и кривая теплоотвода за счет лучистого теплообмена горячего факела с холодными поверхностями, воспринимающими это тепло\*\*.

Полный теплоотвод из очага горения представляет собой сумму теплоотводов: теплосодержание покидающих очаг топочных газов плюс прямая отдача факела окружающим его поверхностям нагрева. При сложении этих двух кривых получится суммарная кривая (фиг. 34), еще круче поднимающаяся кверху.

Наложив теперь кривую теплоотвода на кривую тепловыделения, убедимся, что они неизбежно пересекают друг друга по крайней мере раз, что означает существенную перемену места: та линия, которая в одной температурной области шла ниже, в области более высоких температур пошла выше другой.

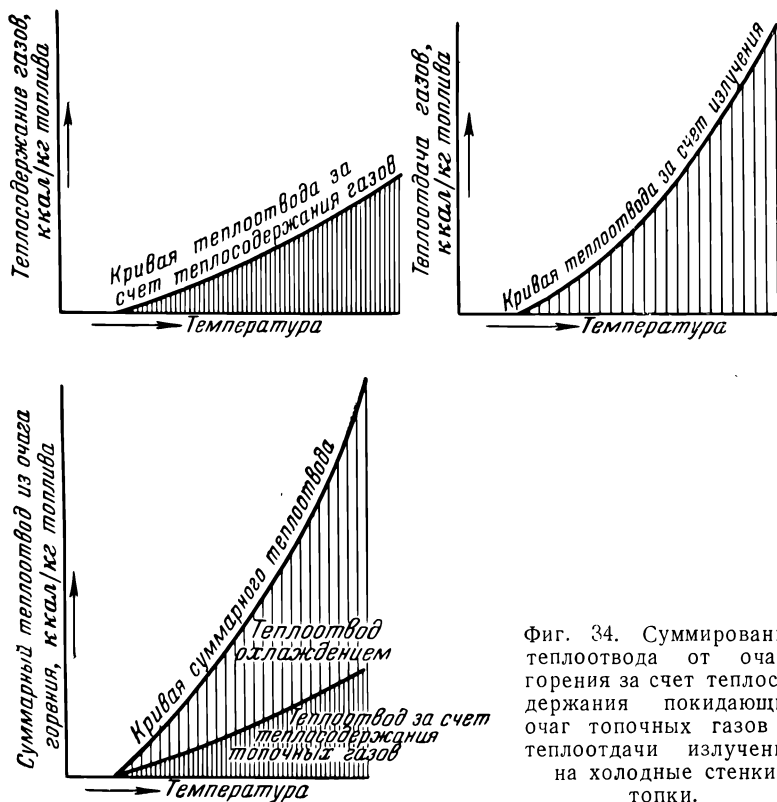
---

\* Следует вспомнить, насколько сильно скорость химической реакции зависит от температуры (см. гл. 6).

\*\* Кривая теплообмена излучением имеет сначала сильную изогнутость (в области низких температур), а затем начинает приближаться к прямой.

При некотором расположении обеих линий они могут пересечься даже 3 раза, то отставая, то перегоняя одна другую (фиг. 35,а).

Рассмотрим нижнюю точку пересечения  $O$ . Слева от нее линия теплоотвода идет ниже линии тепловыделения, а справа — выше. При таком сочетании тепловыделения и теплоотвода процесс может установиться только при температуре, соответствующей



Фиг. 34. Суммирование теплоотвода от очага горения за счет теплосохранения покидающих очаг топочных газов и теплоотдачи излучения на холодные стенки топки.

щей самой точке пересечения  $O$ . В самом деле, если бы температура процесса оказалась несколько ниже температуры этой точки, т. е. процесс протекал бы левее (например, при температуре  $t_1$ ), то как видно из графика на фиг. 35,а тепловыделение оказалось бы больше теплоотвода и процесс, саморазогреваясь, передвинулся бы вправо по направлению к точке  $O$ . Наоборот, если протекание процесса временно пошло бы правее точки  $O$  (например, при температуре  $t_2$ ), то теплоотвод оказался бы больше тепловыделения. Следовательно, вследствие самоохлаждения процесс передвинулся бы в область более низкой температуры, т. е. влево к точке  $O$ . Таким образом, единственной возможной точкой уравновешенного протекания процесса оказывается точка  $O$ . Совершенно такой же способностью обладает и точка верхнего

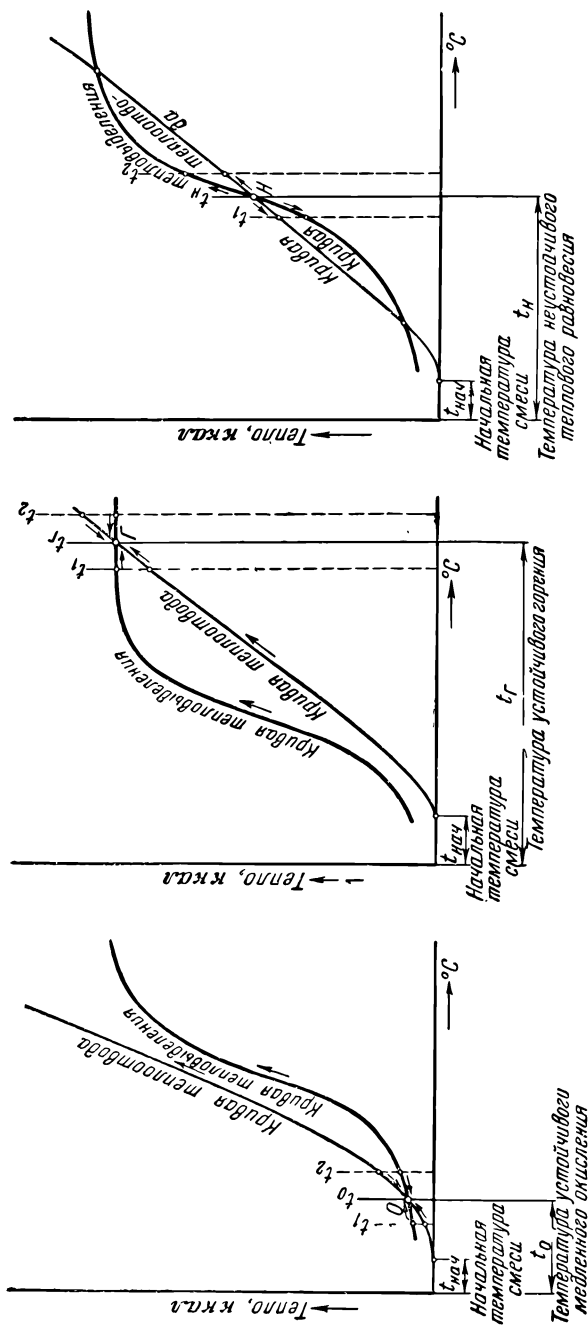
пересечения  $\Gamma$ . Те же рассуждения привели бы нас к выводу, что временное перемещение процесса левее точки  $\Gamma$  заставит его произвольно переместиться вправо вследствие саморазогрева (тепловыделение преобладает над теплоотводом), а при смещении процесса вправо от точки  $\Gamma$  он сам вернется в точку  $\Gamma$  вследствие самоохладения из-за преобладания теплоотвода над тепловыделением (фиг. 35,б).

Обратным свойством обладает пересечение кривых в точке  $H$  (см. фиг. 35,в). Казалось бы и здесь должна была бы возникнуть устойчивость процесса, так как приход и расход в этой точке также равны, как и в точках пересечения  $O$  и  $\Gamma$ , и, следовательно, уравновешивают друг друга. На самом же деле в этом случае устойчивый процесс невозможен: малейшее отклонение процесса, как видно из фиг. 35,в, влево привело бы его в область преобладания охлаждения, и процесс самопроизвольно и немедленно скатился бы в область низких температур до точки  $O$ , т. е. до его устойчивого низкотемпературного протекания. В свою очередь ничтожное отклонение процесса вправо от точки  $H$  привело бы его в область преобладания тепловыделения, и неизбежный саморазогрев перелел бы процесс в область более высоких температур до точки  $\Gamma$ , т. е. до его устойчивого высокотемпературного протекания.

Таким образом, мы убеждаемся, что могут существовать только два типа окислительных процессов с устойчивым протеканием: низкотемпературный, медленный окислительный процесс, подобный тем, которые рассматривались нами в гл. 2 и высокотемпературный, быстрый процесс окисления, который обладает не меньшей устойчивостью и который мы называем горением в полном смысле этого слова. Все остальные промежуточные процессы неустойчивы и при соответствующих обстоятельствах мгновенно переходят либо в горение (это явление мы называем *воспламенением*), либо в медленное окисление (явление такого перехода мы называем *потуханием*).

Как воспламенение, так и потухание становятся возможными лишь при определенных тепловых соотношениях. Если, например, кривая теплоотвода лежит в основном левее кривой тепловыделения, пересекаясь с ней только в точке  $O$ , то воспламенение, т. е. переход медленного окислительного процесса в процесс горения, оказывается невозможным (фиг. 35,а).

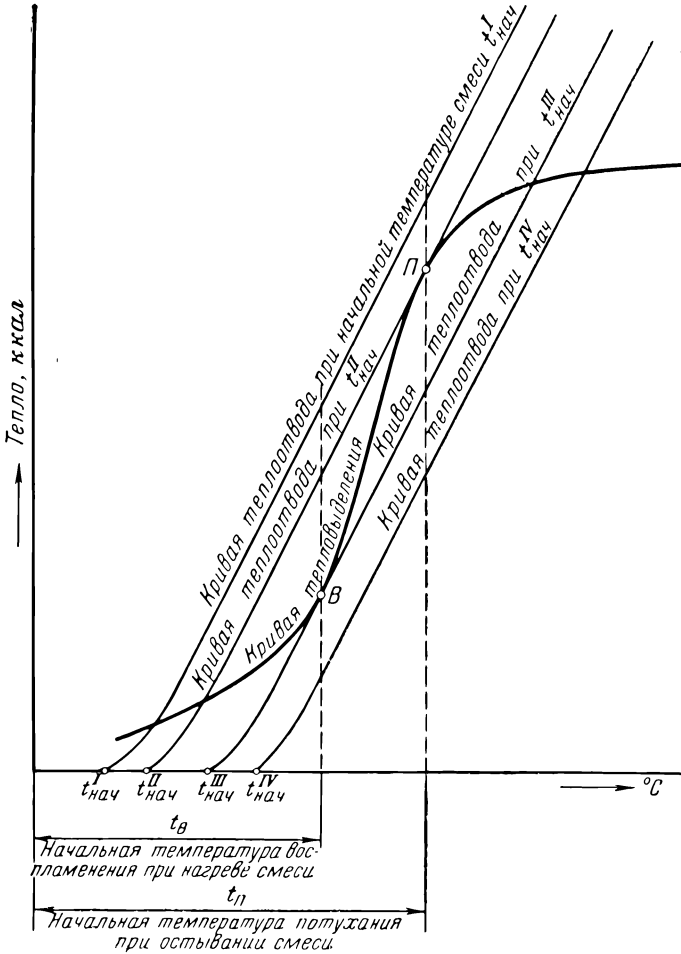
Нижняя точка кривой теплоотвода, обозначенная на фиг. 36  $t_{нач}$ , представляет собой начальную температуру горючей смеси. Если повышать эту начальную температуру (за счет предварительного разогрева смеси), то точка  $t_{нач}$  будет смещаться вправо, а вместе с ней начнет смещаться вправо и вся кривая теплоотвода. Таким предварительным подогревом смеси мы можем, наконец, добиться того, что в области низких и умеренных температур кривые не получают ни одной точки пересечения, но возникнет точка  $B$  их взаимного касания (фиг. 36).



а — случай устойчивого медленного окисления в точке (O) пересечения обеих кривых в области низких температур.  
 б — случай устойчивого горения в точке Г пересечения обеих кривых в области высоких температур.  
 в — случай крайне неустойчивого теплового равновесия в точке H пересечения обеих кривых.

Фиг. 35. Различные случаи сочетания кривых тепловыделения с кривыми теплоотвода.

В этом случае тепловыделение будет преобладать над теплоотводом вплоть до верхнего пересечения кривых в точке  $\Gamma$ . Вследствие неизбежного при этом дальнейшего саморазогрева произойдет воспламенение смеси, и процесс установится в единственно возможной устойчивой точке  $\Gamma$  при температуре горе-



Фиг. 36. Случай воспламенения в точке касания  $B$  при постепенном нагревании смеси и потухания в точке касания  $\Gamma$  при постепенном охлаждении смеси. Температура воспламенения меньше температуры потухания.

ния  $t_{г}$ . Температура  $t_{в}$ , соответствующая точке касания  $B$ , носит название температуры воспламенения. Если кривая теплоотвода переместится еще правее в область единственно возможного пересечения кривых в верхней точке  $\Gamma$ , то воспламе-

нение всегда будет обеспечено и процесс всегда будет устанавливаться на одной из соответствующих температур  $t_r$ .

Начнем теперь обратный процесс постепенного охлаждения смеси, т. е. уменьшения начальной температуры  $t_{нач}$ , вместе с которой вся кривая теплоотвода будет смещаться влево, в сторону более низких температур. Такое смещение приведет нас к тому, что кривая теплоотвода получит, в конце концов, общую с кривой тепловыделения точку касания  $\Pi$  (фиг. 36). В этом случае окажется, что теплоотвод все время преобладает над тепловыделением во всей верхней части обеих кривых вплоть до нижней точки  $O$  их пересечения. Как понятно, неизбежное при этом самоохлаждение процесса переведет его из области горения в область устойчивого медленного окисления (или вообще в область практического отсутствия химического процесса). Следует отметить, что потухание при остывании процесса происходит при несколько более высокой температуре, чем воспламенение при разогреве ( $t_{\Pi}$  больше, чем  $t_B$ , как это видно из фиг. 36). Существенно также усвоить, что, вопреки устаревшему мнению, температуры воспламенения и потухания не являются постоянными даже для одной и той же горючей смеси, так как точки касания могут менять свое местоположение в зависимости от изменения хода кривых тепловыделения и теплоотвода, т. е. зависят от местного теплового баланса процесса<sup>36</sup>.

---

---

## Глава девятая

### ЗА ЧТО ДЕРЖИТСЯ ПЛАМЯ?

#### 1. НА КОСОМ ФРОНТЕ ПЛАМЯ УДЕРЖИВАЕТСЯ ТОЛЬКО ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ПОДЖИГАНИИ

Если вдуматься и учесть, что горение происходит в непрерывном потоке воздуха и газа, то должна показаться удивительной способность горелок удерживать около себя фронт пламени. После того как горелка разожжена, пламя принимает определенные очертания и либо сохраняет эти очертания в кажущейся неподвижности, либо колеблется (пульсирует) в сравнительно узких пределах около некоторого среднего положения. Эта устойчивость или даже кажущаяся неподвижность фронта пламени на самом деле является результатом сложного динамического равновесия, о котором в общих чертах уже говорилось в гл. 6. Однако оно заслуживает более внимательного рассмотрения, так как по определенным причинам многие горелки сохраняют способность удерживать пламя лишь в очень узких пределах изменения нагрузок. Вне этих пределов они теряют эту способность, т. е. перестают быть горелками, хотя и продолжают подавать топливо и окислитель, образуя горючую смесь. Чтобы горелка оказалась работоспособной в этих новых областях нагрузок, необходимо осуществление новых мероприятий, отсутствовавших в ней ранее, для соответствующего изменения условий смесеобразования и воспламенения.

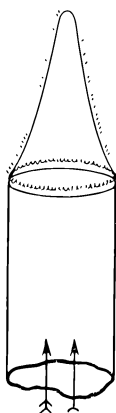
Что же привязывает фронт пламени к горелке и что может нарушить эту связь, заставив горелку потерять главнейшую свою способность, и сделать ее непригодной для применения в определенных условиях эксплуатации?

Рассмотрим сначала горелки простейшего типа.

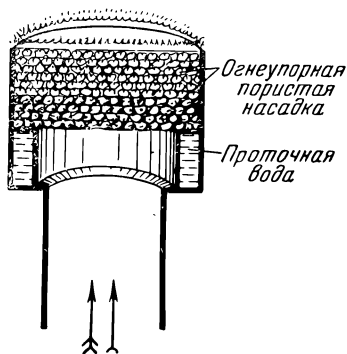
Как мы видели уже в гл. 6, такой простейшей горелкой может служить трубка, через которую подается готовая горючая смесь газообразного топлива с воздухом. В этом случае над устьем трубки возникает конусообразный фронт пламени, быстро приходящий в равновесие и кажущийся неподвижным огненным колпачком при небольших нагрузках, т. е. пока имеет место спокойно-струйчатое (ламинарное) течение всего потока (фиг. 37).

Как уже разъяснялось\*, такая кажущаяся неподвижность становится возможной только в том случае, если в каждой точке этого огневого конуса соблюдается равновесие между скоростью подачи горючей смеси и обратно направленной, встречной скоростью распространения пламени. Однако следует отличать случай *прямого*, поперечного по отношению к движению потока расположения фронта пламени от случая *косого* его расположения.

Полное равновесие встречных скоростей возможно только при прямом, поперечном фронте. Самолет, движущийся прямо



Фиг. 37. Простая трубчатая горелка с конусообразным пламенем для сжигания готовой горючей смеси при некотором избытке воздуха. Смешение топливного газа с воздухом в равномерную готовую горючую смесь происходит в особом смесителе, предшествующем самой горелке.



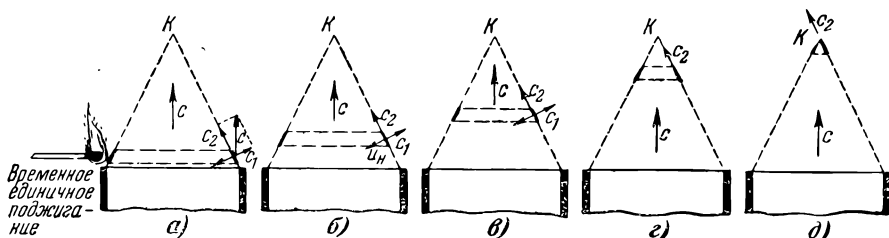
Фиг. 38. Горелка с пористой насадкой, внутри которой происходит горение (в основном). Над горелкой возникает тонкий пламенный покров. Под насадкой устраивается покое кольцо с водяным охлаждением.

против урагана с равной ему скоростью, лодка, движущаяся прямо против течения быстрой реки с одинаковой с этим течением скоростью, будут казаться неподвижными наблюдателю, стоящему на земле, хотя оба они, самолет и лодка, движутся против потока с предельно доступной им скоростью<sup>37</sup>.

Если бы поток горючей смеси вытекал из трубки по всему сечению с одинаковой скоростью и притом эта скорость оказалась равной встречной скорости распространения пламени, то около устья трубки действительно возник бы прямой, поперечный фронт пламени, неподвижный во всех точках сечения, так как в каждой из них обе направленные друг на друга скорости оказались бы уравновешенными.

\* Следует вспомнить, что об этом говорилось в гл. 6.

На самом же деле, как мы видели в гл. 6 (фиг. 19), поток движется по трубке с различными скоростями: наименьшими — сколо тормозящих его стенок и наибольшими — в сердцевине. При нормально работающей горелке в этой основной, центральной своей части поток, как оказывается, обладает скоростями, заметно превышающими обратные скорости распространения пламени, что и приводит к образованию вытянутого вперед ко- сого фронта пламени конусообразного вида. При косом располо- жений фронта пламени поступательная скорость потока и нор- мальная скорость распространения пламени уже не направлены прямо навстречу друг другу, так как первая скорость параллель-



Фиг. 39. Образование косо- го (конусообразного) фронта пламени.

Снос огневого кольца, возникшего от мгновенного поджигания снизу, потоком горючей смеси в случае, когда нормальная скорость распространения пламени назад  $u_n$  м/сек меньше скорости потока смеси  $s$  м/сек. Конус сам образуется под таким углом, при котором на его поверхности уравниваются составляющая скорости смеси  $c_1$ , направ- ленная нормально от поверхности конуса наружу, и обратная скорость распространения пламени, направленная нормально к поверхности конуса внутрь, навстречу поступающей к поверхности конуса горючей смеси ( $c_1 = u_n$ ). Вторая составляющая скорости смеси  $c_2$  остается неуравновешенной и сносит возникший от поджигания первичный огненный поясok по поверхности конуса к его вершине (точке  $K$ ). Здесь огненный поясok сам сужается в точку и затухает. Распространение пламени назад невозможно, так как в каждой точке поверхности конуса (линии фронта) скорость потока смеси с больше обрат- ной скорости распространения пламени.

на оси трубки, а вторая перпендикулярна к образовавшемуся косому фронту (фиг. 39,а). В таком случае, даже если обе скорости равны по величине, их полное уравнивание невоз- можно<sup>37</sup>.

По геометрическим правилам всякая скорость может быть разложена на две или несколько, скоростей вполне ее заменяю- щих, но направленных в разные стороны. Воспользуемся этим правилом и заменим поступательную скорость потока  $S$  двумя ее заменяющими («составляющими»)  $C_1$  и  $C_2^*$ , одну из которых, равную по величине нормальной скорости распространения пла- мени, направим прямо навстречу этой последней, т. е. перпен- дикулярно фронту пламени, а вторую — вдоль фронта пламени, как это показано на схеме а фиг. 39 и на схеме а фиг. 40. Тогда становится ясным, что прямое и полное равновесие возни- кает только между одной из составляющих скорости потока — скоростью  $C_1$  и направленной прямо на нее скоростью распро-

\* Величины этих составляющих скоростей определяются известным пра- вилom параллелограмма скоростей.

странения пламени  $U_{\kappa}$ . Вторая же составляющая скорости потока — скорость  $C_2$  остается неуравновешенной и будет *сносить* возникший фронт пламени по поверхности конуса вверх к его вершине, подобно тому как речной поток сносит лодку вбок, если она движется не прямо против потока, а несколько наискось по отношению к нему<sup>37</sup>. Таким образом, если бы на мгновение, как это показано на схемах фиг. 39, к основанию такого конуса поднести горящий факелок и поджечь вытекающую из устья трубки горючую смесь, то возникший у самого устья небольшой участок фронта пламени не смог бы удержаться на месте и стал бы немедленно перемещаться кверху, так как его сносила бы неуравновешенная скорость  $C_2$ , пока он не достиг бы вершины, где и прекратил бы свое существование. Распространение же пламени назад на последующие участки горючей смеси, поступающей из трубки, как понятно, невозможно, так как скорость этого распространения во всех точках меньше поступательной скорости потока, уносящей вперед подожженный участок смеси.

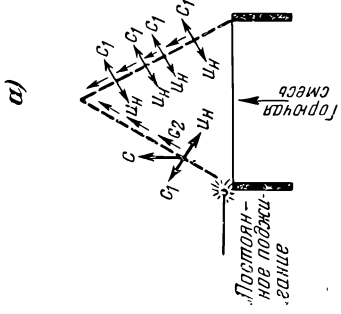
## 2. КАК ОРГАНИЗОВАТЬ НЕПРЕРЫВНОЕ ПОДЖИГАНИЕ?

Итак, при косом фронте пламени достижение его устойчивого, неподвижного расположения над устьем трубки оказывается невозможным без дополнительных мероприятий. Таким мероприятием могло бы оказаться непрерывное искусственное поджигание (частой искрой, факелком, раскаленным телом), как это схематически показано на схеме *a* фиг. 40.

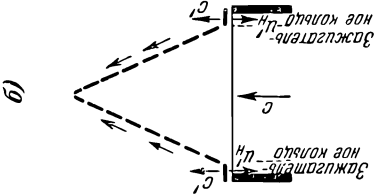
Однако при известных режимных условиях, как показывает опыт, вполне возможно возникновение самоподжигания. При спокойно-струйчатом (ламинарном) течении потока горючей смеси возникающий над устьем трубки огневой конусок образует вокруг себя небольшой участок прямого фронта (над самыми краями трубки), где обе скорости направлены, следовательно, прямо друг против друга и где они полностью друг друга уравновешивают. Происходит это именно здесь потому, что у самых стенок поток сильно заторможен и движется с незначительной поступательной скоростью. Такой же незначительной в этой части потока оказывается и встречная скорость распространения пламени, так как теплопроводная стенка трубки отводит тепло от потока горючей смеси, уменьшая в этом месте ее температуру и соответственно снижая нормальную скорость распространения пламени, которая, как нам известно\*, весьма сильно зависит именно от температуры. Таким образом, при спокойно-струйчатом режиме течения по краям потока находятся такие участки, на которых обе встречные скорости, хотя и по разным причинам, оказываются весьма незначительными, равными и направленными прямо друг против друга. Такое прямое уравновешивание со-

\* Следует вспомнить гл. 6.

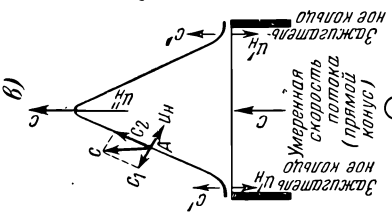
а)



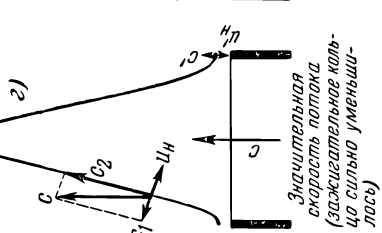
б)



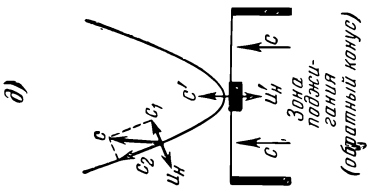
в)



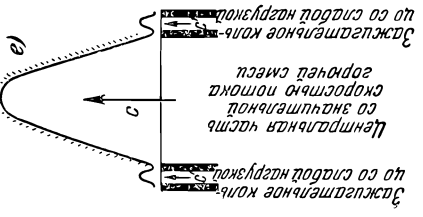
г)



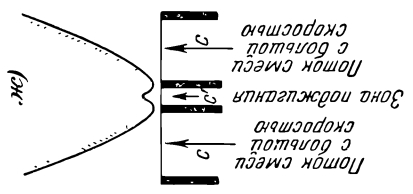
д)



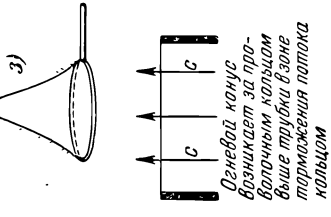
а)



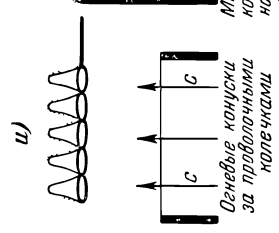
б)



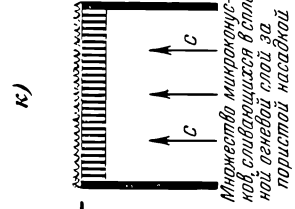
в)



г)



д)



Множество микроконусов, сливающихся в сплошной олеговой слой за пористой массой

Деневые конуски за проволочными колечками

Олеговой конус возникает за проволочным кольцом выше трубки в зоне парожжения потока

Плотность смеси с большой скоростью  
Зона поджигания  
Плотность смеси с большой скоростью

здает неподвижный устойчивый фронт пламени у самого основания огневого конуса в виде зажигательного кольца, которое вполне заменяет всякое искусственное поджигание. Схематически это изображено на фиг. 40 (схемы *б* и *в*). Однако возникновение такого зажигательного кольца становится возможным только при определенных благоприятных условиях движения и теплообмена в потоке. Если, например, заметно увеличить форсировку горелки, т. е. общую скорость подачи горючей смеси, то характеризующая эту смесь нормальная скорость распространения пламени останется той же, а скорость сноса  $C_2$  вырастет вместе с общей скоростью потока и вытянет конусок, сделав его длиннее. При этом соответственно увеличится и его поверхность, на которой происходит сгорание горючей смеси, т. е. увеличится поверхность фронта горения соответственно новой увеличенной производительности горелки. Однако при этом обстоятельства для образования поджигательного кольца (участка прямого уравнивания скоростей) явно ухудшатся, как это видно из схемы *г* фиг. 40. Кольцо станет меньше, неустойчивее и начнет терять свою поджигательную способность, что придаст неустойчивость и всему фронту пламени. После превышения некоторого предела форсировки поджигательное кольцо исчезнет, и трубочка потеряет способность удерживать около себя конусный (косой) фронт пламени, т. е. перестанет служить горелкой.

Однако имеется полная возможность восстановить потерянную способность удерживать пламя у устья трубки и при достаточно значительных форсировках, при которых движение потока горючей смеси заходит в область беспорядочно-смесительного (турбулентного) течения. Для этой цели достаточно, например, на пути потока поставить какое-нибудь плохо обтекаемое тело, создающее развитую зону местного торможения этого потока. Примером такого местного затормаживания потока может служить схема *д* фиг. 40, где в середине трубки расположена небольшая поперечная площадка. В этой «зоне затишья» при поджигании смеси пламя «сядет» по краям площадки, что будет свидетельствовать о новом возникновении некоторого участка прямого уравнивания встречных скоростей: поступательной скорости потока и встречной скорости распространения пламени, достаточного для поджигания быстро движущейся вокруг этой зоны остальной части горючей смеси. Легко понять, что при таком «центральной» поджигании косой фронт пламени примет уже форму «обратного конуса» с опрокинутой вниз вершиной в центре поджигающей зоны.

Другим способом обеспечения устойчивого поджигания может явиться искусственное расчленение потока на основной и вспомогательный, причем вспомогательный поток движется по особому каналу: либо по центральной трубочке, расположенной внутри основной (схема *ж* фиг. 40), либо по наружному узкому кольцевому каналу (схема *а* фиг. 40). Для вспомогательного потока подбирается такая умеренная нагрузка, при которой

над его устьем по разобранным выше причинам возникает не-большое, но устойчивое пламя, достаточное для уверенного под-жигания основного потока горючей смеси, движущегося со зна-чительно большими скоростями по основной трубке. В обоих случаях в основном потоке возникают вытянутые вперед косые фронты горения: в первом случае (схема ж) — в виде обратного конуса, во втором (схема е) — в виде прямого конуса.

На схеме з фиг. 40 показан случай местного затормаживания потока при помощи введения в поток проволочного кольца. Со-здаваемая при этом кольцевая зона торможения скоростей газа обеспечивает возникновение устойчивого «прямого» огневого конуса пламени при таких скоростях вытекания горючей смеси, при которых сама трубка уже не в состоянии удержать пламя. Если нагрузку (т. е. скорости) соответственно уменьшить, то пламя соскочит с кольца и «сядет» снова на устье трубки.

Всякая воздушная горючая смесь характеризуется двумя основными постоянными величинами: удельным тепловыделе-нием единицы объема ( $\text{ккал/м}^3$ ) и нормальной скоростью рас-пространения фронта пламени ( $\text{м/сек}$ ). Следовательно, и про-изведение этих величин будет представлять собой характери-стическую постоянную величину для данного состояния смеси в виде «удельной теплопроизводительности» фронта пламени на единицу его поверхности, исчисляемой в килокалориях выделяю-щегося тепла на каждый квадратный метр поверхности фронта горения в секунду ( $\text{ккал/м}^3 \times \text{м/сек} = \text{ккал/м}^2 \text{ сек}$ ).

Когда нужно увеличить тепловую производительность труб-чатой горелки, горючую смесь начинают подавать через нее с соответственно большими скоростями. Если при этих увеличен-ных скоростях горелка еще в состоянии удерживать пламя, то она сама вытянет огневой конус \* до такой величины, при кото-рой его боковая поверхность, т. е. поверхность фронта горения, увеличится во столько раз, во сколько раз увеличилась нагрузка горелки. Это неизбежно должно произойти, так как тепловая производительность единицы поверхности фронта горения ( $\text{ккал/м}^2 \text{ сек}$ ) остается, как только что было разъяснено, по-стоянной \*\*. Но вместо одного вытянутого конуса пламени с до-статочно развитой поверхностью, соответствующей данной производительности горелки, можно создать несколько мелких конусов, общая поверхность которых будет равна поверхности большого конуса, и такой суммарный объединенный фронт обе-спечит ту же производительность горелки, но с соответственно укороченным пламенем. Примерно это укорочение пламени будет пропорционально корню квадратному из числа конусов, т. е. замена одного конуса четырьмя укоротит длину пламени в 2 ра-

\* Как мы уже знаем, вытягивание конуса произойдет за счет увели-чивающейся скорости сноса  $C_2$ , что уже иллюстрировалось схемами в и г фиг. 40.

\*\* Если не изменилось качество смеси, например избыток воздуха или температура предварительного подогрева.

за, девятью — в 3 раза и т. д. Прием этот иллюстрируется схемами *з* и *и* фиг. 40.

Если в устье трубки расположить слой сильно пористого огнеупорного материала, то на выходе его окажется целая сеть мельчайших отверстий, близко расположенных друг к другу. Если горючую смесь пропустить через такую пористую насадку, поджечь и дожидаться ее окончательного прогрева, то множество таких мельчайших горелок создаст соответствующее количество мельчайших конусков, отдельно неразличимых для глаза и сливающихся в один тонкий огненный покров. В свое время это дало повод некоторым авторам неудачно назвать такой способ сжигания «беспламенным». Такое название скорее всего можно было бы присвоить процессам медленного окисления, о которых говорилось в начальных главах. В рассматриваемом же случае мы имеем дело с короткопламенным процессом, возникающим по двум основным причинам: 1) благодаря развитию суммарной поверхности фронта горения за счет огромного количества мельчайших канальцев пористой насадки и 2) вследствие высокого предварительного прогрева горючей смеси внутри этой раскаленной насадки, вызывающего, с одной стороны, ранее воспламенение смеси еще до ее выхода из устьев канальцев, а с другой стороны, — значительный рост скорости распространения пламени. Такой эффект приводит как бы к частичному втягиванию пламени внутрь пористой насадки.

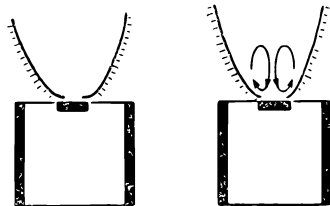
Грубым примером подобного частичного втягивания начальных участков фронта пламени может служить трубчатая горелка, в которой вместо холодных краев металлической трубки имеется огнеупорная керамическая вставка. Раскаляясь от непосредственного воздействия пламени, она вместо обычного охлаждения наружной части потока, вызываемого отводом тепла по металлу, начнет дополнительно подогревать начальные краевые участки горючей смеси, что приведет, как мы знаем, к увеличению скорости распространения пламени, которая по величине станет больше местной поступательной скорости потока, попрежнему заторможенной как стенками трубки, так и самой трубчатой вставки. При этом как понятно, произойдет «проскок» пламени внутрь горелки и начало фронта пламени установится на такой глубине горелки, где смесь еще не успевает чрезмерно прогреться и где снова обе встречные скорости — поступательная скорость потока и скорость распространения пламени — уравновесятся\*.

---

\* Здесь уместно, кстати, отметить, что предварительный прогрев горючей смеси в состоянии увеличивать скорость распространения пламени до таких величин, при которых она способна осуществить прямое и полное уравновешивание даже наибольшей поступательной скорости потока, которая возникает, как мы знаем (фиг. 19 гл. 6), в самом центре потока смеси при покойно-струйчатом (ламинарном) его течении. В самом деле, центральные участки потока при конусообразном пламени вступают в процесс последни-

### 3. ОБРАТНЫЙ ТОК ГОРЮЧИХ ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ — ОТЛИЧНЫЙ ПОДЖИГАТЕЛЬ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ

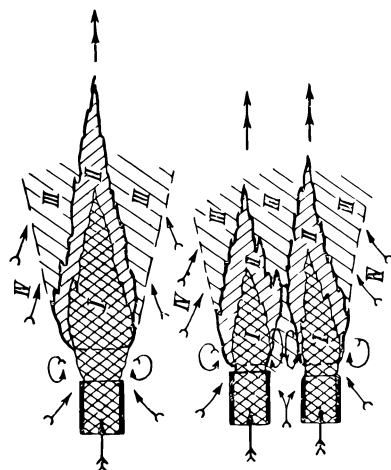
Вернемся на время к случаю торможения потока путем введения в него плохо обтекаемого тела, например пластины, помещенной в центре устья трубчатой горелки (фиг. 41, *а* и *б*). При достаточно умеренных скоростях омывающего пластину потока в кормовой части этой пластины не возникает сколько-нибудь заметного обратного вихря, о котором говорилось в гл. 7 (см. фиг. 28). Устойчивость зажигания потока горючей смеси обеспечивается в этом случае возникновением у кромок пластины небольшой зоны прямого уравнивания встречных скоростей потока и распространения пламени. Оно и поддерживает существование неустойчивого косоугольного фронта пламени в виде обращенного конуса. При переходе же на хаотическое движение потока при достаточно больших скоростях зона прямого уравнивания исчезнет, однако трубка с такой пластиной может и не потерять способности оставаться горелкой, т. е. способности удерживать около себя фронт горения. Это произойдет



*а* — зажигательное кольцо около пластинки, поставленной поперек потока и затормаживающей около себя ламинарный поток горючей смеси.

*б* — возврат (циркуляция) высокотемпературных газов, пожигающих горючую смесь при беспорядочном (турбулентном) течении потока.

Фиг. 41. Самоподжигание готовой горючей смеси.



Фиг. 42. Диффузионные факелы топливного газа, горящего в воздухе.

*I* — зона чистого топливного газа; *II* — зона смеси топочных газов с топливным газом; *III* — зона смеси топочных газов с воздухом; *IV* — воздушная атмосфера.

в том случае, если возникший при таком режиме течения обратный вихрь, о котором говорилось в гл. 7, вернет к устью горелки достаточное количество высокотемпературных газов (продуктов сгорания), которые смогут обеспечить, как и всякое раскален-

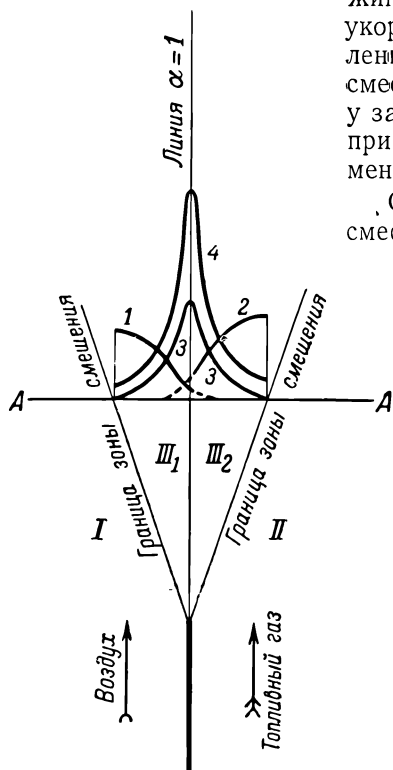
ми, настолько сильно прогреваясь при подходе к вершине конуса, где они, наконец, сгорают, что в этом участке (во всяком случае в его центральной точке) имеет место прямое уравнивание обеих встречных скоростей. Именно только этим обстоятельством можно объяснить скругленную вершину возникающего конусного пламени при горении готовой горючей смеси (фиг. 40, схема *в*).

ное тело, непрерывное поджигание неустойчивого косо́го фронта горения, а следовательно, и его непрерывное существование. Приемом такого рода в настоящее время пользуются и в технике факельного сжигания жидкого и пылеобразного твердого топлива. В этих случаях возврат части тепла сгоревших газов весьма способствует протеканию подготовительных газификационных процессов, предшествующих воспламенению. При сжигании газа, состоящего из сложных органических молекул, такая вихревая циркуляционная зона также становится активной зоной предварительной тепловой переработки — «газификации» газа до такого неустойчивого состояния расщепленных или предварительно окислившихся молекул первичного газа, при котором они уже в состоянии вступить в окончательный процесс образования молекул полного окисления ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Однако для того чтобы возврат горячих газов к устью горелки был достаточно интенсивен, необходимы особые мероприятия, о которых мы поговорим в своем месте.

Устье трубки может служить горелкой и в случае организации смесеобразующего факела, когда сгорание газа происходит в воздушном пространстве при вытекании в него топливного газа и по мере образования горючей смеси при этом (фиг. 42). Замедленный процесс смесеобразования приводит в таких случаях к значительному удлинению факела по сравнению со случаем сжигания в трубчатой горелке готовой горючей смеси. Если в воздушное пространство втекает холодный топливный газ, то при его поджигании фронт воспламенения может установиться на сравнительно далеком расстоянии от устья горелки. Однако если рядом работает несколько горелок с небольшими расстояниями между ними, то зона воспламенения может приблизиться к устью трубок за счет возвратного вихря горячих сгоревших газов, возникающего между каждыми двумя соседними горелками вследствие подсасывающего действия вытекающих из трубок струй. При одиночной горелке к корню факела подсасывается окружающий холодный воздух, который, пока он сам не прогреется, оказывает отрицательное воздействие на начало воспламенения, так как является источником холода. При непосредственном же соседстве двух или нескольких горелок к корню факела удается привлечь часть горячих сгоревших газов, являющихся источником тепла и могущих при известных соотношениях обеспечить более раннее, сравнительно с предыдущим случаем, поджигание образующейся смеси, а также более интенсивное прожекание предварительных «газификационных» процессов, требующих затраты тепла. Понятно, что такое положительное тепловое воздействие в первую очередь испытывают на себе центральные факелы, защищенные от излишнего охлаждения краевыми, наружными факелами, работающими в этом отношении в худших условиях.

Однако воздействие соседних факелов друг на друга может оказаться в известных случаях и отрицательным, если таким со-

седством ухудшается подвод воздуха к затесненным центральным факелам. В этом случае вместо обеспечения раннего поджигания (и как следствие некоторого укорочения факелов) окажется замедленным процесс образования горючей смеси вследствие недостатка воздуха у затесненных факелов, что немедленно приведет к резкому вытягиванию пламени.



Фиг. 43. Упрощенная схема зоны смешения топливного газа с воздухом. Распределение кислорода, топливного газа, продуктов сгорания и температуры в поперечном сечении потока А—А.

Зона I — поток воздуха; зона II — поток топливного газа; зона III<sub>1</sub> — смесь воздуха с продуктами сгорания; зона III<sub>2</sub> — смесь топливного газа с продуктами сгорания.

1 — падение содержания кислорода в зоне смешения III<sub>1</sub> (слева направо); 2 — падение содержания топливного газа в зоне смешения III<sub>2</sub> (справа налево); 3 — рост и падение содержания продуктов сгорания в зонах смешения (с наибольшим значением содержания на линии расчетного соотношения топлива и воздуха); 4 — рост и падение температуры (с наибольшим значением на линии расчетного соотношения).

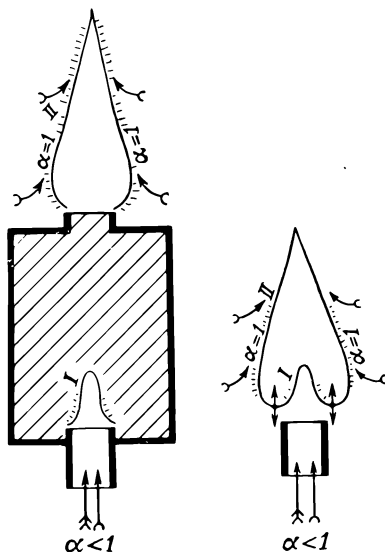
Способность трубчатых горелок со смесеобразующими факелами (за счет окружающего воздуха, в который втекает топливный газ) удерживать пламя около своего устья в основном объясняется тем, что в зоне смешения воздуха с газом, в которой состав смеси постепенно меняется от чистого воздуха по краям до чистого топливного газа в центре струи, всегда найдется и такой участок смеси, который будет соответствовать наилучшим условиям воспламенения при определенной температуре этой смеси, постепенно прогреваемой по мере приближения к фронту горения. На фиг. 43 дана упрощенная схема образования зон смешения воздуха, топливного газа и продуктов сгорания, на которой видно, как постепенно падает со стороны воздуха содержание кислорода в зоне III<sub>1</sub> и топлива со стороны потока топливного газа в зоне III<sub>2</sub> при подходе их к линии расчетных соотношений ( $\alpha \approx 1$ ), где они соединяются с образованием молекул полного сгорания. Понятно, что на этой линии расчетных соотношений при ходе реакции горения будет возникать наибольшая концентрация продуктов сгорания и отсюда они будут распространяться с постепенно падающим содержанием их в смеси в обе стороны: в сторону

чистого воздуха и в сторону чистого газа. Кривая температуры такой тройной смеси, как понятно, будет подобна кривой изменения содержания продуктов сгорания с вершиной на линии расчет-

ных соотношений, на которой происходит выделение тепла, постепенно распределяющегося по всей смеси. Таким образом, падение содержания как кислорода, так и топлива по мере приближения их к фронту горения (линии расчетных соотношений) сопровождается постепенным прогреванием, т. е. активизацией молекул кислорода и топлива перед возникновением соприкосновения между ними и вступлением их во взаимную реакцию горения.

При спокойно-струйчатом втекании топливного газа в окружающий воздух расстояние между установившимся фронтом воспламенения и устьем горелки будет определяться, с одной стороны, постепенным торможением втекающей в воздух расширяющейся струи газа, а с другой — степенью охлаждающего воздействия холодной горелки на образующуюся смесь. В том месте, где оба эти фактора приведут к равенству поступательной скорости образующейся смеси и характерной скорости распространения пламени, и возникнет устойчивый уровень воспламенения.

Во многих случаях трубчатые горелки работают по смешанному принципу: через них пропускается горячая смесь с явным недостатком воздуха, а нехватка воздуха пополняется, в дальнейшем, из окружающей атмосферы. В этом случае образуются два фронта горения (фиг. 44): первый — конусообразный, характерный для горения готовой однородной горючей смеси (располагается внутри факела) и второй — внешний и значительно более вытянутый, характерный для смесеобразующего (диффузионного) факельного горения. В первом конусообразном фронте сгорает та часть готовой горючей смеси, которая использует весь наличный «первичный» кислород этой смеси, недостаточный для полного выгорания всего топливного газа. Во втором фронте догорает весь свободный остаток топливного газа, для которого нехватило кислорода в самой горючей смеси. Догорание это, как и во всяком смесеобразующем факеле, происходит за счет «вторичного» смесеобразования при помощи кислорода окружающей воздушной среды. Так как такое смесеобразование, как мы знаем, происходит сравнительно замедленно, то вторичный фронт горения получает вытянутый характер и притом тем



Фиг. 44. Два фронта горения.  
 I — фронт горения готовой горючей смеси при недостатке воздуха; II — фронт диффузионного горения; недожженный газ горит в окружающем воздухе, откуда поступает к фронту горения воздушный кислород.

более вытянутый, характерный для смесеобразующего (диффузионного) факельного горения. В первом конусообразном фронте сгорает та часть готовой горючей смеси, которая использует весь наличный «первичный» кислород этой смеси, недостаточный для полного выгорания всего топливного газа. Во втором фронте догорает весь свободный остаток топливного газа, для которого нехватило кислорода в самой горючей смеси. Догорание это, как и во всяком смесеобразующем факеле, происходит за счет «вторичного» смесеобразования при помощи кислорода окружающей воздушной среды. Так как такое смесеобразование, как мы знаем, происходит сравнительно замедленно, то вторичный фронт горения получает вытянутый характер и притом тем

значительнее, чем больший недостаток воздуха оказался в первичной смеси, подаваемой через горелку. Оба эти фронта по мере уменьшения порции воздуха в первичной смеси постепенно сближаются друг с другом, пока, наконец, при полном прекращении подачи воздуха в первичную смесь не сольются в единый фронт смесеобразующего факельного горения, т. е. горения по чисто диффузионному способу. При смешанном двухфронтальном факельном горении поджигательное кольцо, обеспечивающее устойчивое расположение обоих фронтов горения, возникает совершенно так же, как это имеет место и при конусообразном фронте горения готовой однородной горючей смеси. Здесь при малых форсировках, т. е. при спокойно-струйчатых режимах течения горючей смеси, всегда образуется небольшой участок прямого полного уравновешивания встречных скоростей\*.

#### 4. ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОЧАГ ГОРЕНИЯ

Из всего, что мы уже успели сказать о свойствах горелок, вытекает, что горелкой является именно такой прибор, который обладает свойством образовывать устойчивый очаг горения, обеспечивая соблюдение всех трех условий, необходимых для его существования, о которых говорилось в конце гл. 2. Она создает непрерывное питание очага горения топливом и окислителем и, что особенно существенно, обладает способностью в известных пределах удерживать на месте (стабилизировать) фронт воспламенения горючей смеси, которая либо подается через нее в готовом виде, либо начинает образовываться около ее устья, если топливо и окислитель (воздух) подводятся к очагу горения раздельно в несмешанном виде.

Для осуществления процесса горения, в сущности, достаточно наличия лишь самой горелки и некоторого свободного пространства, в котором этот процесс, начавшийся на фронте начального воспламенения, мог бы развиваться и завершиться с удовлетворительной полнотой. Если это пространство находится в открытой воздушной среде (свободное горение в неограниченной воздушной атмосфере), то среда эта может быть использована

---

\* Как это показано на одной из схем фиг. 44, возможно искусственное отдаление второго (диффузионного) фронта от первого (кинетического). Для этой цели продукты неполного сгорания первичной смеси, содержащие остатки топливного газа, на которые нехватило первичного кислорода, не сразу выпускаются в атмосферу, а предварительно проходят через плотную камеру с двусторонним застеклением (для наблюдения за размерами и формой первичного фронта горения, располагающегося в этой камере). В верхней части этой камеры делается трубчатый выход, через устье которого и удаляются горячие продукты сгорания с недогоревшим топливом, входя, наконец, в соприкосновение с окружающим воздухом и образуя с ним вторичную горючую смесь, тут же воспламеняющуюся, если ее температура достаточно высока.

как основной или добавочный источник кислорода в тех случаях, когда последний притекает из подающих органов горелки в недостаточном количестве. В тех же случаях, когда горелка снабжает очаг горения вполне достаточным количеством окислителя, горение может происходить и даже полностью завершаться в пространстве, заполненном совершенно инертной средой (инертный газ, вода и т. п.), но при условии непрерывного удаления образующихся в очаге горения продуктов сгорания и достижения такого теплового равновесия в зоне горения, при котором расходование тепла на неизбежные внешние тепловые потери не вызывает чрезмерного падения температуры в самом процессе.

Здесь мы подходим к очень важному для топочной техники вопросу о воздействии на очаг горения окружающей его внешней среды и расположенных в непосредственной близости от этого очага источников холода (или тепла).

Если, например, очаг горения открыто расположен в непосредственно окружающем его воздушном пространстве, то он неизбежно окажется под воздействием ряда посторонних, внешних, иногда совершенно случайных факторов. Из них наиболее часто встречающимися и действенными являются:

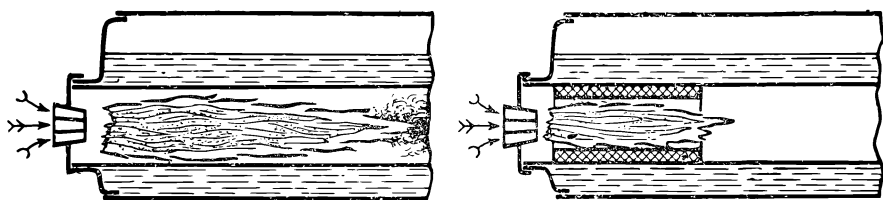
1) потоки воздуха, возникающие независимо от очага горения (ветер, сквозняки и т. п.);

2) потоки тепла, возникающие вследствие резкой разницы в температурах: высокой — в самом очаге горения и низкой — в окружающей среде и расположенных в ней холодных телах.

Воздействия таких факторов, разнообразные по характеру, осуществляемые порознь или вместе, могут оказаться губительными для очага горения, если они направлены на его наиболее уязвимые места.

Первым таким уязвимым местом, как мы уже знаем, является обычно небольшая (по сравнению с размерами всего очага горения) зона непрерывного поджигания горючей смеси. Жизнеспособность любого очага горения будет зависеть от того, имеются ли в нем скрытые, достаточно *защищенные* от внешнего воздействия устойчивые зоны поджигания, обладающие необходимой теплопроизводительностью. Если естественным порядком или какими-либо сознательными искусственными мероприятиями, подобными тем, о которых уже говорилось в настоящей главе, устойчивость первичной поджигательной зоны оказалась обеспеченной, если, иначе говоря, первичному огоньку дали вырасти и окрепнуть, то ему уже не страшны даже грубые внешние воздействия набегающих на него холодных масс постороннего воздуха. Наоборот, при известных условиях и избытке горючего материала потоки воздуха, набегающие на возникший достаточно устойчивый очаг горения могут даже весьма существенно способствовать его дальнейшему укреплению и развитию по размерам и производительности<sup>38</sup>.

В такой же мере хорошо развитый, теплопроизводительный очаг горения окажется в состоянии противодействовать вредному воздействию окружающих его холодных тел (например, холодных стенок котла) (фиг. 45,а), если они отвлекают на себя выделяемое при горении тепло в количестве, уже недостаточном, чтобы снизить температуру очага до опасного уровня. Такой очаг с избыточным тепловыделением, способным обеспечить его собственные тепловые нужды, необходимые для поддержания устойчивости первичной поджигательной зоны, нередко сознательно окружают холодными поверхностями теплообменников, чтобы наиболее эффективно использовать интенсивный лучистый тепло-



а — газовая горелка в холодной трубе. б — газовая горелка в утепленной трубе.

Фиг. 45. Топка с газовой горелкой в холодной и утепленной жаровой трубе парового котла.

обмен между пламенем и воспринимающими тепло поверхностями нагрева, как это издавна делается, например, в жаротрубных котлах (фиг. 45). Жаровая труба такого котла, омываемая снаружи кипящей водой, представляет собой весьма холодную топку, так как температура стенок, воспринимающих от пламени лучистое тепло, несравненно ниже температуры самого пламени. В такой топке может существовать только хорошо организованный и достаточно производительный очаг горения. Чем меньше диаметр жаровой трубы, тем меньше становятся и поперечные размеры пламенного факела, тем глубже он «промерзает» от окружающего его холода. При очень малых диаметрах труб устойчивость факельного горения совершенно теряется, и оно становится неосуществимым без специальных добавочных мероприятий.

Одним из простейших мероприятий, к которому в этих случаях прибегают, если это позволяют размеры жаровой трубы, является некоторое утепление чрезмерно холодной топки. В целях обеспечения устойчивого поджигания горючей смеси в этих случаях в топке размещают огнеупорные теплоемкие детали в виде стенок, козырьков и тому подобные тела, которые, раскаляясь, служат надежной зажигательной зоной пламенного процесса. Однако в таких переохлажденных топочных пространствах приходится сталкиваться с другой уязвимой стороной любого очага горения, особенно ярко проявляющейся в факельных процессах, — неспособностью переохлажденного очага горения, даже

при достаточно устойчивом поджигании, довести процесс до полного выгорания топлива. В хвосте факела, наименее теплопроизводительном \* и потому наиболее охлажденном, процесс горения не в состоянии завершиться, и топка начинает выдавать продукты неполного сгорания ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и т. п., а при жирном топливе — и копоть). Чтобы избавиться от такого отрицательного результата, приводящего прежде всего к непроизводительному перерасходованию топлива, необходимо рабочее пространство зоны горения обеспечить той степенью «утепления», которая окажется уже достаточной для поддержания необходимого температурного уровня, при котором процесс сможет полностью завершиться. Примером такого «утепления» может служить фиг. 45,б, на которой показано вставленное в жаровую трубу огнеупорное кольцо. Если оно достаточно развито по длине факела, последний, резко сокращаясь по протяженности вследствие более активного протекания процесса, может практически уложиться в этой «горячей» зоне, обеспечив устойчивую поджигания и полное тепловыделение.

Начальное зажигательное кольцо малых размеров и частичная футеровка огнеупором рабочего топочного пространства — мероприятия, по существу разные и преследующие разные цели, хотя они осуществляются одинаковыми средствами и для простоты могут быть объединены, как это и показано на фиг. 45,б. На двух схемах этой фигуры показано, как в чрезмерно охлажденной жаровой трубе (схема а) фронт воспламенения отходит от устья горелки, пламя вытягивается и факел в конце выделяет копоть и как при наличии частичного, но достаточного утепления и достаточной близости огнеупорной футеровки к устью форсунки фронт воспламенения приближается к устью горелки, а факел резко укорачивается и перестает дымить.

Теперь вырисовывается роль топочной камеры, назначением которой являются развитие и завершение процесса горения, начинающегося на фронте воспламенения и заканчивающегося в пределах этой топочной камеры, которой приходится придавать надлежащие размеры и конфигурацию. Открытое, свободное горение в воздушной среде является целесообразным только для узко специализированного применения (примитивные приборы для освещения, промышленные и лабораторные горелки, паяльные лампы с частичным ограждением, кухонные и другие нагревательные очаги). Для эффективного использования получающихся в топке высокотемпературных топочных газов, применяемых для теплообменных, а теперь и силовых установок<sup>39</sup>, как сам топочный процесс, так и эти газы следует не только оградить от отрицательных внешних воздействий, но и надлежащим образом направить к месту потребления, по возможности без

---

\* Надо вспомнить характер распределения температур в факеле, о котором говорилось в гл. 8.

существенного снижения их первоначального температурного уровня. Даже в тех случаях, когда, такое снижение требуется самим потребителем (огневые сушила, печи пищевой промышленности, газотурбинные установки и т. п.), такое искусственное снижение температурного уровня топочных газов должно осуществляться без вреда для протекания процесса в самом очаге горения, условия работы которого должны сохраняться возможно более благоприятными в пределах применяемых нагрузок топочного устройства. С этой целью добавочный («третичный») воздух\* смешивается с топочными газами уже за пределами зоны горения, чтобы не снизить в ней преждевременной балластной добавкой необходимый для полного сгорания топлива температурный уровень.

Таким образом, топочная камера предназначена для создания наиболее благоприятных условий, необходимых для эффективного протекания процесса горения в смысле теплопроизводительности в единицу времени (час) и полноты тепловыделения. А такой результат должен обеспечиваться не только хорошей горелкой (или несколькими горелками), но и хорошо организованным развитием смесеобразовательного процесса в самой камере горения при поддержании в ней достаточно высокого температурного уровня всего процесса в целом. Последний, как мы уже неоднократно видели на ряде примеров, зависит от допущенного в процессе среднего избытка воздуха и степени охлаждения топочной камеры, по стенам которой можно располагать лучевоспринимающие поверхности нагрева. В силу сказанного важнейшими характеристиками всякой топки, представляющей собой сочетание системы горелок с топочной камерой, являются:

1) часовая теплопроизводительность и пределы устойчивого изменения этой производительности регулировкой подачи топлива и воздуха; эти характеристики следует, в основном, отнести к свойствам применяемых горелок;

2) степень полноты тепловыделения, средний конечный избыток воздуха и средняя конечная температура топочных газов, покидающих топку; эти характеристики следует отнести, в основном, к качеству работы топочной камеры. Существенно, конечно, и взаимодействие между камерой и горелками, которое при известных сочетаниях может быть отрицательным или положительным для итоговых характеристик топки.

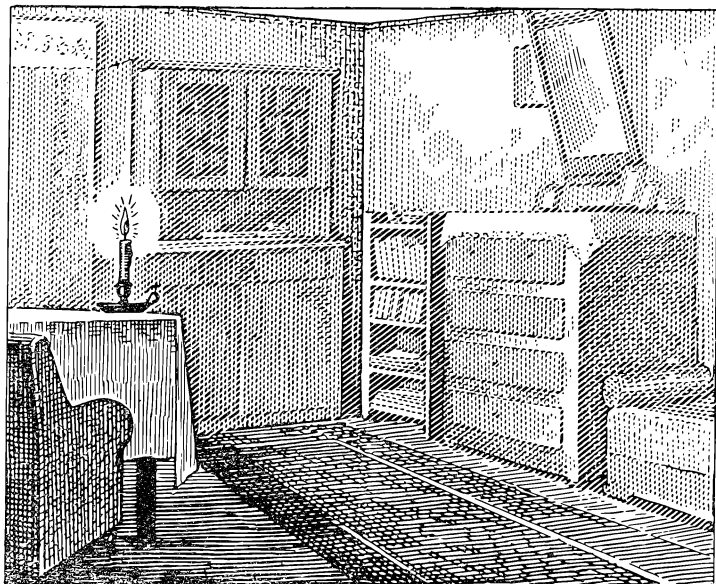
## 5. ТОПОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ЯВЛЯЕТСЯ СОЧЕТАНИЕМ СИСТЕМЫ ГОРЕЛОК С ТОПОЧНОЙ КАМЕРОЙ

Не всякое сочетание горелки и топочной камеры было бы справедливо именовать топочным устройством. Так, свеча, горящая в комнате, хотя и представляет собой своеобразную горелку

---

\* Или какой-нибудь другой балластный газ, например, водяные пары.

ку, огражденную стенами комнаты от случайных чрезмерно грубых воздействий наружной атмосферы, еще не составляет в сочетании с комнатой даже примитивного топочного устройства (фиг. 46). Топочное устройство, как правильное понятие, начинает вырождаться с того момента, когда размеры топочной камеры не могут быть оправданы ничтожной (или наоборот, чрезмерной) производительностью применяемой горелки, и надо ожидать отрицательного влияния их друг на друга. Так, во взятом нами примере, помимо слабой циркуляции теплых и холодных газов в комнате, вызываемой работой свечного факелка,



Фиг. 46. Свеча, горящая в комнате.

всегда можно ожидать возникновения независимых от этого организованного движения грубых посторонних перемещений воздушных потоков (сквозняки, резко открываемая или закрываемая дверь, быстрые движения людей и т. п.) и даже независимого от горения свечи неблагоприятного изменения состава воздуха (другие, более производительные открытые очаги горения, большое скопление людей на долгое время и т. п.).

Значительно ближе к рациональному понятию о топочном устройстве оказывается сочетание той же свечи со старинным садовым подсвечником, снабженным для защиты от ветра специальным стеклянным колпаком (фиг. 47). В этом случае к топочному устройству нас приближает как само соотношение размеров очага горения и «топочного пространства» в виде небольшого, обычно сферической формы колпака, так и вполне

разумное направление возникающего внутри него всего газоводушного потока в целом (воздух поступает снизу через специальные небольшие отверстия в непосредственной близости к очагу горения, «топочные газы» удаляются сверху через суженное до умеренных размеров отверстие \*). Достаточно удовлетворительные соотношения между «горелкой» и «топочной камерой» в рассматриваемом случае сразу же сказываются и на итоговых качественных и количественных характеристиках осуществляемого процесса, делая их по крайней мере сопоставимыми с аналогичными характеристиками промышленных топочных устройств. Например, избыток воздуха, движущегося в комнате при ничтожном расходе топлива (в единицу времени) в горячей свече (фиг. 46), будет бесконечно большим, в то время как при умеренных размерах свечного колпака и приторможенной подаче воздуха через нижние отверстия (фиг. 47) итоговый, конечный избыток воздуха не будет превышать необходимого расчетного соотношения более, чем в 4—5 раз.

Дальнейшее уменьшение избытка воздуха для такого устройства вполне возможно за счет еще большего притормаживания подачи, но нецелесообразно, так как следует позаботиться о достаточном охлаждении стекла. Это охлаждение достигается за счет холостого хода воздуха, движущегося в стороне от очага горения и непосредственно омывающего стекло. Этот защитный слой воздушного потока, не вступающий непосредственно в процесс горения и участвующий в какой-то мере в последующих стадиях смесеобразования, сам имеет весьма умеренные температуры, что существенно для снижения температуры стекла \*\*. В связи с умеренными избытками воздуха «топочные газы», покидающие колпак садового подсвечника, обладают сравнительно высокой температурой, в то время как горящая в комнате свеча не в состоянии сколько-нибудь заметно нагреть комнатный воздух. С еще большим правом «топочным устройством» можно назвать сочетание горелки керосиновой лампы с раздутием лампового стекла, которое представляет собой «топочную камеру» \*\*\*. При хорошем фитиле свеча представляет собой неплохую осветительную горелку, способную обеспечить не только устойчивый фронт пламени, но и достаточную полноту сгорания в спокойном воздухе. Однако она не имеет никаких регулировочных средств и осуществляет пламенный процесс на единственном свойственном ей режиме, зависящем в смысле теплопроизводительности, в основном, от качества и толщины фитиля.

---

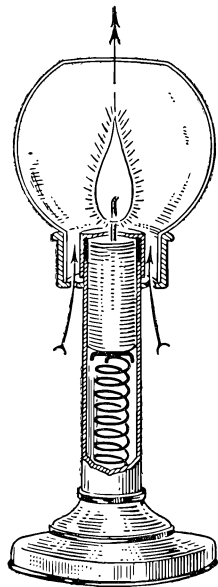
\* Иногда для еще большей защиты от ветра и дождя это выходное отверстие перекрывается металлическим колпачком с боковыми отверстиями для выхода газа.

\*\* Прием охлаждения стенок топочной камеры, если они недостаточно огнеупорны, при помощи защитных слоев воздуха, непосредственно не участвующих в огневом процессе, весьма нередко применяется и в промышленных топочных устройствах, что особенно охотно делается в сильно форсированных топочных устройствах того или иного специального назначения.

\*\*\* Верхняя цилиндрическая часть стекла служит тяговой трубой.

Горелка керосиновой лампы более совершенна не только по количеству излучаемого света, но и тем, что в ней предусмотрена регулировка величины рабочей части фитиля, на которой происходит испарение керосина. Необходимое для этого тепло доставляется отчасти излучением переднего, нижнего края пламени, который «видит» фитиль, а главным образом — горячим металлическим грибком, воспринимаящим тепло непосредственно от пламени. Именно этот горячий грибок и создает зону теплового разложения топливных молекул, вступающих в смесеобразование с воздухом. Тут же, около верхней части грибка, где смесь достигает необходимой пропорции между топливом и воздухом и успевает при этом прогреться до соответствующей, достаточно высокой температуры, возникает первичный фронт воспламенения (равновесие скоростей подачи смеси и воспламенения), т. е. осуществляется основная задача всякой горелки. Затем продолжается развитие процесса смесеобразования, совершенство и интенсивность которого, в основном, зависят от свойств приданной горелке топочной камеры, в данном случае — размеров и очертания раздутой части лампового стекла. Без стекла пламя держится на горелке, но развитие процесса идет вяло, неорганизованно и не завершается полным сгоранием. Стоит надеть стекло и подрегулировать фитиль, чтобы картина резко изменилась: пламя принимает совершенно определенные очертания, достигает необходимой яркости, и процесс горения завершается с необходимой полнотой. Все это свидетельствует о значительном усилении скорости смесеобразования, а следовательно, и сгорания и о развитии в связи со всем этим высокой температуры в очаге горения<sup>40</sup>.

Такую ускоренность и строгую организованность процессу смесеобразования придает направление воздушного потока, набегающего снизу на зону смесеобразования. Существенную роль играет здесь сужение стекла, принуждающее воздушный поток прижиматься к зоне смесеобразования, возникающей около грибка, и активно вмешиваться в процесс образования горючей смеси. Весьма важно, чтобы профиль раздутия (при данной тяговой силе цилиндрической части стекла) соответствовал профилю грибка: при неудачном сочетании их очертаний процесс расстраивается. Здесь сказывается необходимое взаимодействие между горелкой и топочной камерой, которые через это взаимодействие придают друг другу новые качества и при рациональ-

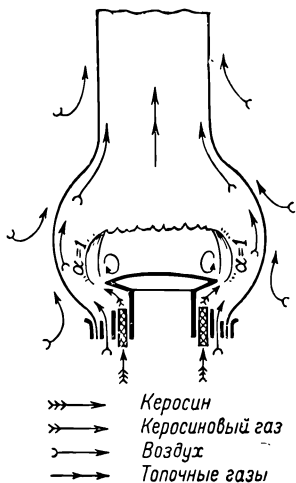


Фиг. 47. Садовый свечной фонарь.

ных формах и сочетаниях повышают общие итоговые характеристики процесса.

Пример с керосиновой лампой представляется нам особо поучительным, так как прибор этот, практически знакомый любому читателю, в малом масштабе, но с большой наглядностью поясняет все наиболее специфические особенности организации топочного процесса со смесеобразующими факелами.

В топочном устройстве факельного типа нередко трудно различить вследствие их взаимодействия, где кончается горелка, а где начинается приданная ей топочная камера. Чаще всего в грубовато сконструированных промышленных топках это происходит вследствие несовершенства самой конструкции топки, нередко вызванного упрощенными представлениями о сущности протекающего в ней процесса. Еще до сих пор при конструировании топков за отсутствием достаточной полноценно развитой теории горения промышленных топлив ставка бессознательно делается на исключительную жизнеспособность процессов горения, охотно протекающих в пределах воздушной атмосферы даже при соблюдении наименьших, иногда мало удовлетворительных требований. Понятно, что в этих случаях и технические итоговые характеристики процесса оказываются мало удовлетворительными: топочное устройство не обеспечивает достаточной полноты тепловыделения вследствие недожога топлива, выдает топочные газы с чрезмерными избытками воздуха и неравномерным распределением температуры вследствие несовершенства процесса смесеобразования, обладает узкими пределами устойчивых и экономичных нагрузок

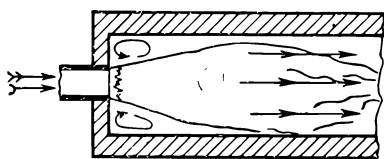


Фиг. 48. Горелка керосиновой лампы.

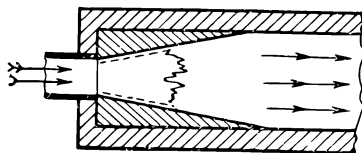
Тюльпанообразный факел сменяющегося пламени, образующийся в зоне смешения газифицированного керосина с воздухом. Стекло охлаждается не только снаружи возникающей около него циркуляцией комнатного воздуха, но и изнутри потоком избыточного воздуха, не участвующего в смесеобразовании и движущегося непосредственно около самого стекла.

по теплопроизводительности, т. е. относительно плохо регулируется или, наконец, не в состоянии вести бесперебойный процесс, не обеспечивая эксплуатационной надежности в работе. Тщетно было бы искать спасения от известных трудностей топочной техники в отходе от смесительного принципа сжигания, образовании готовой газообразной смеси до поступления ее в горелку. Прием этот обладает ограниченной целесообразностью и действительно эффективен в случаях применения только газообразного топлива и при сравнительно скромных удельных нагрузках. Достижение устойчивого процесса горения готовой горючей смеси, как мы видели, возможно либо при малопроизводитель-

ном спокойно-струйчатом течении смеси, либо при наличии огнеупорной высокопористой насадки, которая сама сохраняет достаточно длительную работоспособность при сравнительно умеренных форсировках, не вызывающих чрезмерного повышения ее температуры. При больших удельных теплопроизводительностях переходят к применению так называемых туннельных горелок, на примере которых легко понять, что мы снова вынужденно возвращаемся к задаче о рациональном сочетании «горелки» и «топочной камеры». На схемах фиг. 49 показано, что «туннельная горелка»



а — устойчивое зажигание за счет возврата (циркуляции) части высокотемпературных газов.



б — неустойчивое зажигание при отсутствии организованного возврата высокотемпературных газов (празднена зона циркуляции топочных газов).

Фиг. 49. Схема туннельной горелки.

на самом деле представляет собой сочетание трубчатой \* горелки с топочной камерой небольших размеров, роль которой играет сам туннель. Трубчатая горелка, в которую поступает готовая газообразная горючая смесь, должна обеспечить устойчивый фронт воспламенения, что как мы видели в начале этой главы, возможно лишь при весьма умеренных скоростях вытекания смеси, т. е. при весьма умеренных нагрузках. Однако ей на помощь может прийти начальный участок камеры, если придать ему рациональную конфигурацию. На фиг. 49,б изображен случай плавного перехода от сечения трубки к сечению туннеля. В этом случае при увеличении форсировки рассчитывают на раскаленное состояние кладки, усиливающее приток тепла к зоне поджигания. Однако, поскольку местоположение раскаленной части кладки само зависит от местоположения фронта воспламенения и может передвигаться вместе с ним, такое сочетание горелки с камерой достаточно быстро приводит к отдалению фронта воспламенения от устья трубки и потере устойчивости процесса.

Если же сознательно допустить внезапное расширение сечения у устья трубки, как это показано на фиг. 49,а, то фронт воспламенения заметно приблизится к устью трубки и весь процесс станет устойчивым даже при больших форсировках. Это можно объяснить только поджигающим воздействием обратных вихрей горячих продуктов сгорания, которые немедленно возникают

\* Сечение ее может быть круглым, прямоугольным или вообще произвольной формы.

вокруг струи вследствие отрыва ее от стенок в начальной части камеры, где эта струя еще не успела расшириться и заполнить все сечение туннеля. Тепловое воздействие раскаленных стенок туннеля на ускорение завершения процесса горения, начавшегося около устья трубки, представляется самоочевидным. Множество таких «туннельных топок», как их правильнее было бы называть, представляет собой систему, могущую достигнуть любой производительности, которая практически будет зависеть не столько от нужд потребителя, сколько от производительности источников получения топливного газа. Число горелок также по существу ничем не ограничено, так как разводка газа по любому числу точек потребления не представляет трудностей. Понятно из предшествовавших разъяснений, что совокупность этих маленьких туннельных «топок» создает общую топку наименьшей протяженности, что в случае надобности и может быть использовано для соответствующих разновидностей тепловых установок.

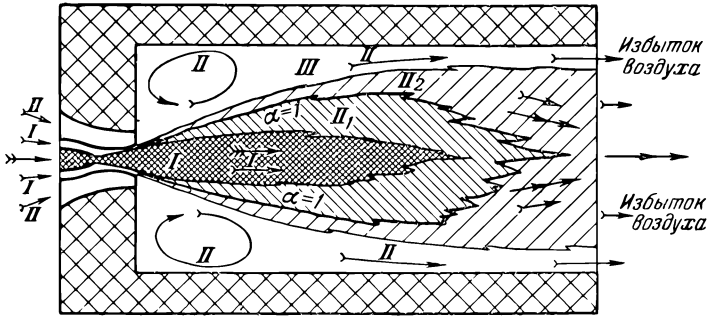
## 6. ПРИЕМЫ УСИЛЕНИЯ СМЕСЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

Широко распространенные в промышленной технике топки для газового топлива с факельным горением смесеобразующего типа \* обладают своими специфическими особенностями. Роль топочной камеры и удачного сочетания ее с горелками в удовлетворительном протекании процесса смесеобразования оказывается особенно существенной. Горелка смесительного типа выдает в камеру раздельно (или почти раздельно) потоки топливного газа и воздуха. В лучших случаях топливный газ выходит из устья горелки в смеси с некоторым количеством первичного воздуха (фиг. 50). Эта первичная горючая смесь, обладая умеренной суммарной теплоемкостью, требует на свой первоначальный прогрев сравнительно небольшого количества тепла. Таким способом обеспечивается сравнительно раннее начало воспламенения в непосредственной близости от устья, если в этот предварительный нагрев смеси не вмешиваются какие-нибудь достаточно сильные источники холода (холодные поверхности нагрева, расположенные в чрезмерной близости от устья горелки, холодные обратные потоки вторичного потока воздуха, циркулирующие около устья вследствие возникновения вихрей, как это показано на схемах фиг. 50). Зона воспламенения представляет собой, как мы знаем, зону устойчивого поджигания всей горючей смеси, образующейся в данном случае в самой топочной камере и движущейся к выходу из нее. Степень завершенности смесеобразования в пределах такой камеры а, следовательно, и полноты сгорания топлива будет зависеть от того, насколько данная го-

---

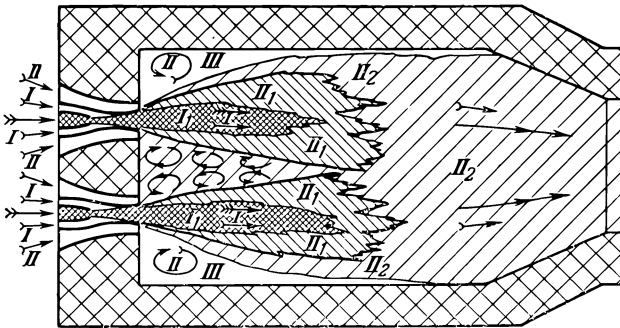
\* Главным образом вследствие способности поддаваться легкой регулировке в широких пределах изменения нагрузок, а отчасти и сравнительно большей безопасности из-за отсутствия закрытых объемов, заполненных взрывоспособной смесью.

релка (или система горелок) в состоянии распространить зону смесеобразования на все сечение топочной камеры еще до выхода потока из пределов последней. Если топочная камера чрезмерно велика по сравнению с сечением струи, вытекающей



*a* — открытый конец топочной камеры.

Третья (воздушная) зона свободно выдает избыточный воздух, не вошедший в процесс смесеобразования. Единичный факел плохо заполняет поперечное сечение топочной камеры.



*b* — зажатый конец топочной камеры.

Крайние слои воздуха принудительно вступают в общий процесс смесеобразования. Два (или несколько) факела хорошо заполняют сечение топки. Избыточный кислород, не успевший добраться до фронта горения, содержится в виде неиспользованного остатка в зоне  $II_2$ .

Фиг. 50. Источники избытка воздуха в топке.

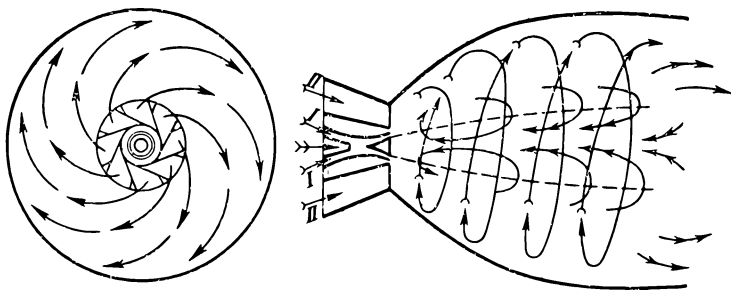
*I* — зона первичной горючей смеси;  $II_1$  — зона смеси топливного газа с продуктами сгорания;  $II_2$  — зона смеси воздуха с продуктами сгорания; *III* — зона чистого вторичного воздуха.

из горелки, и к тому же недостаточно поджата в выходном сечении, то крайние участки потока, не привлеченные к процессу смесеобразования и представляющие собой холостые слои вторичного воздуха, станут основным и значительным источником возникновения избытка воздуха в процессе, причиной крайней

неравномерности в составе и температуре газов, выдаваемых топкой, а также причиной снижения общей средней температуры этих газов. Таким образом, для более совершенного протекания процесса смесеобразования, от которого зависит качество работы топки, следует принять меры для устранения паразитических участков сечения топочной камеры или во всяком случае для интенсификации процесса смесеобразования, особенно в конечных участках топки. Следовательно, если на горелку падает обязанность начать процесс смесеобразования и создать устойчивую зону поджигания, то на присоединенную к ней камеру горения ложится обязанность завершения процесса смесеобразования, поддержания удовлетворительного температурного уровня и, как следствие, завершение процесса сгорания топлива с достаточной полнотой еще в пределах топочного объема. На схеме б фиг. 50 показано, что это может быть достигнуто сочетанием камеры того же сечения, что и на схеме а, с большим числом горелок меньшей производительности и более равномерно распределенных по сечению топки, что обеспечивает сокращение длины отдельных факелов и улучшает работу зоны поджигания за счет возникающих между горелками обратных токов высокотемпературных продуктов сгорания. Наконец, топочная камера заканчивается в этом случае значительным сужением, заставляющим краевые слои воздушного потока принудительно вступать в конечные стадии смесеобразования.

Ломаные очертания топочной камеры, понятно, не являются единственным доступным средством усиления смесеобразования в ее объеме. Значительно более эффективными, в случае надобности, могут оказаться аэродинамические средства в виде подачи части вторичного воздуха скоростными струями с боков камеры. В гл. 7 уже отмечалось, что смесеобразовательные процессы значительно ускоряются центрами местного возмущения потока. Таким первичным органом возмущения служит прежде всего сама горелка. Однако зона возмущения постепенно затухает по мере удаления потока от источника этого возмущения, а вместе с тем — замедляется и процесс выгорания топлива, причем зона горения начинает сильно вытягиваться вперед. Размещение добавочных центров возмущения в самом топочном пространстве в виде системы небольших плохо обтекаемых тел нецелесообразно из-за тяжелых температурных условий их существования. Энергичное вдувание вторичного воздуха в виде острых струй с большими начальными скоростями, обеспечивающими им достаточную «дальпобойность» при данных мощности и толщине основного потока газов, может организовать энергичное возмущение потока в той части камеры, в которой процесс смесеобразования проявляет склонность к затуханию. Смесеобразовательный процесс энергично идет только в том случае, если по сечению потока возникают слои с резко различными поступательными скоростями. Постепенно скорости эти выравниваются, даже если средняя общая скорость потока велика, и процесс

смесеобразования замедляется. Иногда думают, что закрученный поток особенно энергично ускоряет смесиобразование. Даже и в закрученном потоке скорости отдельных его слоев постепенно выравниваются, и процесс смешения этих слоев замедляется. Именно по этой причине и в закрученных потоках разделенные слои воздуха и газа могут остаться своевременно не перемешанными и двигаться параллельно друг другу с вялым смесиобразованием даже при больших скоростях. Таким образом, процесс смешения, склонный к естественному затуханию, следует в необходимых случаях вести по крайней мере двумя последователь-



Фиг. 51. Горение в закрученном потоке.

На окраине закрученного потока создается повышенное давление (повышенная плотность отброшенных к стенке камеры молекул). В сердцевинной части потока вследствие этого возникает пониженное давление (пониженная плотность молекул). Это приводит к созданию в средней части потока зоны циркуляции топочных газов. Высокотемпературные топочные газы (продукты сгорания) возвращаются в значительном количестве к корню факела и обеспечивают устойчивое поджигание вновь образующейся горючей смеси вблизи устья горелки.

Закрутка потока достигается установкой косых лопаток в кольцевом канале горелки, через который подается вторичный воздух.

ными ступенями: начинать у корня факела энергично смесиобразующей горелкой, а в его второй, хвостовой части активизировать смесиобразование добавочными средствами. В этом смысле, например, прямые потоки полезно закручивать во второй половине топочного объема соответствующим взаимным направлением струй, касательных к некоторой окружности вращения, а закрученные с самого начала потоки — раскручивать прямыми поперечными струями. От такого усложнения организации топочного процесса целесообразно отказываться лишь в тех случаях, когда нет прямой нужды в сокращении протяженности топочной камеры, когда развитие топочного объема даже предпочтается для размещения в нем значительного числа теплообменных поверхностей нагрева, как это делается, например, в современных котельных топках; когда, наконец, нет особой заинтересованности в достижении весьма значительной *равномерности* температуры по сечению потока на выходе из топки, которая существует, например, для работы газотурбинных установок.

Именно в топочных устройствах газотурбинных установок нередко применяется сильная первичная закрутка газовоздушного потока. Однако этот прием существенен не столько для усиления первичного процесса смесеобразования, необходимого для обеспечения весьма значительных тепловых нагрузок для топек этого типа, сколько для достижения устойчивого фронта воспламенения при больших поступательных скоростях газовоздушного потока. Достаточно быстро вращающийся поток газа энергично отбрасывает молекулы этого газа к стенкам камеры вращения, что приводит к увеличению плотности этого газа, а следовательно, и к росту давления в краевых слоях вращающегося потока. В то же самое время в центральной части такого потока возникает, как следствие, заметное уменьшение плотности молекул, а следовательно, и соответствующее понижение давления газа. Возникающая разность давлений вызывает появление вихря с обратным движением газа (фиг. 51). Когда топка разожжена, этот обратный вихрь доставляет к устью горелки мощную струю высокотемпературных газов, способствующую созданию устойчивого фронта воспламенения образующейся горючей смеси. Количество возвращаемого горячего газа в единицу времени окажется тем больше, чем сильнее закрутка потока.

---

## Глава десятая

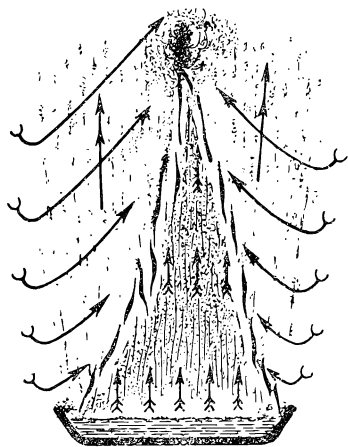
# ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

### 1. ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В СЛОЕ

Когда сжигание жидкого топлива принимает большие масштабы, как это имеет место в промышленных топках, приходится отказываться от горелок с фитилями, обладающих низкой удельной производительностью, и переходить к более грубым приемам массовой подачи топлива в зону испарения и газификации, которая всегда в какой-то мере предшествует зоне горения.

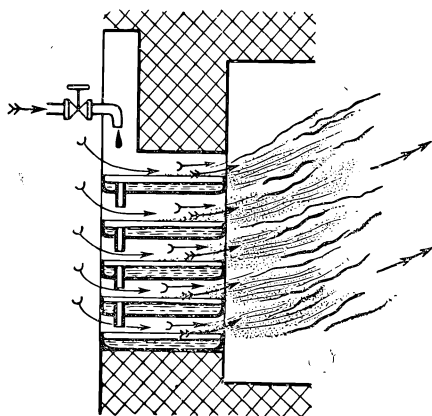
Самым примитивным и простым по оформлению является в этом отношении старинный плосечный способ сжигания, весьма напоминающий по характеру развивающегося процесса сжигания твердого топлива в костре. Схема процесса, возникающего на единичной площадке, показана на фиг. 52,а. Если на площадку налить слой жидкого топлива, сравнительно легко испаряющегося, то после розжига над площадкой возникнет столб горячего газа, вытесняемого кверху окружающим тяжелым холодным воздухом. Таким образом, само собой в атмосфере устанавливается местное газовоздушное течение, обеспечивающее возникший очаг горения подачей свежего воздуха и отводом продуктов сгорания. Тепло к начальным стадиям процесса доставляется самой зоной горения. Скоростью его доставки к поверхности испарения жидкого топлива в сущности и определяется скорость образования горючей смеси и, как следствие, — скорость сгорания этого топлива и теплопроизводительность очага горения в единицу времени (*ккал/час*). Развитие такого очага горения носит стихийный, неуправляемый характер. Прогретая с поверхности жидкость испаряется, молекулы топлива, будучи увлечены общим газовоздушным потоком, движутся кверху внутри огневой зоны, проходя последовательные стадии теплового разложения и вступая в смесеобразование с окружающим воздухом. За тонкой огневой зоной молекулы образовавшихся продуктов сгорания продолжают движение кверху расширяющимся общим потоком. Толща этой горячей, но уже сгоревшей части потока увеличивается снизу вверх (фиг. 52), все более замедляя (увеличением пути) продвижение молекул воздушного кислорода к центру потока, что позволяет центральным молекулам (или осколкам молекул) образовавшегося под воздействием высокой

температуры топливного газа пролететь вместе с увлекающим их потоком наиболее длинный путь до момента встречи с этими еще свободными молекулами кислорода и вступить с ними в смесеобразование и окислительную реакцию. Это обстоятельство и приводит к сильному вытягиванию центра пламени над плоской, что воспринимается неопытным наблюдателем как особенно интенсивное горение в центре. На самом же деле наиболее быстро протекает процесс горения в нижних и средних частях огневой зоны, где окружающий пламя слой мертвых продуктов



а — единичная плоская горелка на открытом воздухе.

Жидкое топливо, налитое на плоскую горелку, испаряется под воздействием нагрева от пламени и, смешиваясь с воздухом, горит над плоской. Наиболее длинный путь молекулы воздушного кислорода совершают до центральной части потока, пробираться сквозь толщу поднимающихся кверху топочных газов (продуктов сгорания). Это дает возможность газообразным частицам топлива пройти по центральной части потока наиболее длинный путь до встречи с кислородом и сгореть в самую последнюю очередь высоко над плоской, вследствие чего пламя особенно сильно вытягивается кверху в центре.



б — колосниковая топка для жидкого топлива (мазута).

Набор плоских со сливными трубочками для подачи топлива на нижние плоскости. Смесеобразование воздуха с газифицированными молекулами топлива начинается слоями над каждой плоской и заканчивается в топочном объеме, где и возникает пламенное горение по мере образования смеси.

Фиг. 52. Плоскостное горение жидкого топлива.

сгорания еще достаточно тонко, и возникает наиболее быстрое и непосредственное смесеобразование между молекулами топлива и воздушного кислорода. В хвосте процесса, т. е. в верхней зоне, к продуктам сгорания успевает примешаться значительное количество холодного избыточного воздуха, снижающего температуру газа и концентрацию горючего. В неблагоприятную для окончания процесса сторону направлен и внешний теплообмен пламени с окружающими холодными телами. Постепенно по всем этим причинам забалластированная и охлажденная хвостовая часть процесса теряет свою жизнеспособность и оказывается не в состоянии довести процесс до полного завершения: в потоке

появляются газообразные продукты недожога ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и т. п.), а центральная часть пламени дымит, выделяя сажу. Наконец, само жидкое топливо, представляющее собой сложный раствор более тяжелых маслянистых веществ в более легких (и более легко испаряющихся), сильно прогреваясь и испаряя прежде всего легкие составляющие смеси, густеет, теряет дальнейшую способность испаряться, разлагается и оставляет на площадке коксовый нагар.

Несмотря на такой несовершенный ход процесса, площадный способ сжигания жидкого топлива может быть довольно значительно улучшен. Еще совсем недавно значительное количество установок (печных и котельных), работавших на мазуте, снабжалось топками площадного типа (фиг. 52,б).

Топочное устройство представляло собой несколько прямоугольных площадок («колосников»), поставленных друг над другом и снабженных сливными трубками, удерживавшими слой топлива на каждой площадке на определенном уровне. Топливо с поверхности испарялось под воздействием тепла пламени и прогретых частей топки. Воздух поступал через горизонтальные прозоры между площадками и, сдувая испаренную часть топлива, вступал с ним в сравнительно организованное, энергичное смешение, вынося горючую смесь в топочный объем, в котором окончательно развивался пламенный процесс, начинавшийся около устья межплощечных прозоров, игравших роль своеобразных горелок смешивающего типа.

Все разобранные случаи показывают, что не возникает никакой принципиальной, существенной разницы в ходе процесса горения между сжиганием топливного газа и жидкого топлива. Последнее неизбежно, как мы видели уже на многих примерах, проходит под воздействием сильного прогрева предварительную стадию газификации. Однако ко всем последовательным стадиям развивающегося процесса горения в этом случае добавляется стадия испарения жидкого топлива — самая медленная из всех последовательных стадий процесса. Здесь, как во всякой технологической схеме «поточного» (конвейерного) типа, весь процесс тормозит самая медленная операция. Поэтому именно скоростью испарения жидкого топлива и определяется скорость протекания всего процесса горения жидкого топлива в целом. Для того чтобы ускорить явление испарения (самое медленное и потому тормозящее весь процесс смешения), следует прежде всего развить поверхность испарения жидкости\*.

---

\* Если, например, целый кусок сахара определенного веса обладает относительно небольшой наружной поверхностью, то дробление этого куска добавит новые поверхности, оставшиеся «скрытыми» внутри целого куска. Чем мельче дробление, тем больше становится суммарная поверхность, приходящаяся на единицу раздробленного вещества. Такое значительное развитие удельной поверхности ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ) существенно ускоряет протекание всех явлений, имеющих поверхностный характер. Так, кусок сахара тает в стакане чая значительно медленнее, чем то же весовое количество сахарного песка с сильно развитой суммарной поверхностью.

Вторым фактором, влияющим на скорость испарения жидкости, является разность плотностей образующегося пара (разность давлений) непосредственно над испаряющей поверхностью и газовоздушной средой, в которую происходит испарение (испарение диффузионного характера). Чем больше эта разность, тем скорее распространяется в окружающей газовоздушной среде возникающий пар, удаляясь с поверхности испарения, тем больше молекул жидкости, уже не связанных между собой и легко рассеивающихся в пространстве, покидает в единицу времени поверхность этой жидкости. По этой причине вода в открытом сосуде, испаряемая с поверхности, высыхает скорее в сухом помещении с малым содержанием влаги в заполняющем пространство этого помещения воздухе, чем в помещении сыром, с большой влажностью воздуха при тех же температурных условиях.

Наконец, когда из области диффузионного испарения сильно прогретая жидкость переходит в область прямого кипения, количество возникающего пара в единицу времени будет пропорционально количеству воспринимаемого жидкостью тепла (передача жидкости тепла от окружающих ее горячих газов непосредственным соприкосновением с ними или лучеиспусканием пламени).

Если подобно дроблению твердого вещества сплошной слой (или струю) жидкости с небольшой общей наружной поверхностью раздробить на мелкие капли, то суммарная поверхность образовавшегося множества капель окажется весьма значительной, что при прочих одинаковых условиях протекания процесса испарения значительно ускорит переход жидкости в парообразное состояние. Срок существования каждой отдельной капли будет тем меньше, чем меньше ее размеры; а чем меньше время, необходимое для ее испарения, тем короче окажется путь, который она успеет пролететь в потоке газовоздушной среды, пока не испарится.

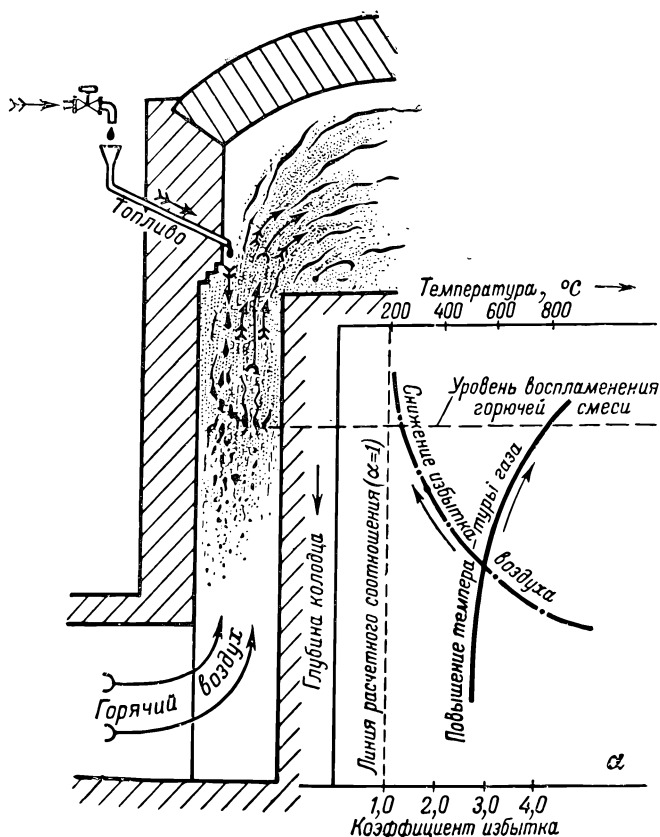
Весьма важно усвоить, что механическая смесь капель жидкого топлива с воздухом еще не является «горючей смесью». Образование горючей смеси начинается с того момента, когда к воздуху начинают примешиваться уже не связанные между собой в плотную жидкость отдельные молекулы этой жидкости, находящиеся сначала в парообразном состоянии, а потом по мере перегрева их вступающие в стадию теплового разложения. Чем больше такого газифицированного «топлива» примешивается к воздушной смеси, т. е. чем больше нарастает концентрация топливного газа в этой смеси, тем скорее приближается образующаяся смесь к пределам своей горючести\*, особенно если учесть, что такой процесс смесеобразования непременно сопровождается ростом температуры смеси, расширяющим границы ее горючести и способствующим ускорению ее воспламенения.

---

\* Следует вспомнить фиг. 17 и табл. 12 гл. 6 с соответствующими разъяснениями.

## 2. КАПЕЛЬНЫЙ СПОСОБ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

В качестве грубоватого примера сжигания жидкого топлива в виде капель полезно вспомнить еще недавно работавшие в некоторых отраслях промышленности так называемые «капельные печи». Топочное устройство представляло собой длинный вертикальный колодец (фиг. 53), в нижней части которого из спе-

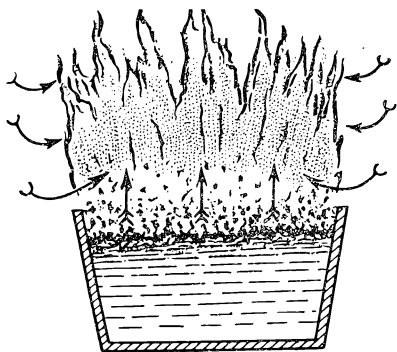


Фиг. 53. Капельная печь для сжигания жидкого топлива. Топливо подается по капельнице в смесеобразующий колодец, где оно испаряется в сильно нагретом воздухе, поступающем из воздухоподогревателя (регенератора) снизу, навстречу падающим топливным каплям.

циального воздухоподогревателя («регенератора») поднимался поток очень горячего воздуха, нагретого до 600—700° С. Навстречу ему сверху из капельниц падали капли мазута, успевавшие испаряться еще до падения на дно колодца и вступавшие в смесеобразование с горячим воздухом. На том уровне колодца, где хотя бы у части достаточно подогретой смеси получалось, 10\*

наконец, необходимое соотношение между газифицированным топливом и воздухом, соответствовавшее пределам воспламенности данной смеси, эта часть воспламенялась и становилась поджигательной зоной для всей остальной части образующейся смеси. Воспламенение начиналось уже в верхней части колодца, а основной пламенный процесс с развитием высокой температура газов переносился в рабочую полость печи, где велся высокотемпературный технологический процесс (например, варка стекла).

Полезно для будущего изложения отметить, что в таком очаге горения осуществлялся встречный принцип подачи топлива



Фиг. 54. Горение масляного топлива на водяной поверхности.

Водяной пар, образующийся от кипения верхнего слоя воды, разрывает масляный слой, выкидывая топливо в виде множества капелек в надслойную зону испарения, газификации и смесеобразования, где эти капли быстро газифицируются под воздействием пламени и первичного воздуха, поступающего туда из окружающей атмосферы.

и воздухом ( $\alpha = 1$ ), как содержание этого газа в смеси, так и температура начинают соответствовать необходимым условиям воспламенения образовавшейся газообразной горючей смеси, и часть газа воспламеняется. Фронт воспламенения заметно пульсирует, так как уравнивание встречных скоростей, поступательной и зажигательной, все время меняет местоположение вследствие крайне неоднородного, плохо регулируемого смесеобразования и распределения поступательных скоростей потока по сечению колодца. По всей вероятности более или менее устойчивое зажигание возникает лишь тогда, когда огнеупорная кладка колодца в верхней своей части достигает устойчивого накала и становится поджигательной зоной для образующейся горючей смеси.

Топка такого типа, как показала практика, в состоянии удовлетворительно работать в очень узких пределах регулировки ее по теплопроизводительности и применялась лишь в тех печных

и воздуха: первое подавалось сверху вниз, последний — снизу вверх. Постепенно чистый воздух, по мере того как он поднимался кверху, превращался в горючую смесь с растущей концентрацией топливного газа, иначе говоря с числом уменьшающимся по составу газа коэффициентом избытка воздуха: от бесконечно большого внизу, в зоне чистого воздуха ( $\alpha = \infty$ ), до расчетного ( $\alpha = 1$ ) в верхней части колодца. Это показано на фиг. 53 в виде диаграммы, где наряду с ростом по высоте колодца температуры образующейся смеси происходит быстрое падение коэффициента избытка воздуха. Вблизи от расчетного соотношения между топливным газом

устройствах, которые должны были выдерживать один и тот же тепловой режим в течение целой длительной кампании.

Другим примитивным, но не менее поучительным примером капельного сжигания жидкого топлива являлись бытовые топки с водяным поддоном, применявшиеся в районах нефтедобычи (фиг. 54). Масляное топливо, будучи легче воды, вытесняется ею (всплывает) на поверхность тонким слоем. При поджигании оно начинает гореть над поверхностью воды значительно быстрее и полнее, чем на сухой площадке. Это объясняется тем, что тепло от пламени не только испаряет и газифицирует само топливо, но и передается через тонкий слой масла воде, которая, вскипая на поверхности, образует пар, энергично прорывающийся через топливный слой кверху, разрывающий этот слой и увлекающий за собой капли разбрызганного им топлива.

Рой капель самой различной величины все время взлетает и падает над волнующейся поверхностью воды и масла. Суммарная поверхность этих капель оказывается достаточно развитой, чтобы под воздействием высоких температур возникшей зоны горения значительно ускорить по сравнению с сухой площадкой испарение топлива и вступление его в смесеобразование с воздухом\*.

### 3. СЖИГАНИЕ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Современным способом сжигания жидкого топлива (мазута, керосина, бензина и т. п.) в высокопроизводительных топках промышленного типа является сочетание распылителей жидкости с горелками. Распылителями служат приборы, называемые форсунками. Способ распыливания заключается в том, что либо жидкое топливо прожимается через тончайшие отверстия, что требует применения насосов очень высоких давлений, либо при умеренных давлениях струю жидкого топлива заставляют вращаться с большой скоростью в винтообразном канале или специальной камере вращения, помещенной в головке форсунки (центробежные форсунки), либо, наконец, струю жидкости разрывают ударом и захватом ее высокоскоростными струями расширяющегося пара или сжатого воздуха (паровые и воздушные форсунки)<sup>42</sup>.

Известно, что чем тоньше пыль, тем легче она «виснет» в воздухе, тем медленнее она оседает под воздействием ничтожного своего веса, так как сильно развитая ее относительная поверхность (на единицу веса) сопротивляется ее перемещению в вязкой воздушной среде, играя роль парашюта<sup>43</sup>. Это настолько замедляет скорость оседания пыли в воздухе, что даже сравнительно слабые потоки воздуха, возникающие в атмосфере, в состоянии переносить такую пыль на далекие расстояния, под-

---

\* Именно по этим причинам применение воды при тушении нефтяных пожаров приводит к обратному действию: пожар еще энергичнее разгорается<sup>41</sup>.

нимать кверху или крутить, заставляя ее перемещаться вместе с собою\*.

Распыленные частицы жидкого топлива, выброшенные форсункой в топочную камеру со значительными начальными скоростями, простреливают воздушный поток, движущийся через эту камеру, распределяясь по сечению топки. Чем мельче капли, т. е. чем больше развита их поверхность сопротивления, тем скорее воздушный поток затормаживает их свободный полет и, увлекая их за собой, заставляя далее двигаться в том направлении и с той скоростью, которые приданы ему самому. Попадая в топочные условия, жидкие топливные капли, вместе с несущим их воздухом постепенно прогреваются и, испаряясь, а затем газифицируясь, т. е. проходя стадию предварительного теплового разложения, вступают одновременно в смесеобразование с воздушным потоком. В той зоне потока, где воздух оказывается достаточно насыщенным этим газообразным топливом и образовавшаяся горючая смесь достигает при этом достаточного прогрева, создаются, наконец, условия для ее воспламенения.

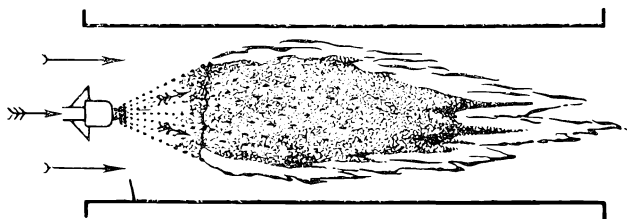
При прямолинейном характере движения потока вся эта сложно протекающая подготовительная зона значительно вытягивается вперед, создавая достаточно протяженный предпламенный участок факела (фиг. 55,а). Фронт воспламенения, начинающий пламенный процесс, сильно колеблется и даже склонен к сильным пульсациям, возникающим при превышении верхнего (наибольшего) предела нагрузок и предшествующим срыву пламени. Капли среднего и крупного размеров, выдаваемые в поток форсункой, не успевают испариться до возникновения фронта воспламенения, который обеспечивается достаточным количеством топлива за счет его частичного испарения и в первую очередь за счет испарения мельчайших фракций жидкой топливной пыли. Недоиспаренные капли движутся за линию видимого фронта воспламенения и, подвергаясь более сильному тепловому воздействию уже возникшего пламени, быстрее выкипают, быстрее проходят стадию предварительного теплового расщепления молекул и вступают в смесеобразование и горение по всей протяженности пламенного факела, постепенно питая топливом все его зоны.

Если вводимый в топку воздух имеет непосредственный доступ к начальным участкам факела, то общая теплоемкость топливоздушного потока\*\* оказывается чрезмерно большой: на ее

\* Известно, что даже сравнительно грубые твердые частицы с мало развитой поверхностью и довольно значительным весом могут транспортироваться воздушным потоком, если этому потоку придать достаточную скорость («живую силу»). На этом положении основан общеизвестный пневмотранспорт по трубам, довольно широко применяемый в технике.

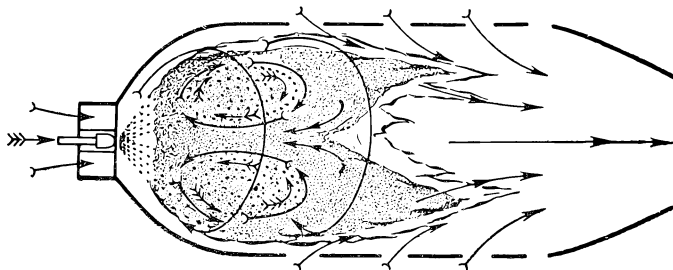
\*\* Надо вспомнить, что согласно табл. 15 гл. 8 при сжигании нефтяных продуктов (например, керосина и мазута) требуется только для расчетного соотношения между воздухом и топливом при полном сгорании, т. е. при  $\alpha = 1$ , примерно 15 кг воздуха на 1 кг топлива, а при наличии избытка — еще соответственно больше.

предварительный прогрев уходит много тепла, которое в условиях прямолинейного движения потока поступает к частицам топлива весьма замедленно. Последние слои частиц, движущиеся к фронту воспламенения, перехватывают основное количество тепла, не пропуская лучистое тепло в толщу движущихся позади частиц, которые если и получают часть этого тепла, немедленно



а — сжигание в прямом потоке.

Распыленное форсункой топливо распространяется по ширине потока, входит в зону газификации (заштрихованная область), где под воздействием высоких температур оно сначала испаряется, а затем, разлагаясь, газифицируется. Фронт воспламенения возникает еще на ранних стадиях газификации, как только в газозвдушем потоке накопится достаточная концентрация газообразного топлива при соответствующей температуре. Дальнейшая газификация идет уже за первичным фронтом воспламенения в окружении пламени. Весь процесс газификации, а следовательно, и смешения сильно вытягивается в длину.



б — сжигание в закрученном потоке.

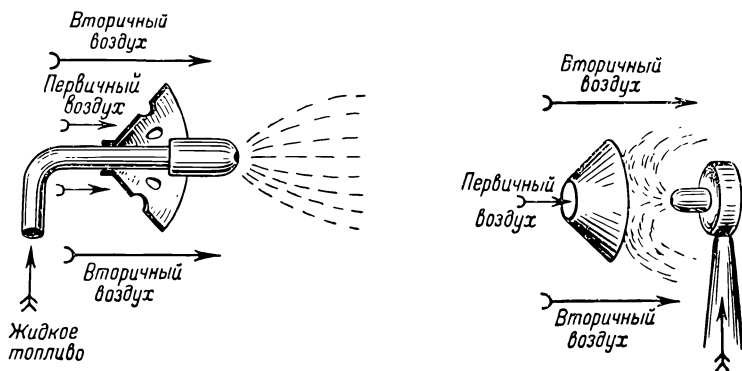
Распыленное топливо, захваченное циркуляционным потоком горячего газа (продуктов сгорания), испаряется и газифицируется в зоне циркуляции и в газообразном состоянии подхватывается проточной частью закрученного воздушного потока, образуя с ним горючую смесь. Движущийся в зоне циркуляции обратный поток высокотемпературных газов обеспечивает и устойчивое поджигание горючей смеси в наружной части циркуляционной зоны вблизи устья форсунки.

Фиг. 55. Факельное сжигание жидкого топлива.

передают его на прогрев окружающего их потока воздуха. Воздух будучи теплопрозрачным, сам непосредственно воспринять тепловые лучи не в состоянии.

Чтобы несколько ускорить этот медленный прогрев, из-за которого удлиняется предпламенная зона и фронт воспламенения далеко отывается от устья форсунки или, что то же, от устья горелки, не следует допускать непосредственного (беспрепятственного) набегания всего потока на предварительную зону испарения, а подавать в эту первичную зону только ту часть

воздуха, которая необходима для скорейшего начального смесеобразования. Остальная часть «вторичного воздуха» должна поступать уже за фронтом воспламенения для дальнейшего развития смесеобразования и доставки воздушного кислорода в количестве, обеспечивающем полноту сгорания всего топлива. При такой организации факельного процесса суммарная теплоемкость первичной смеси будет достаточно мала и первичная смесь прогреется значительно скорее, первичный поток быстрее остального воздуха насытится топливным газом и достигнет условий, достаточных для воспламенения, т. е. для создания зоны поджигания всей остальной части образующегося факела смешения.



а — форсунка, пылящая по потоку. Первичный воздух поступает в зону газификации только через отверстия в воротнике. У устья форсунки (за воротником) возникает зона наибольшей концентрации топлива при явном недостатке воздуха.

б — форсунка, пылящая против потока. Первичный воздух попадает в зону начальной газификации через центральное отверстие в защитном конусообразном кольце, укрепленном перед форсункой. За кольцом возникает зона наибольшей концентрации топлива при явном недостатке воздуха

Фиг. 56. Схемы организации начальных зон испарения и газификации жидкого распыленного топлива.

Для того чтобы создать такую зону первичного смесеобразования в воздушном потоке прямолинейного характера, следует несколько прикрыть пылящую форсунку специальным воротником (фиг. 55), не позволяющим набегать относительно холодному потоку на корневую часть факела. Такую защитную зону можно конструировать по-разному, при пылении форсунки как по потоку, так и против него, как это, например, показано на фиг. 56,а и б. Защитный воротник может иметь небольшие прорезы для допуска в эту зону некоторого количества первичного воздуха. Среднее отверстие в защитном кольце (фиг. 56,б) сделано для той же цели. Если относить первичный воздух ко всему топливу, выпускаемому в поток форсункой в единицу времени, то окажется, что в защитной зоне коэффициент избытка будет значительно меньше единицы ( $\alpha < 1$ ), т. е. зона работает при явном недостатке воздуха. На самом же деле в газоздушном потоке

этой зоны коэффициент избытка воздуха, получаемых отнесением количества первичного воздуха не ко всему топливу, а только к той части его, которая уже вошла в состав газа, т. е. испарилась и газифицировалась, могут быть при правильных режимах заметно больше единицы, но в пределах воспламеняемости такой первичной газообразной горючей смеси. Неиспарившиеся жидкие капли, т. е. еще не участвующие в прямом образовании первичной смеси, жидкие капли являются лишь балластом такой защитной зоны, газифицируясь и вступая в смесеобразование за ее пределами.

Чем лучше развита защитная зона, тем устойчивее становится зона поджигания, а с нею вместе и весь факельный процесс, тем меньше созданный очаг горения боится значительных скоростей набегающего воздушного потока, связанных с наиболее значительными нагрузками такого очага. Это объясняется в первую очередь тем, что за кормой защитной зоны (например, за воротником) создается, как мы уже знаем, зона частичной циркуляции газа с возвратом части высокотемпературного сгоревшего газа. Этот возврат газа значительно усиливает приток тепла к корню факела, необходимый для интенсификации всей предварительной зоны процесса (испарение, тепловое разложение топливных молекул), что сразу же приближает место начала воспламенения к устью горелки.

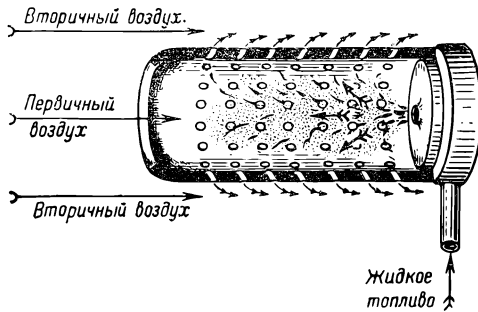
#### 4. ОТКРЫТАЯ ГОРЕЛКА, УСТОЙЧИВО РАБОТАЮЩАЯ НА УРАГАННОМ ВЕТРЕ

Можно предложить горелку, которая не будет бояться даже ураганного ветра, работая в открытом виде. Для этого достаточно, например, сконструировать ее в виде цилиндрического колпака, обращенного прямо навстречу потоку воздуха, в дно которого вмонтирована распыливающая форсунка (фиг. 57). В цилиндрической стенке колпака, сделанного из огнеупорного материала, следует создать значительное число небольших отверстий с суммарным сечением ( $m^2$ ) не более сечения входного отверстия самого колпака. Когда такая горелка будет разожжена и придет в установившееся тепловое состояние, будет достигнута и устойчивость очага горения практически при любых скоростях набегающего холодного воздушного потока, обеспечивающая практически полное горение жидкого топлива с внешне «беспламенным» горением. Внутренняя полость колпака, обращенная навстречу потоку воздуха, явится зоной торможения этого потока и вместе с тем зоной энергичного испарения и смесеобразования под воздействием раскаленных стенок и кислорода первичного воздуха, ускоряющего газификационный процесс\*. Создающийся в полости колпака напор газа выдавли-

---

\* Надо вспомнить процесс распада молекул органического топлива под воздействием предварительных стадий окисления, о которых рассказывалось в гл. 3.

вает образовавшуюся первичную горючую газообразную смесь, явно переобогащенную топливом, через боковые отверстия горелки, раскаленные стенки которых являются устойчивыми поджигателями вторичной горючей смеси, образующейся у выходных отверстий из воздушного потока, обтекающего наружные стенки горелки, и первичной горючей смеси. Химическая активность раскаленной первичной смеси, выходящей навстречу вторичному воздуху, настолько велика, что окончательное сгорание топлива происходит практически мгновенно у самого выходного устья отверстий.



Фиг. 57. Горелка „Вега“ для сжигания жидкого топлива при больших скоростях набегающего потока воздуха.

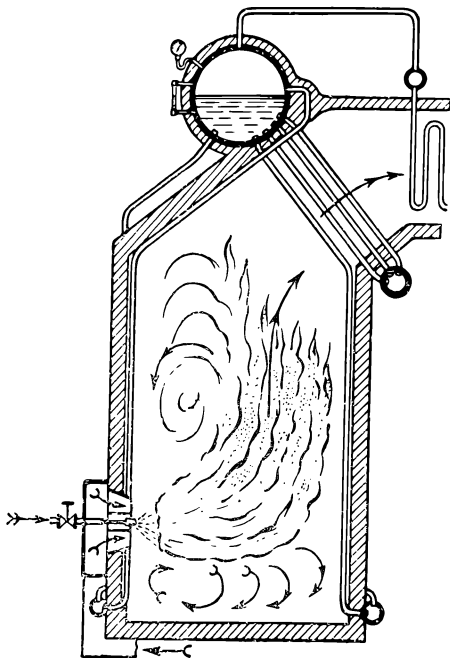
Первичный воздух, идущий на начальное испарение и газификацию топлива, попадая в полость огнеупорного колпачка, затормаживается и становится средой, в которой происходит первичное образование топливного газа, продавливаемого через боковые отверстия раскаленных стенок колпачка. Окончательное вторичное смесеобразование возникает на наружной поверхности колпачка за счет вторичного воздуха, обтекающего колпачок с весьма большими скоростями. Начальное горение происходит еще в отверстиях стенок, раскол которых является средством устойчивого поджигания вторичной смеси. При установившемся процессе видимое пламя исчезает снаружи колпачка, стенки которого получают яркий раскол.

Такой прием устройства горелки мог бы осуществляться и внутри топочной камеры с высокими нагрузками, т. е. с большими скоростями набегающего потока, однако только в тех случаях, когда можно не опасаться разрушения огнеупорных стенок и попадания твердых осколков в какие-либо рабочие органы установки, расположенные за пределами топки.

##### 5. ЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ ВИХРЬ МОЖЕТ СЛУЖИТЬ УСТОЙЧИВОЙ ЗОНОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

В целях придания устойчивости факельному процессу в широких пределах изменения нагрузок и усиления работоспособности (производительности в единицу времени) зоны испарения и теплового разложения жидкого топлива нередко применяют сильно закрученные воздушные потоки, которые, как об этом

уже говорилось в предыдущей главе, возбуждают еще более энергичную циркуляцию части потока вблизи устья горелки. Капли топлива, разбрасываемые форсункой в пределах этой зоны, подхватываются циркуляцией газа и сами циркулируют в газозвушной среде, насыщая ее парами топлива. В эту же циркуляцию попадают и высокотемпературные сгоревшие газы, доставляющие сюда основное тепло, необходимое для интенсивного протекания предварительных тепловых процессов. Таким образом, возникающая при закрученных потоках зона циркуляции становится зоной предварительного первичного смесеобразования, явно переобогащенной топливом. Эта зона, взаимодействуя с проточной частью окружающего ее воздушного потока, непосредственно не участвующего в местной циркуляции, выдает в него первичную горючую и уже загоревшуюся смесь, достаточно подготовленную к устойчивому продолжению процесса полного сгорания. Часть воздушного потока, участвующая в циркуляции, играет роль первичного воздуха, ускоряющего испарение, тепловое разложение топлива и образование горючей смеси. За пределами зоны циркуляции полезно раскручивать поток в целях усиления вторичного смесеобразования, что обычно делается при помощи прямого (радиального) втекания струй вторичного воздуха.



Фиг. 58. Топка для мазута под паровым котлом.

Первичное смесеобразование распыленного топлива с подогретым воздухом, подаваемым вентилятором через воздушноподогреватель, возникает недалеко от устья форсунки. Вторичное конечное образование горючей смеси происходит уже в пламенной зоне топочного пространства.

Такой прием не только ускоряет смесеобразование в конечных участках факела, но и выравнивает состав и температуру топочных газов, выдаваемых топкой. Схема подобного процесса дана на фиг. 55,б. Примерно по такой схеме работают топки газотурбинных установок и реактивных двигателей.

Топки для жидкого топлива многочисленных печных и котельных установок обычно устраиваются по значительно более простому и менее совершенному схемам. На фиг. 58 показана котельная топка для мазута, камера которой сильно охлаждена водяными трубками («экранами»), расположенными по стенам

топки. Горелка такой топки внешне напоминает только что описанные, но для ее работы привлечены значительно менее совершенные средства. Смесеобразование, довольно энергичное у корня факела, постепенно затухает и становится вялым во второй (верхней) половине топочного объема, что вытягивает факел, а иногда, при перегрузках или недогрузках топки по теплопроизводительности, приводит и к неполному тепловыделению (недожогу). Таким образом, несовершенство организации процесса и главным образом несовершенство организации подготовительной газификационной зоны приводят такие топки к достаточно узким пределам возможных полноценных, экономичных по удельному расходу топлива режимов (нагрузок), на которые и должны рассчитываться действующие установки. Выход из таких режимов всегда будет сопровождаться понижением коэффициента полезного действия, и, как следствие, перерасходом топлива.

Впрочем, вытянутость факела для котельных топок является в известном смысле даже желательной, так как это вызывает увеличение относительного объема топочной камеры и позволяет разместить на ее стенах больше лучевоспринимающих экранных поверхностей нагрева, весьма ценимых котельщиками за интенсивный теплообмен и, следовательно, большую удельную паропроизводительность (с  $1 \text{ м}^2$  поверхности нагрева). Чтобы в соответствующей мере уравновесить значительный расход тепла на прямую отдачу такой сильно охлажденной экранами топки, в современной практике применяют достаточно сильный предварительный подогрев воздуха, вводимого в горелку, достигающий  $200\text{—}350^\circ \text{С}$ .

---

---

## Глава одиннадцатая

### СЛОЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

#### 1. КОСТЕР — УСТОЙЧИВЫЙ ОЧАГ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

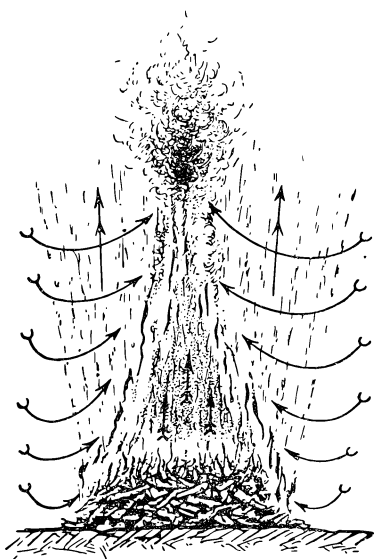
Слоевой способ сжигания твердого топлива, возникший на заре человеческой культуры, широко применяется в различных вариантах и до настоящего времени.

Наиболее древним и примитивным очагом такого типа является костер (фиг. 59).

Обстановка, создаваемая в костровом очаге горения, во многом напоминает горение жидкого топлива на площадке или водяном поддоне (фиг. 52 и 54). Принципиальное сходство заключается в том, что во всех этих случаях доступ воздуха к центру протекающего процесса крайне затруднен. На сухой площадке выделяющиеся пары топлива и газы разложения совершенно оттесняют окружающий атмосферный воздух к краевым зонам процесса, где и происходит образование газообразной горючей смеси и ее горение. В случае горения жидкого топлива на водяном поддоне надслоиная зона взлетающих и падающих капель, казалось бы, более доступна для проникновения в нее окружающей воздушной атмосферы, так как расстояние между отдельными каплями относительно велико. Однако при горении, когда такая капельная надслоиная зона создается, все пространство между каплями практически заполняется парами и газом разложения топлива, которые подобно предыдущему случаю, в основном оттесняют воздушную атмосферу к внешним участкам процесса, где и возникает зона смешения топливного газа с окружающим воздухом с одновременным пламенным горением смеси.

Кучеобразный слой древесных обломков самой произвольной формы, составляющий основу любого костра, пока он не разожжен, во всех своих частях доступен проникновению в него атмосферного воздуха. Поленья, ветви, обломки сухостоя, наваленные друг на друга, «кострятся», сложно переплетаясь между собой и создавая самые причудливые по форме прозоры, затопленные окружающим воздухом. Когда же костер разожжен, эти прозоры начинают заполняться легко выделяющимися из древесины парами и газами разложения в смеси с газообразными продуктами полного и неполного сгорания. Вся эта горячая,

сильно расширенная нагревом газовая смесь вытесняет из внутренних полостей костровой кучи атмосферный воздух и в значительной мере затрудняет его дальнейшее проникновение в ее сердцевинную часть, которая вынуждена работать при явном недостатке воздуха (кислорода), т. е. становится зоной производства топливного газа (зоной газификации твердого топлива). Об этом совершенно явно свидетельствует форма кострового пламени, особенно сильно вытянутая кверху над его центральной частью. А мы уже на ряде примеров убедились в том, что пламя вытягивается только в тех частях потока газообразного топлива, куда воздушный кислород добирается с затруднениями и в самую последнюю очередь.



Фиг. 59. Схематический разрез костра.

Топливо в виде газообразных продуктов разложения древесины и газификации древесного угля, получаемых за счет нагрева пламенем, поднимается кверху общим потоком горячего газа, выталкиваемого тяжелым окружающим воздухом. Молекулы воздушного кислорода проникают к центру потока через толщу продуктов сгорания и добираются к этому центру в последнюю очередь, когда образовавшийся топливный газ уже успел подняться на значительную высоту. Это создает впечатление длинного пламени, особенно вытянутого в центральной части костра. В противовес этому быстрое смесеобразование по краям создает короткое пламя.

Таким образом, вихревая, трехпаная, но по существу очень тонкая огневая оболочка кострового пламени прикрывает собой достаточно обширную зону предварительной газификации твердого топлива, которое, превращаясь под воздействием высокой температуры и отчасти «первичного» воздуха в топливный газ, подхватывается уже в газообразном состоянии общим потоком горячих газов, вытесняемых кверху напором тяжелого холодного воздуха окружающей атмосферы.

Корневая часть костра с беспорядочно наваленным твердым топливом является неплохим завихрителем (турбулизатором)

движущегося кверху газозадушного потока, вызывающим по краям этого потока энергичное смесеобразование топливного газа с воздухом, в котором невольно участвуют и сгоревшие уже топочные газы. Однако поднимающийся кверху поток вынужден преодолевать значительное сопротивление атмосферы и присоединять к себе увлекаемые им соседние слои холодного воздуха, постепенно охлаждаясь, расширяясь и замедляя свое поступательное движение. Скорости этого потока, весьма различные по его сечению в нижних участках (у костра), замедляясь, постепенно выравниваются и вследствие этого теряют способ-

ность участвовать в быстрых смесеобразовательных процессах. По этой причине энергично развивающиеся в нижней части костра процессы образования горючей газообразной смеси постепенно затухают и вздымающийся столбом поток топочных газов, охлажденный чрезмерными количествами избыточного воздуха и наружным теплообменом, рассеивается в конце концов в воздушном пространстве или сносится воздушными течениями в сторону, переставая участвовать в создании тяги над костром. Вследствие ухудшения смесеобразования и остывания потока газов в верхней его части (над костром) теряет свою активность и сам процесс горения, который в конечной, наиболее вытянутой кверху центральной зоне кострового пламени уже не получает полного завершения. Костер усиленно дымит, выделяя сажу и газообразные продукты неполного сгорания, потерявшие в таких условиях способность реагировать с кислородом воздуха\*.

Хорошо организованный костер представляет собой достаточно устойчивый очаг горения (особенно при больших его размерах), в известных пределах безнаказанно выдерживающий воздействие ряда грубых посторонних факторов (холод, ветер, и т. п.). Но сам процесс, даже при наилучших условиях его протекания (безветренная, теплая, сухая погода), неизбежно сопровождается, как мы видели, рядом паразитических явлений вследствие прямого нерегулируемого вмешательства окружающей его воздушной атмосферы. Эти явления непроизводительно снижают его тепловые характеристики.

Чем совершеннее топочное устройство, тем меньшее количество паразитических воздействий сопровождает процесс горения, тем эффективнее протекает этот процесс, тем лучше он управляем как по производительности, так и по качеству горения в смысле полноты тепловыделения и допущенных для достижения этой полноты избытков воздуха.

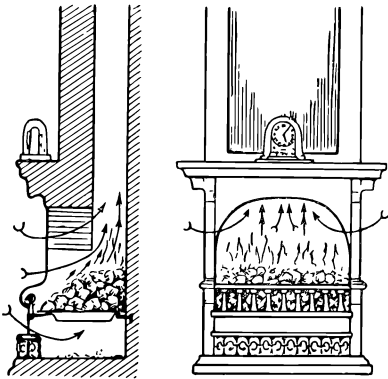
## 2. ОГНЕВОЙ ПРОЦЕСС В КАМИНЕ И КОМНАТНЫХ ПЕЧАХ

По качеству протекающего топочного процесса недалеко от костра ушел приобревший в свое время широкую популярность камин, столь поэтически описываемый во многих старинных романах. Этот когда-то весьма распространенный комнатный отопительный прибор, в средние века служивший нередко и кухонным очагом, а отчасти и осветительным средством, с точки зрения современной топочной техники весьма далек от совершенства.

---

\* Следует полагать, что в наиболее горячих участках зоны газификации, непосредственно предшествующих высокотемпературной зоне горения, наиболее значительная часть продуктов газификации и разложения топливных молекул находится в неустойчивых состояниях в виде активных осколков первичных молекул, способных существовать некоторое время только при достаточно значительных температурах. Выходя из области высоких температур, эти продукты газификации снова приобретают устойчивые формы молекул неполного сгорания ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и т. п.) или частичек сажи, составленных из сгруппировавшихся атомов углерода.

Из представленной на фиг. 60 схемы видно, что открытая топка камина, столь ценимая как привлекательное зрелище, дает доступ паразитическому воздуху, втекающему поверх горящего слоя и уклоняющемуся от активного смесеобразовательного процесса внутри этого слоя, подобно тому как это имеет место и в костровом очаге горения. Избыточный воздух в значительном количестве, в несколько раз превышающем расчетное соотношение, проникает в трубу, охлаждает топочные газы и тем самым ослабляет трубную тягу, уменьшая часовую производительность очага (*ккал/час*).



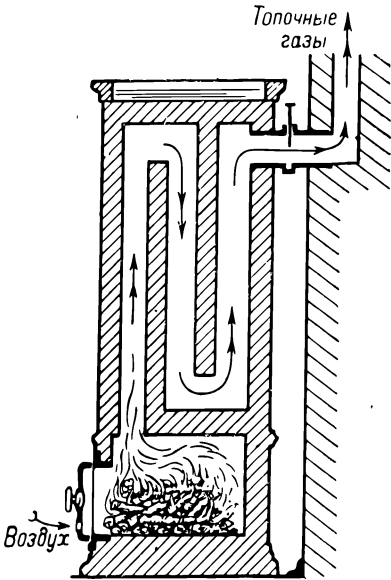
Фиг. 60. Схематический разрез камина. Топливо лежит на колосниковой решетке. Небольшая часть воздуха поступает под решетку и идет на газификацию топлива и горение, приходя в соприкосновение с раскаленным коксом. Значительная часть воздуха попадет в газоход и трубу поверх топлива, увеличивая общее количество избыточного воздуха, который нагревается за счет смешения с продуктами сгорания и бесполезно уносит воспринятое тепло в атмосферу. Наибольшая полезная отдача тепла топлива в помещении происходит за счет лучистого теплообмена (излучение пламени и раскаленных кусков кокса).

Как отопительный прибор он нагревает помещение практически только излучением пламени, и происходящий в нем замедленный процесс выгорания, пожалуй, даже целесообразен. Но он предельно неэкономичен вследствие ничтожного использования теплотворной способности топлива, основная часть которой уходит на нагрев значительных количеств избыточного воздуха, бесполезно уносящего почти все это тепло в атмосферу (так называемая потеря тепла с отходящими газами или «потеря в трубу»). Некоторая часть тепла, воспринятого нагретыми топочными газами, успевает задержаться в кладке дымохода, прогревая ближайшие участки стены помещения.

Дровяные комнатные печи, как они ни примитивны, снабжаются несколько более совершенной топочной камерой. На фиг. 61 представлен схематический разрез обыкновенной трехходовой печи.

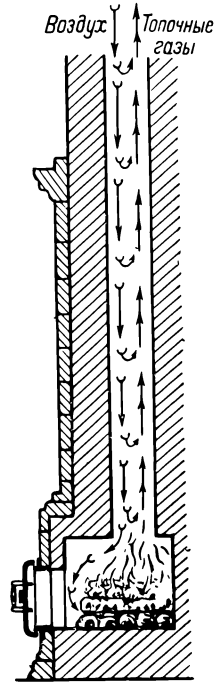
Топка представляет собой простую подовую камеру, на поду которой раскладывается, как известно, слой дров. Однако при разожженной печи доступ воздуха в топочный объем весьма сильно ограничивается: топочная дверца по возможности плотно закрывается, а доступ наружного воздуха организуется через ряд немногочисленных отверстий в нижней части этой дверцы. Сечение этих отверстий достаточно мало и создает сравнительно значительное сопротивление движению газозвушного потока, замедляя поступление воздуха в очаг горения. Понятно, что и при таком устройстве некоторая часть избыточного воздуха уклоняется от своевременного участия в смесеобразовании и

вхолостую примешивается к продуктам сгорания, соответственно снижая их температуру. В изображенной трехходовой печи горячие газы постепенно отдают часть своего тепла теплоемкой внутренней кладке и стенам печи, которые в печах этого типа делают не очень толстыми в целях скорейшего прогрева. Движение газов по газоходам притормаживается не только дверцей с малым числом мелких отверстий, но и самими газоходами, с стенки которых трется газ, крутыми поворотами газового по-



Фиг. 61. Схематический разрез дровяной круглой комнатной печи.

Из подовой (бесколосниковой) топки ведут три газохода: два подъемных и один опускной. Печь соединена железной трубой (с задвижкой) с выходным газоходом в стене, который ведет к наружной трубе. Воздух в умеренном количестве поступает из отверстий в топливной дверце.



Фиг. 62. Упрощенная схема работы дровяной «герметической» комнатной печи.

В вертикальном газоходе возникает два медленных потока: прямой вверх — поток топочных газов; обратный вниз — поток холодного воздуха, необходимый для горения. Часть воздуха по мере прогрева увлекается топочными газами в трубу еще в верхней части газохода, замедляя тягу и тем самым — процесс горения.

тока и, наконец, задней заслонкой, которую во время работы печи несколько прикрывают. Особое сопротивление, ослабляющее движение газа, создает опускной (средний) газоход, так как в нем поток горячего газа принужден двигаться вниз, в то время как по естественным, уже известным нам причинам (под воздействием окружающей холодной воздушной атмосферы) он стремится двигаться кверху. Это отрицательное действие погашается, впрочем, работой подъемных газоходов (передним и задним), представляющих собой как бы маленькие тяговые

трубы, заполненные весьма горячими газами по сравнению с заметно остывшими газами, движущимися по вытяжной трубе. Подъемные газоходы развивают, таким образом, некоторую дополнительную тягу («самотяга печи»), ускоряя соответственно приток воздуха в полость топки.

Протопленная печь закрывается, как известно, спереди топливной дверцей, а сзади — дымовой заслонкой, чтобы печь не продувалась холостым воздухом и не остывала слишком быстро. Это делается после того, как убеждаются в отсутствии образования на подовом жару, угарного газа над разровненным тонким слоем догорающих углей (СО), наличие которого выдает короткое синее пламя, характерное для его сгорания в воздухе.

Обычные железные заслонки не обеспечивают необходимой плотности, которая лучше достигается применением в практике дровяного отопления общеизвестных двойных конфорок. Нагретая печь отдает свое тепло через наружные горячие стенки помещению двумя путями: лучистым теплообменом — окружающим ее более холодным телам (стенам, мебели и пр.) и непосредственным соприкосновением — комнатному воздуху, который, прогреваясь, вытесняется более тяжелым воздухом кверху, остывает и, тяжелея, снова опускается вниз, участвуя в общей циркуляции комнатного воздуха, вызванной нагревом печи\*.

Нередко, при не слишком плотных топочных дверцах, пользуются этими неплотностями для подачи наружного (комнатного) воздуха в полость печи, устраняя необходимость устройства специальных регулируемых отверстий. При достаточно плотных двойных дверцах также нередко не делают отверстий, рассчитывая на неплотное прикрытие во время топки. Все эти приемы нельзя считать целесообразными, так как такая подача воздуха становится менее организованной и приводит к увеличению избытка воздуха в процессе и как следствие к увеличению потери тепла в трубу.

Наиболее замедленно работают комнатные печи с дверцами, обеспечивающими полную, герметическую плотность. В этом случае доступ воздуха через дверцу в топку прекращается практически полностью. Источником подачи воздуха становятся другие неплотности печи, например, вьюшка и даже трубный дымоход, в котором может установиться медленное встречное течение горячих топочных газов вверх и холодного наружного воздуха вниз (фиг. 62). Такое медленное питание очага горения одним из двух необходимых рабочих веществ — воздухом — соответственно замедляет и сам процесс горения, так как скорость тепловыделения прямо пропорциональна количеству воздуха (кислорода), вступающего в реакцию с топливом. «Герметические» печи медленно нагреваются, увеличивая время своего горячего состояния и в известной мере способствуя несколько лучшему использованию тепла, выделяемого при сгорании топлива. Однако и в них

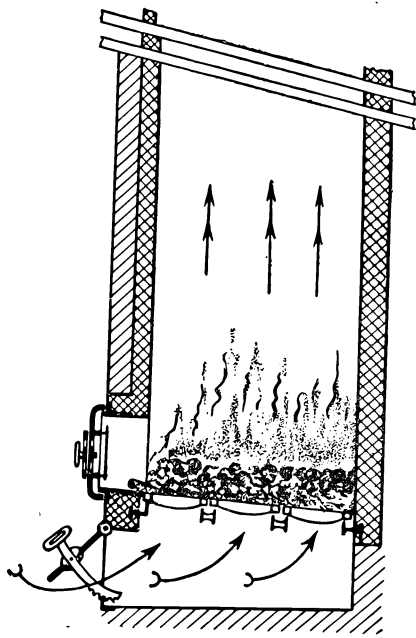
\* Полезно вспомнить, что об этом явлении говорилось в гл. 1.

нельзя избежать избыточного воздуха в топочных газах, ухудшающего тягу и замедляющего процесс горения, так как не весь наружный воздух достигает низа и доходит до очага: часть его, примешиваясь к встречным топочным газам, прогревается еще в самом трубном газоходе и поворачивает назад, к выходу (фиг. 62). Не может быть уверенности и в полной завершенности процесса горения. Вообще, все комнатные печи обладают низким использованием тепла топлива (низким к. п. д.). Наиболее совершенные из них снабжаются колосниковыми решетками, позволяющими привлечь при правильном устройстве весь воздух к первичным зонам смесеобразования. Такие печи могут работать и на каменном угле.

Но тут мы подходим вплотную к приемам организации промышленных очагов горения.

### 3. СЛОЕВЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТОПКИ ДЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

На фиг. 63 представлен разрез слоевой угольной топки с ручным обслуживанием, отапливающей водотрубный паровой котел\*. На колосниковую чугунную решетку с узкими прозорами для прохода воздуха (с малым «живым сечением») вручную набрасывается каменный уголь (или другое кусковое топливо). Воздух в основном количестве подается как «первичный» из поддувала (зольника) под слой. Количество его при данной силе тяги, развиваемой тяговым устройством, зависит от суммарного сопротивления всей топочно-газоходной системы и может изменяться как от степени прикрытия задней дымовой заслонки (за установкой), так и в особенности от степени прикрытия передней поддувальной дверцы, представляющей собой весьма активный регулятор («реостат») сопротивления для движущегося газоздушного потока. Обычно значительное сопротивление создает сам топливный слой и притом тем большее, чем он плотнее, иначе говоря, чем мельче частицы топлива. Грубый слой дров (или крупнокускового торфа) с крупными

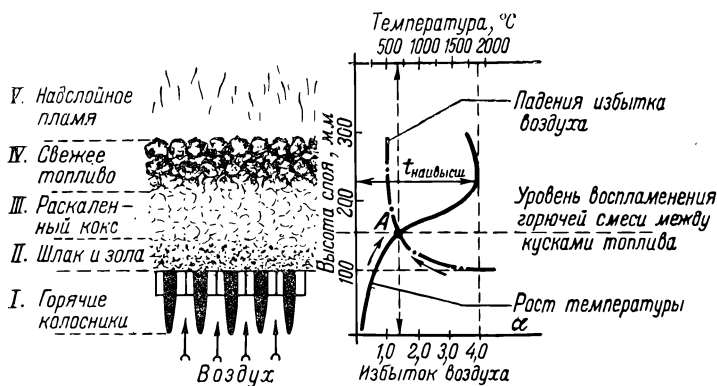


Фиг. 63. Слойная котельная топка с ручным обслуживанием под водотрубным котлом.

Под неподвижной колосниковой решеткой — поддувальная дверца для регулирования подачи воздуха.

\* Поверхности нагрева современных паровых котлов состояются из водяных труб, обогреваемых снаружи горячими топочными газами или теплом, излучаемым пламенем.

прозорами между поленьями, даже при относительно большой высоте (0,6—0,7 м), создает умеренное сопротивление прохождению воздуха, в то время как небольшие куски каменного угля с узкими и сильно изломанными очертаниями воздушных проходов способны составить в несколько раз большее сопротивление при сравнительно тонких слоях (высотой 0,15—0,25 м). Это сопротивление резко увеличивается при несортированных, «рядовых» углях, содержащих значительное количество штыбовых (пылеобразных) фракций. Во время слоевого сжигания углей



Фиг. 64. Схема горящего слоя при встречном питании топливом и воздухом.

- I зона. Колосниковая решетка, воспринимающая тепло от слоя и передающая его воздуху, поступающему снизу (первая ступень подогрева воздуха).
- II зона. Шлаки, постепенно стекающие из раскаленной коксовой зоны и скапливающиеся в нижней части слоя в затвердевшем виде, отдавая тепло воздуху (вторая ступень подогрева воздуха).
- III зона. Слой раскаленного кокса, частично сгорающего в углекислоту, частично газифицирующегося в окись углерода.
- IV зона. Зона прогрева свежезаброшенного на горящий слой топлива (выделение и разложение летучих).
- V зона. Пламенное горение газифицированного топлива.

рост сопротивления слоя вызывается также постепенным образованием шлаков, стекающих в расплавленном состоянии из высокотемпературной зоны коксового горения и застывающих, уплотняя слой, в его нижних участках<sup>44</sup>.

Верхняя дверца, расположенная на уровне колосников, служит только для подачи топлива, шуровки слоя и выгребания шлаков. Во время нормальной работы топки она должна быть плотно закрыта, чтобы не пропускать в топочный объем нерегулируемого воздуха, непроизводительно увеличивающего коэффициент его избытка в процессе. Небольшая розетка с воздушными отверстиями служит для некоторого охлаждения металлического «отражательного» листа, защищающего наружную чугунную

дверцу от перекала за счет интенсивного излучения пламени и слоевого жара\*.

Схема слоевого процесса рассматриваемого типа с подачей топлива сверху на уже горящий слой показана на фиг. 64. С правой стороны на этой схеме дана диаграмма, на которой показаны одновременный рост температуры газоздушного потока по мере его продвижения через слой снизу вверх и падение избытка воздуха в этом потоке по мере его насыщения горючими газами и продуктами сгорания. Таким образом, в межкусковых каналах происходит энергичный процесс образования горючей газовой смеси весьма своеобразного состава, которая на каком-то уровне слоя достигает такой температуры и такого содержания топливного газа, которые соответствуют пределам ее воспламеняемости. На этом уровне и происходит воспламенение этого газа внутри слоя. Уровень этот отмечен пунктирной горизонталью на схеме фиг. 64. Для принятых масштабов он соответствует точке А пересечения кривой подъема температуры газа и кривой падения коэффициента избытка воздуха, как это показано на той же фигуре справа. Этот сложный процесс заслуживает более подробного рассмотрения.

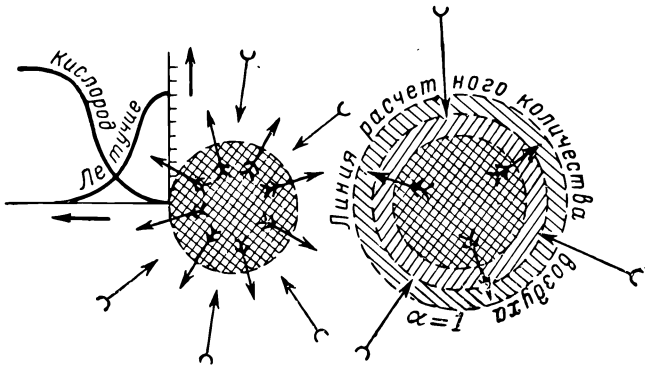
#### 4. КАК ВЕДЕТ СЕБЯ В ОГНЕВОМ ПРОЦЕССЕ ОТДЕЛЬНАЯ ЧАСТИЦА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА?

Прежде всего следует разобраться в том, как ведет себя отдельно взятая частица твердого топлива, тем или иным путем прогреваемая и одновременно окруженная воздухом. Если представить себе для простоты, что такой прогрев сферической частицы происходит в *неподвижном* воздухе, то, как это представлено на фиг. 65,а, сильно прогретая частица начнет выделять в окружающую атмосферу газы разложения, которые отстраняют от ее поверхности воздух. Вокруг такой частицы возникнет молекулярное (диффузионное) смесеобразование, подобное тому, которое было описано в гл. 7. Молекулы кислорода воздуха будут стремиться проникнуть (продиффундировать) в зону газовыделения, непосредственно окружающую поверхность частицы, а молекулы топливного газа («летучих веществ») будут рассеиваться навстречу им в окружающую атмосферу. На какой-то сферической поверхности окружающих частицу газоздушных слоев будет достигнуто расчетное соотношение между газифицированным топливом и воздухом. Если температура образовавшейся горючей смеси окажется достаточной, эта сферическая поверхность станет фронтом ее горения.

---

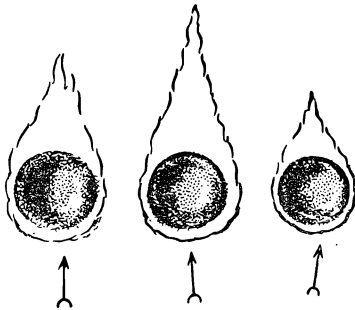
\* Это ничтожное количество охлаждающего дверцу воздуха нельзя всерьез принимать за «вторичный воздух», во многих случаях вводимый в виде острого дутья с высокими начальными скоростями непосредственно в топочную камеру для усиления вторичного смесеобразования и ускорения сгорания газифицированной части топлива в топочном объеме.

В более реальных условиях частица будет разогреваться и выделять газы разложения при обтекании ее потоком воздуха, как это показано на фиг. 65,б.

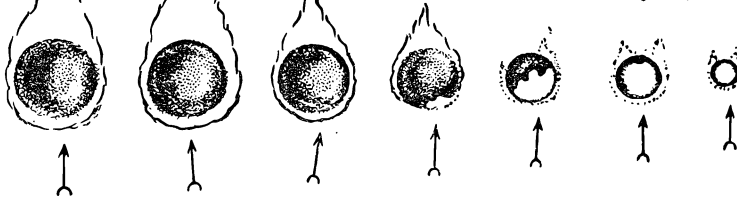


а — схема выделения газа разложения под воздействием нагрева частицы в неподвижном воздухе и движения этого газа в атмосферу. Кислород из окружающей атмосферы движется навстречу газу к поверхности частицы. Постепенно, по мере удаления от частицы, смесь будет содержать все меньше топливного газа и больше кислорода. На какой-то сферической поверхности соотношение между ними становится равным расчетному ( $\alpha=1$ ).

### Пламя летучих



### Пламя окиси углерода



б — частица омывается потоком воздуха, движущимся снизу вверх (или сама движется в воздухе, например падает). Если при этом она одновременно разогревается (горячим воздухом или излучением) и достигает соответствующей температуры, то сначала возникает пламенное горение выделяемого ею топливного газа, который перехватывает весь кислород, движущийся к частице. Пламя вытягивается за кормовой частью. Твердый углеродный остаток (коксовая частица) разогревается от окружающей его огневой оболочки. По окончании выхода летучих кислород прорывается, наконец, к разогретой поверхности кокса. Яркий раскал, начавшийся на лобовом участке частицы, начинает распространяться на всю ее поверхность. Коксовая частица начинает быстро убывать в размере. Вокруг частицы возникает ореол бледно светящегося пламени окиси углерода, которое вытягивается в кормовой области. Частица постепенно газифицируется до золотого остатка. Фиг. 65. Газификация и горение отдельной сферической частицы каменного угля.

Если воспламенение происходит, то пламя горючей смеси, образовавшейся из летучих и воздуха, охватывает частицу, вытягиваясь в кормовой части по направлению движения потока.

Кислород, перехватываемый летучими, не в состоянии достигнуть поверхности твердой, коксовой основы частицы, пока количество выделяющихся газов разложения достаточно велико. Пламя сначала растет, так как с разогревом частицы этим пламенем она начинает быстрее выделять летучие. Потом светящееся пламя летучих начинает спадать и совсем исчезает, когда летучие полностью вышли и осталась лишь прогретая горением летучих углеродная частица кокса, быстро раскаляющаяся от собственного тепловыделения при начавшемся реагировании с кислородом. При достижении раскала частица окружается полупрозрачным синеватым пламенем окиси углерода. Выделяющаяся окись углерода смывается потоком воздуха и в основном догорает за частицей в кормовой ее области. Одновременно сама частица начинает заметно уменьшаться в объеме и полностью газифицируется до золотого остатка<sup>45</sup>.

Наблюдения над поведением отдельных частиц показывают, что даже чисто углеродная частица при большом расcale охотно выделяет окись углерода, которая вступает затем в смесеобразование с воздушным кислородом и при подходящих условиях сгорает в углекислоту.

Первичная частица свежего твердого топлива проходит, таким образом, ряд последовательных стадий. Прогреваясь, она сначала выделяет летучие, т. е. коксуется, а затем уже вступает в процесс в виде чисто углеродной частицы, которая сама продолжает газифицироваться, превращаясь в окись углерода и углекислоту\*.

## 5. ХОД ПРОЦЕССА ВНУТРИ СЛОЯ ГОРЯЩЕГО ТОПЛИВА

Итак, следует отказаться от примитивных представлений о том, что поверхность твердого топлива непосредственно реагирует с кислородом воздуха, который сжигает это топливо в углекислоту и водяные пары. Само по себе твердое топливо представляет лишь первичный «сырой» материал, который должен пройти достаточно сложную предварительную обработку, перейти в газообразное состояние и после цепи промежуточных превращений войти в окончательное смесеобразование, обеспечивающее при наличии достаточно высоких температур его окончательное сгорание.

Если слой работает по схеме на фиг. 64, при которой частицы твердого топлива подаются сверху и постепенно, по мере выгорания, спускаются вниз, а поток воздуха движется навстречу этому топливу снизу вверх, то слоевой процесс может быть разделен на несколько последовательных зон. Первой зоной, через которую проходит воздух, является колосниковая решетка. Чугунные колосники нагреваются от горящего слоя и передают тепло холодному воздуху, нагревая его и тем самым охлаждаясь до

\* Следует вспомнить фиг. 14 и характер взаимодействия углеродной поверхности с воздушным кислородом, описанный в гл. 6.

температуры, допустимой для работы металла. Второй ступенью воздухоподогрева становится зона шлаков, которые, стекая с раскаленных кусков кокса в жидком состоянии и двигаясь, таким образом, навстречу воздуху, остывают и затвердевают непосредственно над колосниковой решеткой. Это также взаимно полезные процессы, так как шлаки, если они успевают дотечь в жидком виде до самой решетки, могут залепить прозоры между колосниками и прекратить в этом месте доступ воздуха в слой. Это опасно для решетки, так как она может перегреться сверх нормы, перестав охлаждаться проточным воздухом, и выйти из строя. С другой стороны, процесс остывания и затвердевания шлаков над решеткой за счет проточного воздуха приводит к дальнейшему его подогреву, т. е. к еще большей активизации воздуха при вступлении в зону раскаленного кокса, где уже начинается активное и массовое протекание химических реакций, сопровождающееся значительным выделением тепла. Именно в этой зоне температура газоздушного потока резко поднимается и достигает своего наибольшего значения. Следующей (верхней) слоевой зоной является зона свежего топлива, в которой куски топлива, омываемые очень горячими газами, прогреваются, сохнут, выделяют водяные пары, и, наконец, начинают проходить период теплового разложения, выдавая газы разложения в газоздушный поток, протекающий через слой. В случае большого содержания в топливе влаги и летучих (древесное топливо, торф, бурые угли) температура в этой верхней зоне заметно снижается по сравнению с предыдущей коксовой зоной и тем сильнее, чем толще слой свежего топлива. Снижение, как понятно, вызывается значительными расходами тепла на предварительный прогрев, подсушку и разложение молекул топлива\*.

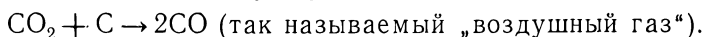
Таким образом, в рассматриваемой нами встречной слоевой схеме\*\* важнейшую роль в развитии процесса играет зона раскаленного кокса, в которой впервые по ходу воздушного потока возникают химические реакции между кислородом и углеродом. Раскаленный углерод проявляет исключительную способность к газификационным процессам даже при сравнительно неблагоприятных условиях газификации в воздухе отдельной частицы. В самых тщательных опытах, известных в литературе, в которых по возможности устранялись посторонние побочные явления, затемняющие картину явления, было установлено, что раскаленный углерод при «горении» переходит в газообразное состояние в виде 50-процентной смеси окиси углерода и углекислоты при температурах, не превышающих

---

\* Впрочем, некоторые виды теплового разложения сопровождаются не поглощением, а выделением тепла.

\*\* Считается, что в этом случае мы имеем дело с неподвижным слоем, через который продувается поток воздуха. На самом деле топливо, выгорая, медленно опускается вниз со скоростью порядка десятков миллиметров в час, в то время как воздух движется снизу навстречу топливному «потoku» со скоростью порядка сотен миллиметров в секунду.

1 200° С, а при достижении температур свыше 1 600° С выход окиси углерода превышает выход углекислоты в 2 раза. Таким образом, раскаленный углерод, взаимодействуя с кислородом при высоких температурах, не столько «горит», сколько «газифицируется». Это понятно, если вспомнить, что молекула углекислоты (СО<sub>2</sub>) обладает устойчивостью только при сравнительно умеренных температурах и охотно теряет ее в присутствии раскаленного углерода, захватывая лишний атом этого углерода и раскисляясь в окись углерода по уже приводившейся схеме



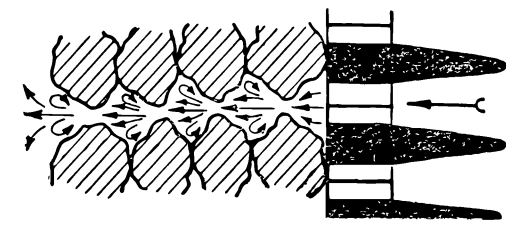
## 6. ХОД ПРОЦЕССА В ЕДИНИЧНОМ МЕЖКУСКОВОМ КАНАЛЕ СЛОЯ

Постараемся разобраться в том, какова роль слоевых межкусковых каналов в смесеобразовательных процессах. Для этого обратимся к схемам на фиг. 66.

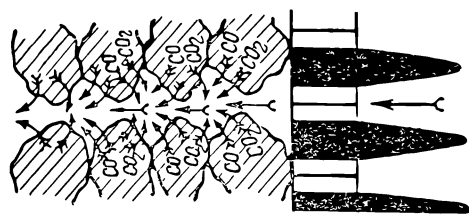
На первой схеме (а) представлен общий характер движения газоздушного потока в условно выделенном единичном межкусковом канале. Очертания такого канала на самом деле еще более произвольны и сложны, чем это изображено на схеме. Однако характерно то обстоятельство, что потоку воздуха и газа приходится то пробираться через узкие щели, то попадать в сравнительно просторные полости между кусками топлива. Это неизбежно приводит к отрыву струй от «стенок» внезапно расширяющегося канала и местным завихрениям с созданием маленьких местных зон циркуляции газа. Если внимательно вспомнить все, что говорилось о газовых горелках, будем вынуждены прийти к выводу, что такой тип каналов самой природой создан для возникновения достаточно устойчивого фронта воспламенения даже при значительных скоростях потока.

Если представить себе, что по такому извилистому каналу движется готовая однородная смесь, то возникающий в канале процесс будет подобен процессу горения готовой горючей смеси в слое кускового огнеупора; такой процесс охотно используют в технике так называемого «беспламенного» горения. В последнем случае кусковой каменный слой играет роль насадки, хорошо обеспечивающей в раскаленном состоянии устойчивость фронта воспламенения (и даже завершение всего процесса сгорания смеси, если она содержит достаточное количество кислорода).

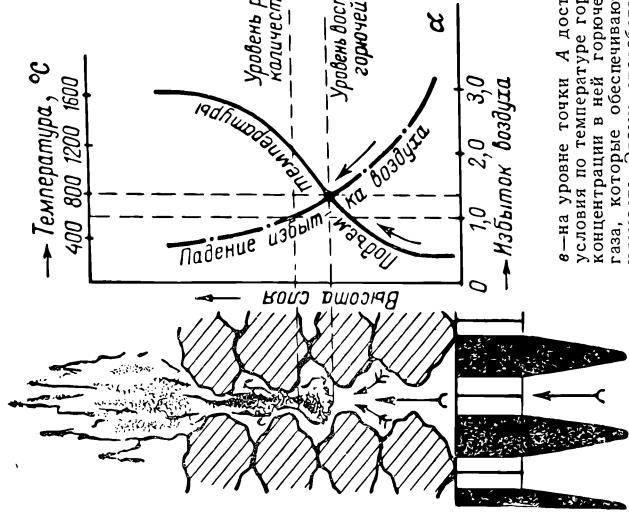
Раскаленные куски кокса обладают еще большей способностью «поджигания» горючей смеси, так как раскаляются не за счет чужого тепла, а сами активно выделяют тепло. Устойчивость («стабилизация») фронта воспламенения горючей смеси, движущейся по межкусковому каналу, обеспечивается и возвратными местными потоками высокотемпературного газа в зонах местной циркуляции. Разница же в живом топливном слое по сравнению с каменной кусковой насадкой заключается прежде всего в том, что этот слой является одновременно не только



а — газовоздушный поток движется по извилистому то сужающемуся, то расширяющемуся каналу. При его внешнем расширении струя отрывается от стенок и образует вихри с малыми циркуляционными зонами и обратным движением газа.



б — при движении воздуха в раскленной зоне кокса возникают реакции кислорода с углеродом, идущие с выделением газа и тепла и образующие топливный газ из смеси окиси углерода, углекислоты и воздушного азота. По мере движения вверх поток насыщается топливным газом, приближаясь к расчетному соотношению ( $\alpha = 1$ ) и быстро разогреваясь.



Температура,  $^{\circ}\text{C}$   
400 800 1200 1600

Уровень расчетного количества воздуха

Уровень воспламенения горючей смеси

Избыток воздуха  $\alpha$   
0 1,0 2,0 3,0

ные зоны циркуляции высокотемпературного газа, поджигающие выходящую горючую смесь. На этом уровне (точка А, подзаглавие первичного фронта воспламенения) приводит к переобогашению смеси топливным газом и недостатку воздуха. Вторичное смешение выносятся за пределы слоя за счет вторичного воздуха, который вводится в виде сознательно полазаемого в топочное пространство, острого дутья, либо подсаживается за счет разрежения в топочном объеме и неплотностей в топочной камере и в самом слое в виде местных прогаров.

Фиг. 66. Характер протекания процесса газификации и горения в отдельном межкусковом канальце топливного слоя.

средством обеспечения устойчивости фронта воспламенения, но и производителем самой горючей газовой смеси.

Поток воздуха, предварительно прогретый при проходе через колосниковую решетку и шлаки, попадает затем, прежде всего, в зону раскаленного кокса, где воздух впервые начинает менять свой состав за счет выделения углеродом первичного топливного газа в виде смеси окиси углерода и углекислоты. Так как температура раскала растет вверх по коксовой зоне, то чем выше пробирается газовый поток, тем быстрее он обогащается окисью углерода. Примерно уже на высоте двух-трех рядов кусков топлива, как показывает опыт, образующаяся первичная горючая смесь приближается к расчетному соотношению, т. е. к коэффициенту избытка воздуха, равному единице, прогреваясь при этом до таких температур, которые соответствуют пределам ее воспламенения.

Это и имеет место в любом межкусковом канале, раскаленные стенки которого и местные мелкие обратные вихри горячего газа хорошо способствуют возникновению устойчивого фронта воспламенения даже при значительных тепловых нагрузках слоя. Такой ход процесса показан на схемах *б* и *в* фиг. 66, а справа на той же фигуре повторена диаграмма с кривыми роста температуры и падения избытка воздуха в потоке\*.

## 7. СЛОЙ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ СИСТЕМУ МНОГОЧИСЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

Итак, углеродному (коксовому) межкусковому каналу, продуваемому в разожженном состоянии потоком воздуха, следует приписать свойство производить топливный газ (в виде смеси  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ), образовывать горючую смесь этого газа с воздухом и, наконец, создавать устойчивый фронт воспламенения этой смеси, на уровне которого, как и во всех других случаях, оказываются уравновешенными встречные скорости: поступательная скорость газовоздушного потока и обратная ему по направлению скорость распространения пламени образующейся первичной горючей смеси. Следовательно, каждый отдельно взятый межкусковый канал обладает всеми свойствами газовой горелки, а весь слой представляет собой целую систему таких горелок, постоянно во множестве самовыгорающих и возникающих заново.

Такое представление о роли слоя в топочном процессе ничего не меняет в данном нами ранее определении любого топочного устройства, являющегося сочетанием системы горелок с присоединенной к ним топочной камерой. Описанный нами процесс газификации углерода, охотно идущий даже в тонких слоях раскаленного кокса (или графита), особенно глубоко развивается при достаточной высоте слоя, при которой слоевой процесс переходит в область явного недостатка воздушного кислорода. Такой

\* Для простоты изображения шлаковая зона на схемах не показана.

прием становится средством промышленного приготовления горючего газа, получившего в огнетехнике широкое применение. Слоевые «газогенераторы», производители такого газа, ничем, кроме значительно увеличенной толщины слоя, не отличаются по принципу организации процесса от слоевых топок полного сжигания. Однако по мере значительного остывания газоздушного потока в верхних участках слоя процесс перевода углерода в газообразное состояние (окись углерода) постепенно замирает. Это возмещается тем, что свежее топливо, лежащее в верхней части слоя и подвергающееся усиленной тепловой обработке потоком горячих газов, выдает в этот поток газы разложения своих первичных органических молекул, качественно меняя состав образующегося газа присоединением к нему горючих водородистых газов\*. Этим газам входит в состав потока тем больше, чем богаче первичное топливо содержанием летучих, т. е. чем беднее его коксовая основа углеродом, что, как мы знаем, особенно свойственно молодым сортам твердого топлива: древесины, торфу, бурным углям. Чем больше содержание летучих в топливе, тем рыхлее, пористее получается кокс, тем больше оказывается развитой его поверхность реагирования. Этим и следует в основном объяснить повышенную реактивную способность коксов молодых топлив и в особенности древесного и торфяного\*\*.

Теперь мы считаем полезным несколько уточнить ходячее утверждение о том, что топливо загорается тем легче и охотнее, чем больше в нем содержится летучих. Действительно, когда разжигается такое старое, отощенное топливо, как антрацит, розжиг ведут на каком-нибудь более «молодом» каменном угле, богатым летучими. И сам каменный уголь с достаточно большим количеством летучих предпочитают для ускорения разжигать дровами. Но все это относится к самым начальным, неустановившимся стадиям топочного процесса. При уже установившемся горении твердого топлива роль летучих в развитии процесса весьма различна и зависит от применяющейся схемы питания этого очага топливом и воздухом.

Так, в рассматриваемой нами встречной схеме питания при подаче воздуха снизу, а топлива сверху летучие вовсе не начинают процесса и вступают в него в самую последнюю очередь. Процесс смесеобразования начинается, как мы видели, снизу, когда поток воздуха вступает в активную коксовую зону, вы-

---

\* Водород может появиться в составе топливного газа и в коксовой зоне, где куски топлива уже лишены летучих, если в воздушном дутье содержатся водяные пары. Получается он за счет раскисления молекул воды и одновременной газификации атомов углерода по приводившейся ранее (см. § 5 гл. 3) схеме:



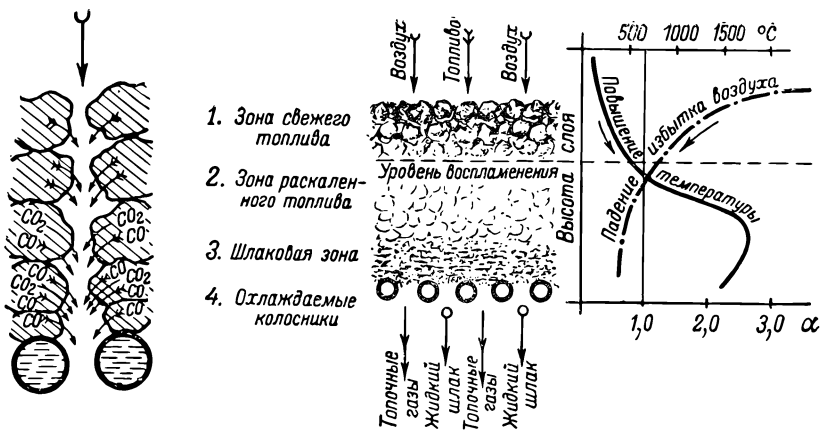
\*\* Повышенная реактивная способность торфяных коксов приписывается также наличию в них некоторых минеральных примесей, играющих роль ускорителей (катализаторов) химических реакций.

дающую в этот поток горячий «воздушный газ» в виде окиси углерода с примесью углекислоты. Эта горючая газоздушная смесь и начинает весь процесс, образуя на известном уровне начальный фронт воспламенения такого газа внутри коксовой зоны по разобранной нами ранее схеме. Дальнейший ход процесса за этим фронтом, т. е. в верхних участках слоя, приводит к явному переобогащению потока топливным газом и тем большему чем больше летучих выделяется свежим топливом в этот поток. Таким образом, в рассматриваемом случае зона выделения летучих топлива лежит за зоной первичной газификации и за пределами первичного фронта воспламенения, что не дает им возможности принять непосредственное участие в начальных стадиях процесса. Однако количество содержащихся в топливе летучих оказывает серьезное косвенное воздействие на начальное развитие процесса характером и количеством образующегося кокса. Чем больше в топливе летучих, тем меньше оказывается коксовый остаток, тем, следовательно, слабее развитие коксовой зоны (запас углерода в ней). Однако до известной меры это существенно возмещается повышенной реактивоспособностью неплотного, пористого кокса, легко вступающего в первичный процесс газификации углерода, производящего  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  и тем самым быстро развивающего температурный эффект в слое за счет поглощения воздушного кислорода. Сами же летучие опаздывают к развитию огневого процесса, производя скорее «тушащее» действие, т. е. выводя состав переобогащенной смеси за желательные пределы воспламенности.

При таком ходе продолжение огневого процесса за счет подслоного «первичного» воздуха становится уже невозможным и переносится в топочное пространство, если в нем обеспечены сознательно предусмотренные или случайно возникшие источники добавочного («вторичного») воздуха (кислорода). Совершенно другая роль в развитии огневого и газификационного процессов возникает у летучих при так называемой «обращенной» параллельной схеме питания слоевого очага, показанной на фиг. 67.

В этом случае и топливо и воздух подаются сверху и оба потока движутся вниз. Колосники, подвергающиеся воздействию высокотемпературных газов, должны охлаждаться проточной водой.

В этом случае зона первичного прогрева свежего топлива и, следовательно, зона выделения летучих топлива предшествуют коксовой зоне по ходу газоздушного потока. Поэтому летучие раньше кокса вступают в процесс смесеобразования и создают с воздухом горючую смесь своеобразного состава, богатую водородистыми горючими составляющими. Смесь эта прогревается и достигает необходимых расчетных соотношений раньше вступления углерода топлива в активный газификационный процесс. Воспламеняется она уже на подступах к коксовой зоне, создавая подобно предыдущему случаю устойчивый фронт воспламене-



а — схема смесеобразования в единичном межкусковом канальце.

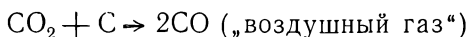
б — общая схема слоя с основными зонами. Справа кривые падения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и повышения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) сверху вниз по толщине слоя.

Фиг. 67. Обращенная параллельная схема питания слоя — воздух и топливо подаются сверху.

ния, не боящийся высоких тепловых нагрузок слоя. Углеродистая же зона становится в этом случае переобогастителем смеси топливным газом, так как в ней подобно предыдущему развиваются раскислительные реакции с высокотемпературной газификацией углерода по схемам



и



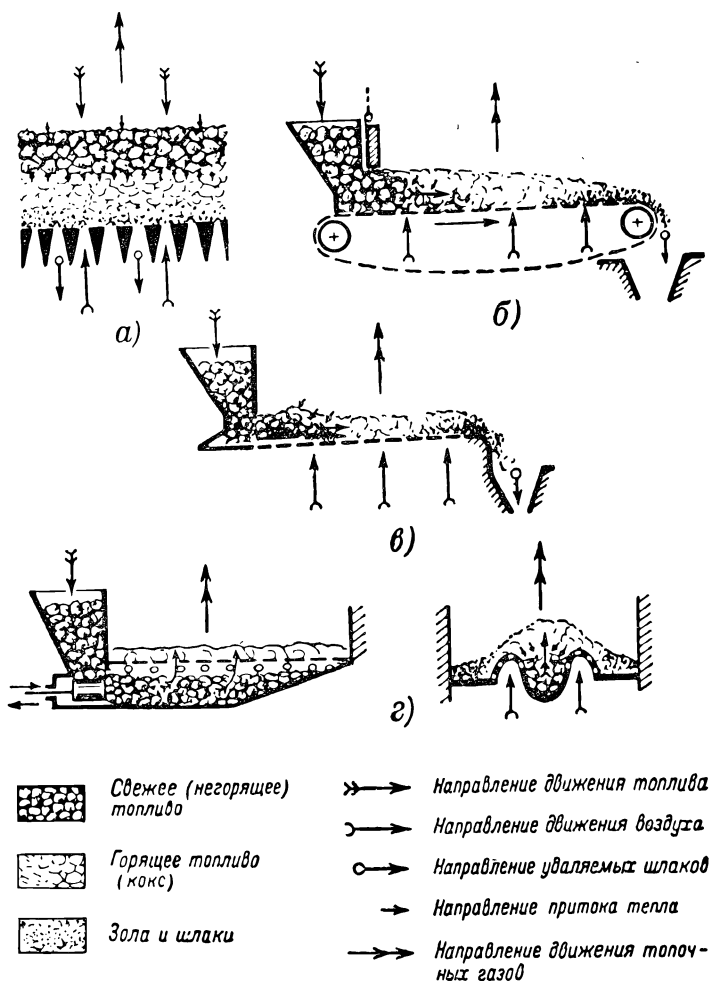
и другие возможные аналогичные реакции. Получающийся при этом топливный газ, насыщенный окисью углерода и другими горючими, должен сжигаться в специальном топочном пространстве за счет смесеобразования со вторичным воздухом.

## 8. РАЗЛИЧНЫЕ СХЕМЫ ПИТАНИЯ СЛОЕВЫХ ТОПОК

На этих примерах мы убедились в существенной разнице в ходе слоевого процесса в зависимости от избранной схемы питания слоя топливом и воздухом. Схемы эти могут быть чрезвычайно разнообразны. Наиболее характерные из них, широко применяемые в практике слоевого сжигания, приведены на фиг. 68.

На фиг. 68,а повторена для сопоставления уже подробно разобранный встречная схема питания слоя (топливо подается сверху, воздух — снизу). Она еще до сих пор пользуется широкой популярностью в практике слоевого сжигания, так как обладает широкой универсальностью в смысле применимости к са-

мым различным сортам твердого топлива. Иногда такую схему называют «схемой неограниченного зажигания», что нельзя признать удачным. Ограничения наступают при очень больших влажностях или зольностях топлива, если горючая масса содержит много летучих (дрова, торф, бурые угли) и, следовательно, бедна коксовой основой. При чрезмерной влажности и большом выходе летучих с 1 кг такого топлива выходит так мало кокса,



Фиг. 68. Схемы питания слоевых очагов горения.

- а — встречная схема. Простая колосниковая решетка с ручным забросом топлива сверху. Воздух подается снизу.
- б — поперечная схема. Слой движется на поверхности подвижной цепной решетки. Подача топлива — с торца слоя, подача воздуха — снизу, под слой.
- в — поперечная схема. Слой периодически перемещается по поверхности неподвижной решетки при помощи шурующей планки треугольного сечения, движущейся взад и вперед.
- г — параллельная схема. Слой ретортной (корытной) топки периодически выталкивается специальным толкачом или шнеком (червяком) из корыта на решетку. Подача топлива и воздуха — снизу, под горящий слой.

что недоразвитая коксовая зона уже не в состоянии справиться со своей первичной задачей обеспечения устойчивого фронта воспламенения, равно как и с последующей задачей по удовлетворению тепловых расходов зоны предварительной обработки свежего топлива. В этом случае такая зона оказывает на внутрислоевые процессы особенно сильное «тушащее» воздействие резким и значительным охлаждением газозвдушной смеси, движущейся кверху через межкусковые каналы. Нельзя, однако, отрицать, что при умеренной влажности, не превышающей 30—35%, топки, работающие по встречной схеме, обеспечивают особенно ускоренную подготовку свежего топлива, которое, лежа на раскаленном слое кокса, подвергается усиленному воздействию тепла, вносимого в зону предварительной тепловой подготовки твердого топлива высокотемпературным газом, производимым коксовой зоной.

Ограничения по зольности возникают по другим причинам, хотя высокое содержание золы также ограничивает запас углерода в коксовой зоне. Основной бедой для бесперебойного протекания процесса по встречной схеме является систематическое накопление шлаков в самом слое, требующее периодического их удаления, тем более частого, чем больше в топливе золы и чем сильнее она шлакуется, переходя в расплавленное или липкое состояние под воздействием высоких температур коксовой зоны. Такого рода операции (чистка решетки) не только утяжеляют труд кочегара, но и вызывают частые перебои в работе топки как по производительности, так и по экономичности.

Здесь мы сталкиваемся с весьма важной современной проблемой механизации обслуживания топочных процессов при сжигании твердого топлива, практически не возникающей при применении газообразного и жидкого топлив.

Чтобы освободить кочегара от необходимости применения тяжелого ручного труда, необходимо механизировать три его операции, осуществляемые при работе на топках с ручным обслуживанием:

- 1) подачу топлива в слой;
- 2) шурование слоя в целях борьбы со спеканием кокса (при спекающих углях) и образованием плотных шлаков\*;
- 3) удаление твердых очаговых остатков.

Механизмы, применяемые для этой цели в топках слоевого типа, оказываются, как правило, чрезвычайно промоздкими и недолговечными в ряде элементов, подвергающихся сильному воздействию протекающих в топке высокотемпературных процессов. Длительная история попыток механизации обслуживания топок, работающих по встречной схеме, привела к мало утешительным результатам. Всякая механизация должна быть основа-

---

\* Оба явления приводят к неравномерной воздухопроницаемости слоя (неравномерному распределению сопротивления прохождению через слой газозвдушного потока), расстройству процесса смесеобразования в межкусковых каналах и, следовательно, расстройству процесса горения.

на на принципе поточности, т. е. на одновременно осуществляемой непрерывности протекания каждого последовательного процесса. В этом отношении при встречной схеме встретились особенные затруднения в организации непрерывного шлакоудаления из слоя из-за свойственного этой схеме накопления шлаков, засоряющих слоевой процесс и затрудняющих доступ воздуха в слой в необходимом количестве (за счет роста сопротивления слоя). Все применяемые до сих пор средства механизации встречной схемы\*, столь универсальной с огнетехнической точки зрения, немедленно приводят к потере этой универсальности, делая механические топки этого типа работоспособными лишь на определенных сортах не слишком сильно шлакующегося и не слишком влажного топлива.

Не раз уже предпринимались попытки организации слоевых процессов при удалении шлаков из слоя при жидком, перегретом их состоянии, невозможном при встречной схеме вследствие того, что шлаки, стекая навстречу воздушному потоку, охлаждаются и застывают еще в пределах слоя. Для жидкого шлакоудаления, казалось, могла бы быть наиболее приспособленной уже упоминавшаяся «обращенная» схема параллельного питания слоя (топливо и воздух подаются сверху вниз, на слой). Однако до сих пор удовлетворительной реализации эта схема не получила.

Наиболее логично принцип поточности, обеспечивающий развитие механизированных способов обслуживания, осуществляется на слоевых решетках с принудительным движением слоя. На фиг. 68,б показана слоевая цепная решетка, представляющая собой разновидность ленточного транспортера, полотно которого набирается из чугунных колосников, укрепленных на цепях (вроде цепей велосипедного типа). Вся лента движется от привода в определенную сторону, неся на себе слой выгорающего топлива. При таком устройстве осуществляется «поперечная» схема питания: воздух подается снизу поперек горизонтального потока топлива. Так как тепло для предварительной обработки свежего топлива, медленно вползающего на решетке в топочную камеру, подается сверху (излучением пламени и раскаленных стен топки), причем оно также медленно передается внутренним кускам слоя сверху вниз против потока воздуха, то разогрев нижних частей слоя опаздывает по сравнению с верхними и идет по косой поверхности по отношению к горизонту. Свежее топливо, еще не вступившее в тепловую предварительную обработку с выделением сначала влаги, а затем летучих, образует, таким образом, косой клинообразный слой, над которым так же косо располагается и зона выхода летучих. За граничной поверхностью ее располагается, наконец, зона раскаленного кокса, занимающая примерно центральное положение в движущемся

---

\* Различного типа забрасыватели топлива, качающиеся колосники и т. п.

слое (незаштрихованная зона на фиг. 68 и 69). Таким образом, зона выхода летучих в передней части решетки предшествует (по ходу воздуха) зоне раскаленного шлага. Такое пространственное распределение отдельных зон, работающих одновременно в различных частях решетки, приводит к тому, что поток воздуха в начальной (корневой) части слоя смесеобразует по преимуществу только с летучими, а в центральной зоне — только с раскаленным коксом. Конечная (хвостовая) часть слоя представляет собой зону выжигания шлаков, сбрасываемых цепной решеткой в золовую бункер при перегибе на заднем вращающемся барабане. Плохое питание теплом зоны предварительного разогрева топлива приводит к тому, что сорта топлива, требующие на свой предварительный разогрев много тепла, не получают удовлетворительных условий для протекания слоевого процесса без дополнительных мероприятий (влажные сорта топлив или топлива с малым выходом летучих, начинающих выделяться только при достаточно высокой температуре, в основном — антрациты). Ограничения возникают и с другой стороны: слоевой процесс плохо развивается при сильно спекающихся горючих массах жирных углей или топливах, сильно засоренных шлакующей золой. Это объясняется тем, что из трех основных кочегарских операций в этом случае остается немеханизированной шуровка (шевеление) слоя, и слой, медленно продвигаясь вперед и проходя различные тепловые зоны, перерождается и теряет однородную воздухопроницаемость, которую приходится восстанавливать вручную.

Поперечная схема питания слоя осуществляется и на решетке, изображенной на фиг. 68, в. В этом случае решетка неподвижна, но по ней ходит своеобразный толкач, — шуровка треугольного сечения, получающая от привода возвратно-поступательное движение. Во время движения вперед своим более тупым скосом она проталкивает топливо, питая последующие участки слоя, а при более глубоких ходах — сталкивает выжженные шлаки в задний шлаковый бункер. Одновременно он подрезает и взрыхляет слой, восстанавливая равномерность его воздухопроницаемости. При ходе назад более острым скосом шуровка только еще раз подрезает и подшуровывает слой, практически не возвращая частиц топлива. Схема питания отличается от рассмотренной ранее только известной периодичностью в продвижении слоя, в то время как в предыдущем варианте имелось непрерывное движение его вперед. Наличие механизированного шурования в рассматриваемой схеме позволяет применять такую решетку с «шурующей планкой» и для спекающихся топлив (жирных углей со спекающимся коксом). При некоторых мероприятиях решетка становится применимой и для влажных бурых углей.

Простота и дешевизна механизма, в известной степени освобождающего от применения ручного труда все три кочегарские операции, делают эту топку применимой для недорогих топочных устройств сравнительно малого масштаба. Применение «шурую-

щей планки» к широким топкам большой производительности встречается затруднения в сооружении такой планки, которая не боялась бы не только воздействия высоких температур, но и возможных перекосов, приводящих к ее заклиниванию и поломке.

На фиг. 68,г показана топка с нижней подачей топлива и воздуха («прямая» параллельная схема питания). Топливо заводится в корыто (или несколько корыт), расположенное ниже уровня колосниковой решетки, и проталкивается оттуда специальным толкачом (или системой толкачей) вперед по корыту и вверх под горящий слой. Короткая зона тепловой обработки свежего топлива возникает над самым корытом. Летучие, выделяясь и образуя смесь с воздухом в верхней части корыта, проходят через коксовую «насадку». В пределах этой зоны кокс лишен возможности принять активное участие в процессе, так как весь кислород, поступающий в нее, перехватывается летучими, быстро воспламеняющимися и быстро сгорающими внутри такой насадки. Выделяемое ими тепло приводит к предварительному раскалу кокса, который постепенно выдавливается новыми порциями топлива, принудительно движущимися снизу, перемещается на небольшие, чисто коксовые решетки и вступает в непосредственный контакт со свежим воздухом.

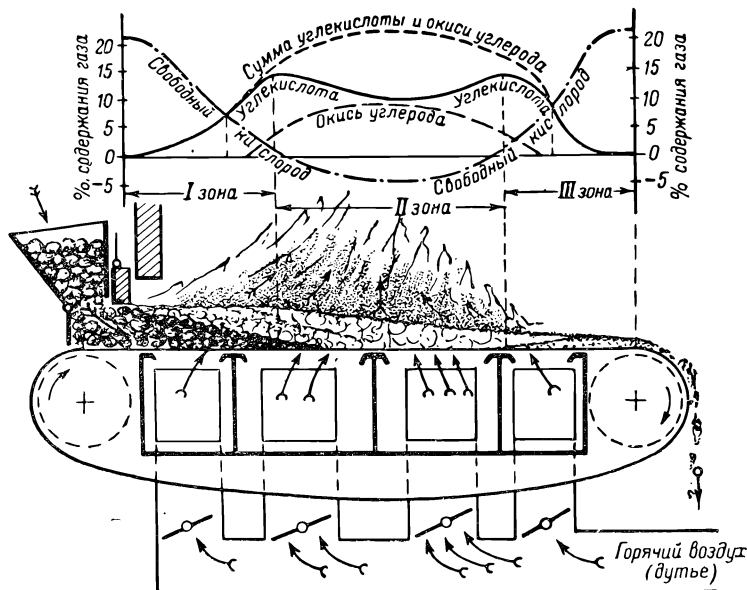
## 9. РОЛЬ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ В СЛОЕВЫХ ТОПКАХ

Во всех приведенных на фиг. 68 примерах организации слоевых процессов с принудительно движущимися слоями возникают, как мы видели, пространственно распределенные по решеткам зоны, действующие одновременно, но качественно отличные по ходу процесса. Это создает известную степень неравномерности в работе слоя по его протяженности, следствием которой может явиться выдача топочных газов неравномерного состава и неравномерной температуры.

Во всех таких случаях должна проявиться роль топочной камеры, присоединенной к слою, которая в первую очередь призвана качественно исправить неравномерную работу слоя. Примером такой значительной неравномерности может служить слоевой процесс на цепной решетке (фиг. 69).

Рассматривая график, помещенный в верхней части фиг. 69, легко убедиться в том, что корневая часть слоя, где только начинают развиваться тепловые процессы, равно как и хвостовая его часть, в которой постепенно заканчивается процесс выжигания шлаков, выдает в камеру ничтожное количество углекислоты, свидетельствующее о ничтожном развитии процесса горения в этих начальной и конечной зонах решетки. Наибольшее количество газифицированного углерода в виде окиси углерода и углекислоты выходит из самой горячей центральной зоны раскаленного кокса, в которой химический процесс газификации углерода идет настолько быстро, что даже при сильном дутье зона успевает поглотить на свои реакции весь воздушный кислород, и ее

работа всегда характеризуется недостатком воздуха. Любопытно, что кривая углекислоты над этой зоной имеет достаточно глубокую впадину, которая объясняется тем, что значительная часть углекислоты успевает раскислиться в раскаленном слое кокса и превратиться в окись углерода. Именно в этой, наиболее высокотемпературной и, следовательно, химически наиболее активной зоне и достигается наибольший выход из слоя окиси углерода.



Фиг. 69. Схема выгорания слоя топлива на цепной решетке.

I зона розжига. Постепенно горение сверху распространяется внутрь слоя (воздух поступает снизу, поджигающее тепло — сверху). Поверхность раздела между темными и светлыми кусками топлива является поверхностью начала выделения летучих (газа разложен я). Вблизи этой поверхности возникает такой же косой фронт воспламенения образующейся горячей смеси летучих и воздуха. Через еще неполовностью охваченный горением слой в этой зоне проходит много избыточного воздуха. Вторая косая граница, за которой изображена незаштрихованная область, представляет собой начало выхода чистого кокса, уже лишённого летучих.

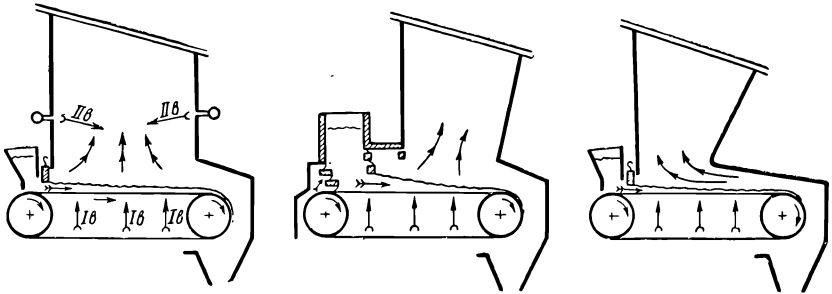
II зона активного горения и газификации раскаленного кокса. Проходящий через зону воздух газифицирует углерод, превращая его частично в углекислоту, а в еще большей мере — в окись углерода. В этой зоне всегда наблюдается значительный недостаток воздуха. Наиболее теплопроизводящая зона, в которой вследствие развиваемой в слое высокой температуры химические реакции значительно обгоняют скорость подачи воздуха.

III зона выжига шлаков. Остатки углерода в шлаках догорают под воздействием поступающего в зону воздуха. Много свободного избыточного кислорода проходит через шлаковый слой.

Таким образом, по самой природе процесса на цепной решетке центральная, самая теплопроизводительная часть слоя характеризуется постоянным и естественным недостатком воздуха, в то время как начальная и конечная зоны слоя выдают неиспользованный избыточный воздух в значительных количествах. По этой причине краевые зоны надо притормаживать по подаче

воздуха, в то время как основное количество воздуха следует вдвухивать в центральную, активную часть слоя в соответствии с заданной общей теплопроизводительностью топки. Этим и объясняются необходимость и целесообразность применения позонного дутья, которое должно обеспечивать каждую зону по ее потребности в воздухе.

Неравномерность состава газа, выходящего из слоя в топочное пространство, может быть умерена, но не устранена. Вырав-



а — топочная камера со вторичным острым дутьем над цепной решеткой для каменного угля.

б — топочная камера над цепной решеткой, снабженной ступенчатым предтопком для сырого кускового торфа.

в — топочная камера для антрацита с вытянутым сводом, прижимающим горячие газы, поступающие из коксовой зоны, к корню слоя (зоне розжига).

Фиг. 70. Различные очертания топочных камер в топках с цепными решетками для кускового твердого топлива.

нивание состава топочных газов должно достигаться уже за счет работы топочной камеры. Этой камере нередко придают ломаные очертания для создания суженных внутритопочных «горловин», назначением которых является усиление смесеобразования горячих топливных газов с потоками, несущими неиспользованный избыточный воздух. С еще большим успехом можно добиться усиления вторичного смесеобразования за счет продуманно выполненного «острого дутья» вторичного воздуха, создающего энергичные местные очаги перемешивания уже в топочном объеме (фиг. 70,а).

Для усиления тепловой работы подготовительных зон в корневой части топливного потока, если топливо этого требует, применяются различные приемы. Самым рациональным, казалось бы, было бы применение горячего воздуха, подогретого за счет уходящих (отбросных) газов установки в специальных воздухоподогревателях, широко применяемых в котельной практике. Однако температура подогрева сильно ограничивается опасениями за недостаточное в этом случае охлаждение металлических частей дорогой и сложной решетки, почему подогрев воздуха в топках слоевого типа далеко не достигает желательных величин.

Для влажных топлив обычно применяются ступенчатые предтопки. На этих предтопках неподвижная часть топлива, за-

держанная каждой ступенькой, создает мелкие очажки горения, работающие по устойчивой системе встречной схемы питания (фиг. 70). Горячие газы сгорания, образующиеся на ступеньках, пробираясь через слой, движущийся самотеком (под действием собственной силы тяжести), усиливают до необходимой степени предварительную тепловую обработку топлива даже при умеренных степенях предварительного подогрева воздуха, а в отдельных случаях — и без всякого подогрева.

При сжигании антрацитов, обладающих небольшой влажностью, но требующих длительного предварительного прогрева для начала выхода летучих и полного выкоксования топлива, ступенчатые колосники оказались неприменимыми, так как металл ступеней, поджигаемый очажками нижних ступеней, быстро выгорает сам. Обычно для усиления притока тепла к корневой зоне антрацитового слоя на цепной решетке значительно развивают задний свод топки, прямым назначением которого является прижимание наиболее горячих газов, выдаваемых коксовой зоной, к начальным участкам слоя (фиг. 70). Это принудительное направление центральных газов к начальной зоне, плохо использующей воздушный кислород, полезно и для возникновения над подготовительной тепловой зоной сравнительно активного перемешивания газовых потоков с избытком и недостатком воздуха. Все такие места перемешивания избыточного кислорода с горючими газами становятся вторичной, внеслоевой ступенью очага горения и способствуют не только выравниванию состава и температуры покидающих топку газов, но и достижению большей полноты сгорания (тепловыделения).

Как уже отмечалось, слоевые способы сжигания твердого топлива трудно поддаются механизации обслуживания, которая принимает здесь громоздкие формы и вынуждает применять внутритопочные механизмирующие устройства, делая их ненадежными и недолговечными. В большинстве случаев полная механизация далеко не достигается и требуется применение дополнительного ручного труда. Сложные конструкции применяемых механизмов по дороговизне первичной стоимости и их эксплуатации оказываются неэкономичными для мелких энергетических установок и неприемлемыми по громоздкости и ненадежности для наиболее мощных современных установок.

В связи с этим техника сжигания твердых топлив все больше отстает от недостаточно совершенных слоевых методов и создает более рациональные для современной практики способы бесслоевого внутрикамерного сжигания твердого топлива в воздушном потоке.

---

---

## Глава двенадцатая

### СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ЛЕТУ

#### 1. ФАКЕЛЬНОЕ ГОРЕНИЕ ПЫЛЕОБРАЗНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Наиболее современные и культурные формы применения твердого топлива в топочной технике принимает при сжигании его на лету в несущем его газозвдушном потоке.

Чтобы осуществить такое сжигание, необходимо соблюсти основное условие, сводящееся к тому, чтобы газозвдушной поток оказался в состоянии транспортировать частицы твердого топлива через проточную топочную камеру, не давая им оседать и скапливаться в каких-либо частях этой камеры, где их участие в процессе приняло бы нежелательные, неорганизованные формы.

Для этого имеются два основных пути. Первый из них состоит в том, чтобы развить у частиц до необходимого предела несущую их поверхность, достаточную для того, чтобы они взвесьлись в газозвдушном потоке даже при сравнительно умеренных скоростях последнего. Второй состоит в том, чтобы придать потоку столь значительные скорости, при которых он оказался бы в состоянии поднять и нести частицы топлива даже сравнительно тяжелые, крупные, с малоразвитой несущей поверхностью. В последнем случае приходится заботиться о том, чтобы форме внутренней полости камеры и направлению скоростей потока придать такое сочетание, при котором устранялось бы возникновение застойных, непроточных участков, где могли бы выпасть тяжелые частицы, уклонившиеся от общего движения по топочному объему.

Идея сжигания твердого топлива в сильно размельченном, пылеобразном состоянии известна издавна. Однако широкое осуществление в промышленной топочной технике она получила лишь в 20-х годах настоящего столетия, когда появились надежные системы мельниц для трудно мелющихся веществ. Пылеугольный процесс ничем принципиально не отличается от факельного процесса сжигания газообразного или распыленного жидкого топлива. Проще всего он организуется при прямоточном движении пылеобразных частиц вместе с несущим их потоком, т. е. при однократном полете этих частиц через камеру. Если ча-

стицы настолько размельчены, что сильно развитая несущая поверхность (поверхность сопротивления) практически затормаживает их самостоятельное движение в газовой среде, в силу чего они движутся послушно в том направлении и с теми скоростями, которые приданы несущему их потоку, — то время пребывания этих частиц в топочной камере будет определяться скоростью самого газоздушного потока, обычно пролетающего через топку в 1—2 сек. Тогда выгорание пылеобразных частиц будет зависеть от того, хватает ли этого времени для перевода их твердого вещества в газообразное состояние. Если время газификации этих частиц меньше времени их пребывания в топочном объеме, то легко добиться, чтобы сгорание топливного вещества осуществлялось полностью в пределах топки и полнота тепловыделения топлива достигала 100%. При обратном соотношении полное сгорание оказывается невозможным, полнота тепловыделения соответственно снижается и топка выдает топочные газы с содержанием недогоревших горючих газов (так называемый «химический недожог», вызываемый несовершенным смесеобразованием в самой топочной камере) и негазицировавшихся до конца твердых частиц (так называемый «механический недожог», вызываемый не столько неудовлетворительным смесеобразованием в топочной камере, сколько недостаточно высокими местными температурами, замедляющими ход газификации твердого топлива).

Понятно само собой, что при одинаковых температурных условиях скорее газифицируются более мелкие частицы одного и того же топлива, а при топливах с различным содержанием летучих газификация одинаковых по размеру частиц пойдет быстрее при легче разлагающемся, более «молодом» топливе с большим выходом летучих и более реактивоспособным коксовым остатком, содержащим меньше твердого углерода и менее плотным. По этой причине пыль бурых углей может быть грубее пыли каменных углей, а при факельном сжигании антрацита число грубых частиц в пыли должно быть особенно невелико.

Тонина помола угольной пыли контролируется специальными ситами, из которых наиболее ходовыми в практике пылесжигания являются сита с отверстиями 88 микрон (основное сито для контроля каменноугольной пыли) и 200 микрон (основное сито для контроля буроугольной пыли)\*. Чтобы пыль удовлетворяла условиям факельного процесса, необходимо остаток грубой пыли на таких ситах нормировать соответствующими умеренными пределами.

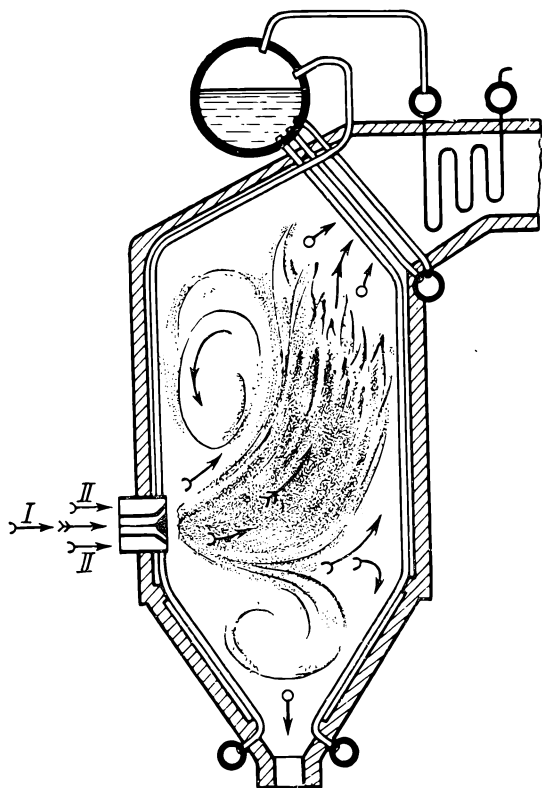
Однако это необходимое мероприятие никак нельзя считать достаточным для обеспечения полноты выгорания, вернее, полноты газификации твердых пылинок. Основное заключается в том, какие температурные зоны проходит пыль, пролетая по топочному объему в воздушной среде.

---

\* Микрон — единица длины, равная одной тысячной миллиметра.

На фиг. 71 показан разрез современной пылеугольной топки с сильно развитой протяженностью топочной камеры, стены которой покрыты холодными трубчатыми пароводяными экранами (испарительными поверхностями нагрева).

В свое время именно пылесжигание вызвало необходимость возникновения таких экранов как эффективного средства борьбы



Фиг. 71. Схема пылеугольной топки под паровым котлом.

Активным процессом занята лишь центральная часть топочной камеры. Значительные участки объема заполняются мало производительными паразитическими вихрями местных слоев воздушного и газового потоков (холодная, сильно экранированная топка). В центре факела обычно возникают недостаток воздуха ( $\alpha < 1$ ) и растянутая зона газификации. Вокруг факела — зона избытка воздуха ( $\alpha > 1$ ), не всгруппированное в активное смешение.

со шлакованием топочных стен летучими жидкими или липкими частицами шлака — остатками сжигаемой угольной пыли. В дальнейшем эти холодные поверхности нагрева были оценены котельщиками и с другой стороны — в качестве наиболее производительных поверхностей нагрева, воспринимающих в единицу времени на каждый квадратный метр примерно в 10 раз больше тепла, чем обычные трубчатые поверхности нагрева, расположен-

ные в газоходах и воспринимающие тепло топочных газов главным образом за счет непосредственного соприкосновения с ними («конвективные» поверхности нагрева).

Наличие таких холодных стен у пылеугольных камер не проходит безнаказанно для развития факельного процесса. Оно приводит к крайне неравномерному распределению температур по сечению камеры, которые оказываются очень высокими в центральных частях потока, удаленных от настенного холода, и сильно заниженными вблизи холодных стен, отнимающих у газа и частиц значительные количества тепла на «прямую отдачу» топки, т. е. на интенсивное лучевосприятие холодных экранных поверхностей нагрева. Та часть пылевоздушного потока, которая проходит через центральные, высокотемпературные зоны топки, вступает в раннее и быстрое газообразование сильно разогреваемых частиц. Остальные, краевые участки пылевоздушного потока, проходя через переохлажденные зоны, вяло участвуют в процессе газификации топлива, а иногда, при неудачных очертаниях топочной камеры и нерациональном сочетании ее с пылеугольными горелками, эта часть пыли даже не успевает вступить в газификационный процесс и выносится в неиспользованном виде в газоходы.

Из изложенного ясно, что центральная, высокотемпературная зона факельного очага горения, быстро газифицирующая топливо и заставляющая вступать образующийся топливный газ в смесеобразование с кислородом воздуха и, следовательно, в химическую реакцию с ним, вызывает быстрое поглощение этого кислорода и переход на работу с недостатком воздуха. Следовательно, эта центральная часть факела склонна к химическому недожогу топлива, т. е. к выдаче при известных неблагоприятных условиях недожженных горючих газов, что вызывает соответствующую неполноту тепловыделения (потерю тепла от химического недожога).

Краевые области потока при переохлаждении склонны к механическому недожогу, т. е. к выдаче недогазифицированных твердых пылинок топлива, что также вызывает соответствующее снижение полноты тепловыделения (потерю тепла от механического недожога). Снижению температурного уровня в краевых областях потока способствует также неудачный ввод вторичного воздуха, создающий пониженное содержание пыли в этих частях потока и приводящее к повышенной суммарной теплоемкости пылевоздушной смеси за счет увеличения в ней количества избыточного воздуха\*.

## 2. ОГНЕВАЯ РАБОТА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ГОРЕЛОК

При факельном сжигании твердого (равно как и жидкого) топлива стремление к предварительному созданию пылевоздушного потока с равномерным распределением пыли нельзя при-

---

\* Желательно вспомнить, что об этом говорилось в гл. 8.

знать целесообразным, так как при этом весь необходимый для полного сжигания воздух сильно увеличит общую суммарную теплоемкость потока и вызовет соответствующее замедление в его прогреве и, следовательно, в развитии предварительных стадий тепловой подготовки топлива к газификации и сгоранию. Поэтому наиболее употребительным и оправдавшим себя приемом устройства пылеугольных горелок является разделение вводимого ими воздуха на два потока: первичного воздуха, несущего пылеобразное топливо, и вторичного воздуха, который должен постепенно вводиться в уже развивающийся процесс в камере сгорания.

В сущности «горелкой» в полном смысле этого слова является лишь та часть пылеугольного горелочного устройства, которая несет в топочную камеру поток первичной пылевоздушной смеси. Именно в этом потоке, как только он получает достаточный разогрев, возникают все последовательные стадии тепловой обработки твердого вещества топлива и прогрев первичного воздуха. Если приток тепла к этой части потока достаточно хорошо обеспечен, то газификационный процесс начинается быстро, в короткие сроки насыщает корневую зону факела топливным газом и доводит образующуюся горючую смесь до воспламенения. Если, как это обычно принято в инженерной практике, относить первичный воздух ко всему топливу, которое оно несет, то коэффициент избытка воздуха для этого первичного потока должен держаться ниже единицы, т. е. работа должна вестись как бы с явным недостатком воздуха. На самом же деле коэффициент избытка воздуха в газовой среде этого потока все время меняется по мере развития газификационного процесса и процесса образования газообразной горючей смеси, начиная со значения, равного бесконечности\*, и быстро приближаясь к единице, т. е. к расчетному соотношению по составу образующейся горючей смеси. Понятно, что он меняется тем быстрее, чем быстрее развивается газификационный процесс. Для этой цели первичный поток должен, с одной стороны, обладать небольшой суммарной теплоемкостью, чтобы требовать поменьше тепла на свой разогрев, а с другой, — обеспечиваться достаточным притоком этого тепла.

Этот приток тепла к корню первичного потока пылевоздушной смеси отчасти может быть получен за счет излучения топочного пространства, но с теми же ограничениями, о которых уже говорилось в гл. 10 в связи с условиями прогрева смеси воздуха с распыленным жидким топливом. Значительно более существенным и действительным становится приток тепла, необходимого для быстрой газификации и образования горючей смеси, когда удастся вернуть часть высокотемпературного газа (продуктов сгорания) к факельному корневищу. Это сразу же сказывается

---

\* Чистый воздух без примеси топливного газа, хотя он и несет в себе еще не начавшую газифицироваться твердую пыль.

на укорочении расстояния между фронтом воспламенения и устьем горелки.

Степень необходимости усиления такого мероприятия зависит от того, насколько легко поддается газификации данный сорт твердого топлива. Первыми в этих условиях вступают в газификационный и смесеобразовательный процесс летучие топлива. Чем легче разлагаются молекулы топлива под воздействием повышенной температуры и отчасти кислорода первичного воздуха, тем скорее образуется необходимая по составу газообразная горючая смесь, тем скорее она воспламеняется, создавая первичный фронт пламени, начинающий всякий поточный процесс. По этой причине легче всего воспламеняются факелы пыли молодых топлив, богатых летучими и легко их выдающими еще на самых ранних стадиях прогрева первичного потока. Труднее всего поддается такому прогреву пылевоздушная смесь тощих топлив (антрацитовая пыль). Небольшое количество летучих в этих случаях начинает выходить только при достаточно высоких температурах, для достижения которых требуется больше времени. Этим и объясняется отрыв фронта воспламенения от устья горелок, доходящий при антрацитовой пыли и плохо организованном притоке тепла до 1—1,5 м. Рассчитывать только на помощь излучения топочной камеры неправильно, так как не следует забывать, что пылинки, освещаемые падающими на них лучами лишь частично и с той стороны, которой они в данный момент повернуты к источнику излучения, практически мгновенно охлаждаются окружающей их теплоемкой газовоздушной средой<sup>46</sup>. Среда эта, отнимающая у твердых пылинок тепло, подобно тому как атмосферный воздух, окружающий землю, будучи теплопрозрачным, отнимает у поверхности земли тепло, излученное на нее солнцем\*. Она требует на себя большого количества тепла, и пока вся пылевоздушная смесь не прогрета, повышение температуры самих пылинок практически невозможно, что крайне задерживает их вступление в газификационный и смесеобразовательный процесс.

Известную роль в предварительном подогреве твердых пылинок играет подогрев воздуха, который при факельных процессах безнаказанно для металлических горелок доводится в настоящее время до 350°С и выше. Ограничения создаются пределами жизнеспособности самих воздухоподогревателей и технико-экономическими соображениями. Однако даже такой сравнительно высокий воздухоподогрев может обеспечить начало выхода летучих и ускоренное создание газообразной горючей смеси только у легко газифицирующихся топлив.

На фиг. 72 показаны разрезы пылеугольных горелок двух типов. Первая горелка (фиг. 72,а), удовлетворительно работает на углях, только легко выделяющих летучие (начало выхода летучих — 200 ÷ 300°С). Применяющийся в ней центральный

---

\* Полезно вспомнить по этому поводу гл. 1.

подвод части воздуха (главным образом, для розжига тóпки на мазуте с форсункой, расположенной в этом канале) противодействует усиленному притоку высокотемпературных газообразных продуктов сгорания, мешая им подойти в достаточном количестве и достаточно близко к устью горелки. Вторая горелка (фиг. 72,б), как показывает опыт, значительно укорачивает расстояние между фронтом воспламенения и ее устьем даже при сжигании антрацитового пыли (начало выхода летучих  $400^{\circ}\text{C}$ ). Это в основном объясняется тем, что в канале первичного воздуха, несущего пыль, расположен «рассекатель», могущий перемещаться и менять кольцевое проходное сечение первичного воздуха, а следовательно, и его выходную скорость. Его кормовая часть, обращенная к топочному объему, создает обратный вихрь, вызывающий усиленный приток высокотемпературных газов к самому выходу пылевоздушной смеси. Интенсивность обратного притока этих газов, вызываемого паличием в потоке плохо обтекаемого тела \*, зависит в значительной мере от скоростей выхода первичного воздуха и, следовательно, в этом случае в какой-то мере даже регулируема.

### 3. РАЗВИТИЕ ОГНЕВОГО ПРОЦЕССА ВНУТРИ ФАКЕЛА

Дальнейший ход факельного процесса смесеобразующего типа весьма напоминает по своей сущности то, что рассказывалось о таком же факельном сжигании жидкого топлива. Первичный фронт воспламенения обеспечивается лишь частичным газовыделением пылинок. Дальнейшая выдача ими газов разложения (выделение остатков летучих) происходит уже за пределами начального фронта воспламенения и в более благоприятных, высокотемпературных условиях. Откоксованные частицы продолжают газовыделение в остальной хвостовой части факела, наиболее протяженной и представляющей собой зону газификации чистого углерода. Скорость перевода твердого углерода в газообразное состояние ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) зависит, как уже говорилось, от двух основных причин: пористости коксового остатка \*\* и температуры в зоне газификации. При слишком высоких температурах и чрезмерном местном содержании пыли в потоке возможно даже постепенное затухание газификационного процесса после того, как будут исчерпаны, в основном, запасы кислородосодержащих молекул, способных реагировать с твердым углеродом. Такой глубокий недостаток активного кислорода может привести даже к тому, что раскаленные коксовые пылинки окажутся окруженными мертвым газом (смесью окиси углерода, азота и водорода), неспособным к химическому реагированию с ними, и газифика-

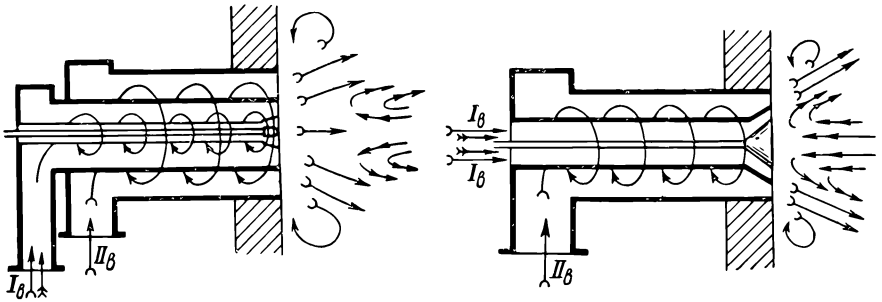
---

\* Следует вспомнить, что об этом говорилось в гл. 7 (фиг. 28) и гл. 10 (фиг. 55).

\*\* Чем пористее коксовая часть пылинки, тем больше в ней развита поверхность реагирования с кислородосодержащими газами ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) и притом тем меньше в ней содержится углерода, подлежащего газификации.

ционный процесс, несмотря на высокие температуры, прекратится. Таким образом, в известных случаях создавшийся химический недожог может стать источником механического недожога: недогазифицированные твердые коксовые пылинки будут унесены из топки в газоходы.

Причиной такого явления, как ясно из предыдущего, может служить неравномерная работа топочного пространства как по



*a*—горелка с улиточным подводом первичного и вторичного воздуха для их закрутки. Первичный воздух несет угольную пыль. В центре имеется добавочная воздушная труба для подвода воздуха, используемого при растопке горелки на мазуте, для чего в ней помещена мазутная форсунка. Этот центральный воздух при нормальной работе горелки несколько мешает обратному подтоку горячих топочных газов, ускоряющих возникновение первичного фронта воспламенения. Горелка пригодна для сравнительно легко газифицирующихся углей, обладающих достаточным выходом летучих.

*б*—горелка с закруткой только вторичного воздуха.

В канале первичного воздуха, несущего угольную пыль, расположен расщепитель, за кормой которого возникает обратный поток высокотемпературных топочных газов, ускоряющий газификацию пыли. Горелка пригодна для углей с малым выходом летучих, в том числе и для антрацитовой пыли.

Фиг. 72. Два типа пылеугольных горелок с закрученными потоками вторичного воздуха.

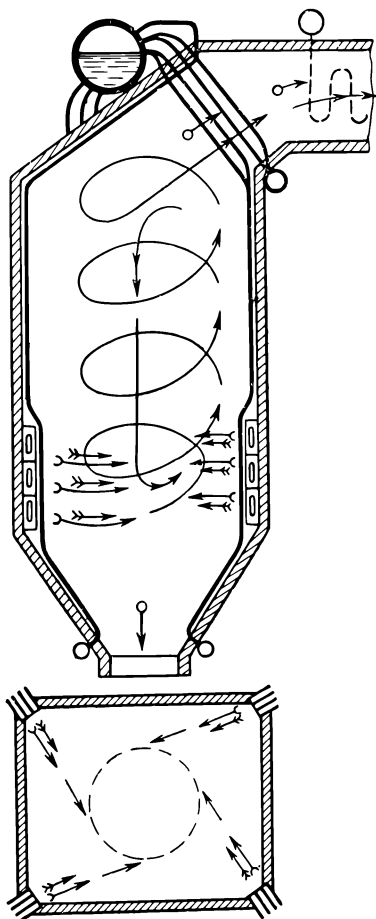
распределению пыли, так и по распределению температур по сечению камеры. Борьба с таким отрицательным ходом процесса следует усилением смесеобразования в самой камере, которое заставило бы достаточно своевременно и энергично перемешиваться слои потока с явным избытком и недостатком воздуха.

На примере горелок, способных организовывать обратные токи высокотемпературных топочных газов для усиления работы поджигающей зоны, мы видели, что циркуляционные вихри, возникающие как явление вредное, вызываемое необтекаемостью внутренней полости топочной камеры, можно заставить нести полезную, важную вспомогательную работу в организации топочного процесса. Еще более организованные формы полезного участия в развитии процесса можно придать вихревому движению, если сознательно распространить такое движение на все сечение топочной камеры. Простые открытые факелы с самопроизвольно и неизбежно затухающим смесеобразованием не обеспечивают равномерного распределения состава и температуры выдаваемого топкой газов. Во имя простоты оформления пылесожигательного процесса, кстати далеко не всегда оправданной, такие факелы

все еще широко распространены в пылеугольной практике. С недостатками работы топочных камер упрощенной формы (и притом сильно охлажденных) пытаются бороться малоэффективными средствами: добавочным увеличением их высоты, созданием «зажигательных поясов», представляющих огнеупорную футеровку, прикрывающую часть трубных экранов, и т. п. Проточная часть таких камер, в которой происходит действительно активный топочный процесс, занимает, как правило, едва ли половину их поперечного сечения. В остальной части гуляют непроизводительные, паразитические вихри, разнося расплавленные или липкие шлаковые пылинки по всей камере и давая им возможность осесть и налипать в наиболее застойных, непроточных зонах. Такими зонами, например, могут явиться фронтальные стены у самых горелок вблизи устья кольцевых каналов для подачи вторичного воздуха, достаточно «холодного» для того, чтобы способствовать быстрому охлаждению налипающих поблизости шлаковых пылинок и образованию шлаковых настывлей.

Попытка привлечь по возможности весь топочный объем, вернее все его поперечное сечение, к активному участию в процессе навела на мысль о целесообразности закрутки потока топочных газов. С этой целью в пылеугольной вертикальной камере прямоугольного сечения стали вводить первичный, а равно и вторичный воздушные потоки в виде струй, направленных из углов камеры касательно к некоторой воображаемой окружности (фиг. 73).

Входные скорости втекающих в топочное пространство струй держались умеренными, иначе говоря применялась слабая закрутка потока, так как было явно нецелесообразно слишком сильно прижимать газоздушный поток к холодным экранированным стенам как из-за возможного усиления шлаковки камеры,



Фиг. 73. Пылеугольная топка со слабо закрученным потоком газов в объеме самой топочной камеры. В середине закрученного потока возникает слабый обратный вихрь, возвращающий часть топочных газов к начальным зонам факельного горения.

так и вследствие ухудшения хода процесса в наиболее холодной зоне. Особенно чувствительным к такой организации процесса оказался антрацит. Развивающийся во вращающемся потоке центробежный эффект приводил к тому, что наиболее крупные пылинки, требующие на свою газификацию наибольшего времени, отжимались в закрученном потоке в самую холодную пристенную область и уносились из топки неиспользованными для процесса.

Все же при легко газифицирующихся каменных углях с достаточным количеством летучих слабо закрученный поток привел к некоторому улучшению использования поперечного сечения топочной камеры для активного процесса.

Здесь приходится вкратце коснуться поведения шлаков в пылесжигательных процессах. В ходе процесса наименее опасны шлаки, находящиеся в жидком или твердом состоянии. Жидкие шлаки, попадая на стены, постепенно стекают в золовую воронку, саморасшлаковывая топочную камеру. При полете по камере раскаленные жидкие пылинки являются даже в какой-то мере пособниками развития процесса газификации, перенося воспринятое ими высокотемпературное тепло из одной зоны в другую\*.

Тем более безопасны в смысле шлаковки стен уже затвердевшие в полете шлаковые пылинки, которые либо вываливаются в нижнюю шлаковую воронку (фиг. 71), если они успели слипнуться и укрупниться, либо уносятся топочными газами в газоды.

Наибольшую опасность представляет переходное, липкое состояние\*\*. Именно в этом состоянии легко возникают настыли на стенах топки и трубных пучках котельных поверхностей нагрева. Поэтому стремятся к созданию таких условий, при которых шлаковые пылинки проходили бы липкое состояние еще в полете по концевым участкам топочной камеры, для чего в верхней части топочного пространства создается зона усиленного охлаждения запыленного летучими шлаками потока газов. Для этого удлиняют охлажденную лучевоспринимающими экранами топочную камеру больше, чем этого требует факельный процесс, и разводят передние ряды котельных трубных пучков, увеличивая шаг между трубами, чтобы разбить поток топочных газов на параллельные слои, энергично охлаждаемые этими трубами еще до вступления газов в тесный пучок основных поверхностей нагрева.

Когда зола топлива достаточно легкоплавка и легко шлакует сильно охлажденные топочные камеры и трубные пучки, в современной практике нередко предпочитают переходить от твердого

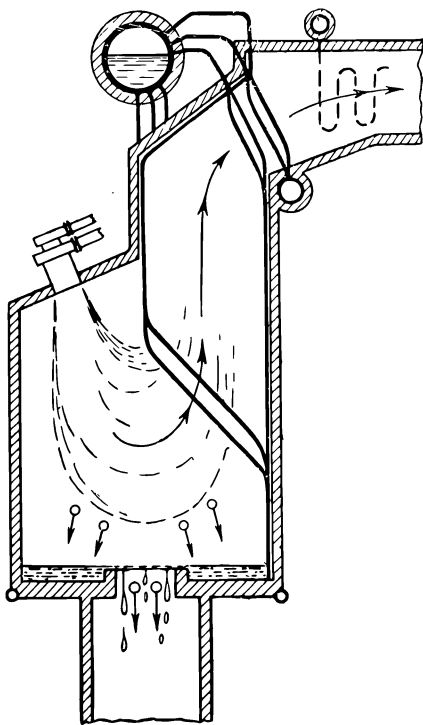
---

\* Аналогичное воздействие обеспечивают стекающие жидкие шлаки в слоевом процессе, усиливая переносом тепла раннее развитие газификационных зон в нижних участках слоя.

\*\* Процесс шлакования совершенно аналогичен «обледенению», наиболее опасному во влажной воздушной атмосфере при температуре, близкой к нулю.

шлакоудаления к жидкому. Для этой цели основная часть топочной камеры утепляется при помощи футеровки экранных труб. Чаще всего в настоящее время трубы экранов покрываются многочисленными приварными металлическими шипами, на которые наносится футеровка из пластической хромитовой руды. При работе топки эта первичная намазка быстро покрывается слоем шлаков, которые сами становятся неотъемлемой частью футеровки. Взамен холодной шлаковой воронки в камере устраивается горячий под в виде шлаковой ванны, напоминающей стекольные ванны стекловаренных печей (фиг. 74). Факел (или несколько факелов) направляется горизонтально или книзу и регулируется таким образом, чтобы наиболее горячее ядро его расположилось непосредственно над ванной. Для сохранения текучести шлаков их над поддерживать все время в перегретом состоянии. Верхний слой их по мере накопления сливается в специальную шахту («летку»), в нижней части которой делается для плотности водяной затвор. Стекающие в нижнюю часть шахты шлаки разбиваются водяными струями и затвердевают в виде стеклянной крупы, падающей в воду затвора, откуда она удаляется в уже остывшем состоянии.

При твердом шлакоудалении в самой камере оседает 15—25% всей массы шлаков. При жидком шлакоудалении в камере, т. е. шлаковой ванне, улавливается до 50—55% всех шлаков. В настоящее время появляются пылесожигательные устройства, улавливающие до 90% всех шлаков, что весьма сильно очищает топочные газы и уменьшает опасность зашлаковки или истирания трубных пучков. Достижение достаточной полноты очистки газа может позволить, в дальнейшем, перейти на значительно большие скорости потока в дымоходах для ускорения теплообмена непосредственным соприкосновением и значительного сокращения необходимых поверхностей нагрева.

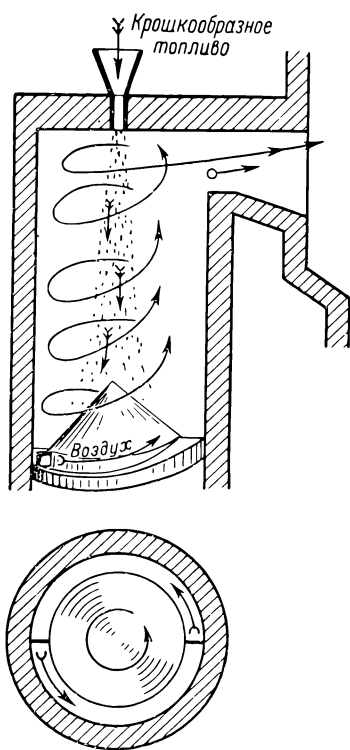


Фиг. 74. Пылеугольная топка с жидким шлакоудалением.

Передняя топочная камера утеплена шиповыми экранами с хромитовой обмазкой (постепенно сменяемой шлаками) и снабжена центральной леткой для стекания жидкого шлака из шлаковой ванны. Вторичная камера является зоной охлаждения и экранирована обычными голыми трубчатыми экранами, в которых идет парообразование за счет лучистого теплообмена.

#### 4. ГОРЕНИЕ В СИЛЬНО ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ ГАЗА

Для более полного использования возможностей, таящихся в закрученных потоках, следует сделать значительный скачок в область больших скоростей вращения потока, при которых развиваются сильные центробежные эффекты, заставляющие частицы с большой массой отбрасываться от центра к окружности, т. е. двигаться не только в направлении движения самого потока, но и поперек него. Такое движение несущей газовой среды создает значительное уплотнение молекул у стенок камеры вращения и соответствующее разрежение их в центре вращения. Возникающая разность давлений вызывает появление обратного вихря, движущегося в направлении, обратном движению основного закрученного потока. Явление это подобно движению воды в речных омутах или смерчевому движению закрученной части воздушной атмосферы. Так же как в омуте, обратный сердцевинный вихрь оказывает на все попадающие в его область тела всасывающее воздействие, а основной вращающийся поток — воздействие выталкивающее. Все эти эффекты, если они достаточно развиты, приводят к резкому усилению газообмена на поверхности частиц и при высоких температурах способствуют ускорению газовой выделению и смесеобразованию.



Фиг. 75. Вертикальная циклонная топка с твердым шлакоудалением.

В нижней части круглой камеры устроены два винтообразных ввода воздуха. Топливо засасывается центральным вихрем вниз, где подхватывается закрученным потоком воздуха кверху. Топка пригодна для малозольных горючих отбросов (лузга, резаная солома, опилки и т. п.).

Следствием этого является необычно высокое удельное тепловыделение в топках с сильно закрученными потоками на единицу объема ( $\text{ккал}/\text{м}^3 \text{ час}$ ) и на единицу поперечного сечения ( $\text{ккал}/\text{м}^2 \text{ час}$ ).

В этих случаях камерам вращения придается внутри обтекаемая круглая (или овальная) форма.

Характер движения газовой среды в топках этого типа напоминает движение сильно закрученных потоков в так называемых циклонах, применяемых для улавливания пыли в пыльных потоках в различных промышленных установках, в том числе и в котельных для очистки дымовых газов. Вследствие это-

го топочным устройствам такого типа присвоено название «циклонных топков».

В настоящее время имеются два основных направления в развитии приемов сжигания твердого топлива в сильно закрученных потоках. Первое применяется на сравнительно небольших установках при сжигании легко газифицирующихся топлив, если они развивают умеренные температуры, позволяющие сохранить размельчаемые в самом процессе золовые остатки в твердом виде. Это — циклонные топки с твердым шлакоудалением для опилок, резаной соломы, лузги, ореховой скорлупы и других горючих отходов промышленных производств, а также для крошкообразного («фрезерного») торфа. Вертикальный вариант циклонной топки для малозольного топлива показан на фиг. 75. Мелкое сыпучее топливо подается в середину вертикального циклона, в котором обратный сердцевинный вихрь засасывает его вниз через огневую оболочку внешнего вращающегося потока. Легко разлагающееся топливо, несомое горячими газами, практически сразу же начинает выдавать газ, который в нижней части камеры встречается с двумя винтообразно направленными струями воздуха, вступает с ними в смесеобразование и сгорает.

Горизонтальные варианты циклонов для топлива такого же вида снабжаются зажатými выходными горловинами, которые не дают слишком крупным частицам покидать камеры, заставляя их многократно вращаться в ней до полной их газификации. В дожигательную камеру, присоединяемую к циклонам, могут увлекаться газовым потоком лишь крайне парусные, с сильно развитой несущей поверхностью мельчайшие частицы, которые догорают за пределами циклона уже чисто «факельным» способом.

Вторым направлением в развитии процессов циклонного типа является сжигание в очень сильно закрученных потоках высококалорийных сортов углей (пока это — газовые и жирные, спекающиеся каменные угли). Для развития возможно более высоких температур процесса применяется повышенный воздухоподогрев, доводимый до  $400^{\circ}\text{C}$  и выше. В этих случаях топочные газы, покидающие циклонную камеру, развивают температуру до  $1800^{\circ}\text{C}$  и выше, что обеспечивает при соответствующих свойствах золы перегретое, легко текучее состояние шлаков, которые и удаляются из камеры через специальную летку. Так как температуры плавления шлаков заметно снижаются при недостатке воздуха, то жидкое удаление шлаков оказывается возможным и при коэффициентах избытка воздуха ниже единицы ( $\alpha < 1$ ). В этом случае циклонная камера выдает из горловины смесь продуктов полного и неполного сгорания, вытягивая огневой факел в камеру догорания. При некотором, даже самом ничтожном избытке воздуха циклонный процесс, основанный на быстром, высокотемпературном газовыделении и бурном смесеобразовании, обеспечивает высокую полноту тепловыделения.

## 5. ХОД ОГНЕВОГО ПРОЦЕССА В ВЫСОКОФОРСИРОВАННОЙ ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ

Разрез одного из вариантов горизонтальной циклонной камеры для сжигания газового каменного угля при жидком шлакоудалении показан на фиг. 76. В высокофорсированных циклонных камерах такого типа процесс газификации топлива и образования газобразной горючей смеси идет весьма своеобразно.

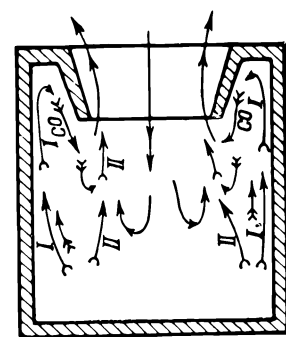
Поток воздуха, подаваемый сбоку касательно к круглой полости циклона с начальными скоростями до 150—200 м/сек, сильно закручиваясь, движется вперед двумя отдельными слоями. Основная часть его, будучи отброшена вращением к стенке циклона, направляется в заднюю пазуху, окружающую выходное сопло, повернутое внутрь. В этой пазухе первичный поток вынужденно поворачивает назад, себе самому навстречу. Этот-то обратный поток, как бы вонзающийся в общий прямой воздушный поток, стремящийся к выходу из циклона, и является причиной расслоения его на два воздушных вихря: внешний и внутренний. Вторичный внутренний воздушный поток движется прямо к выходной горловине и покидает ее по узкому кольцевому сечению, сердцевина же выходной горловины занята обратным вихрем, обычным для всех закрученных потоков.

Роль этих четырех слоев \* вращающегося газоздушного потока в развитии топочного процесса весьма различна. Первичный поступательный воздушный поток, захватывая твердые частицы топлива, практически мгновенно закидывает их в заднюю пазуху, которая играет для этих частиц роль «ловушки». Поток, вращаясь в этой пазухе, заставляет вращаться вместе с собой и скапливающиеся в ней частицы. Концентрация этих частиц достигает, как понятно, значительной величины, но в работающей топке приходит в равновесие, когда количество вновь поступающих в пазуху частиц в единицу времени становится равным количеству частиц, переходящих в газообразное состояние. Быстро вращающийся поток прижимает частицы к внешней стенке пазухи, не давая им уйти из нее вместе с собой.

Таким образом, пазуха становится невольным средоточием топлива при явном местном недостатке воздушного кислорода. Весь наличный кислород вступает с частицами топлива в газификационный процесс, идущий крайне интенсивно под воздействием развиваемой в этой части циклона высокой температуры. Следствием столь бурно развивающегося газификационного процесса является превращение всего первичного воздуха в топливный газ с высоким содержанием окиси углерода. Весь обратный поток, движущийся назад из пазухи, и представляет собой этот топливный газ. Часть его вместе с недогазифицированными твердыми частицами, увлекаемая потоком первичного воздуха, циркулирует

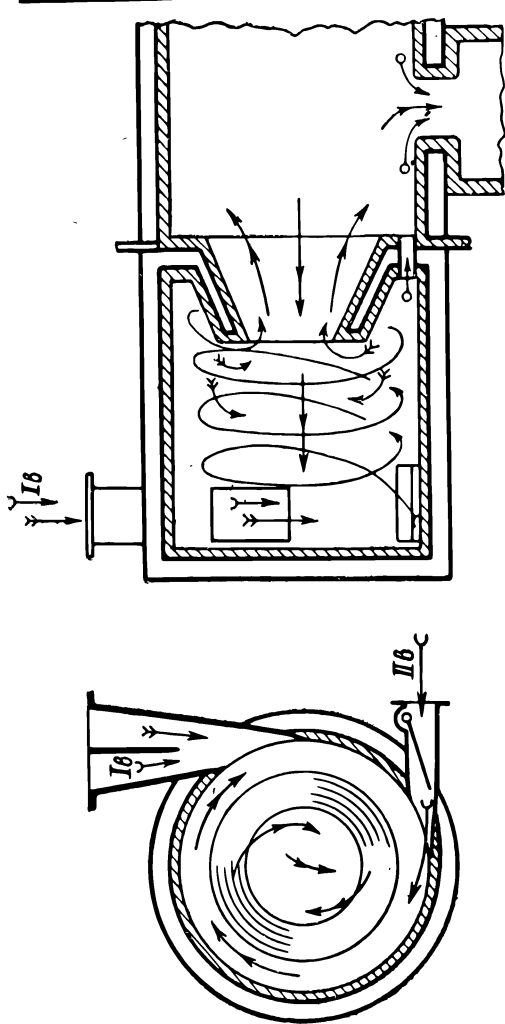
---

\* Двух прямых поступательных и двух обратных, движущихся назад, к фронту циклонной камеры из ее выходной горловины и из пазухи.



б—схема четырехслойного движения закрученных газов в циклонной камере.

1—первичный воздух, несущий твердые частицы топлива; 2—из пазухи обратно движется образовавшийся топливный газ с большим содержанием окиси углерода; 3—слой вторичного воздуха, разделенный от первичного обратным потоком топливного газа из пазухи; движется прямо к выходному соплу, смешивается с этим потоком топливного газа, образуя с ним горючую смесь, которая тут же сгорает. Сгорание (т.е. смесеобразование) заканчивается в пределе сопла, если имеется общий избыток воздуха, или за соплом, куда вытягивается пламенный процесс, если имеется недостаток воздуха, подаваемого в циклонную камеру; 4— часть высокотемпературных газов возвращается через центр сопла в циклонную камеру и примешивается к обрзающей горючей смеси.



а — топливо подается сверху с небольшим количеством воздуха касательно к круглой полости камеры. Основной воздух ( $\Pi_0$ ) подается касательно к полости камеры снизу при больших скоростях (150 — 200 м/сек). Наибольшая концентрация топлива возникает в пазухе вокруг выходного сопла, откуда обратным потоком движется топливный газ с большим содержанием окиси углерода. Пазуха — центр газификации. Образование горючей газовой смеси и ее сгорание возникает в кольцевой зоне у сопла и в самом сопле, где смешиваются два встречных потока — топливного газа из пазухи и стремящегося к выходу слоя вторичного воздуха. Часть топочных газов в виде обратного вихря возвращается через центр выходного сопла в циклонную камеру. Жидкие шлаки отбрасываются к стенке и, сползая с них, вытекают через внутреннюю легку в дожатательную камеру, откуда окончательно удаляются в шлаковую шахту, имеющую внизу водяной затвор.

Фиг. 76. Циклонная горизонтальная топка для каменного угля с жидким шлакоудалением.

в пределах паузы, а весь остальной топливный газ энергично смешивается с потоком вторичного воздуха, движущимся ему навстречу с другой, внутренней, стороны и тут же сгорает в виде вытянутого назад полупрозрачного кольца (синеватого пламени, характерного для интенсивного газового горения).

Что касается обратного вихря, движущегося назад по центру выходной горловины, то он, надо думать, также несет полезную службу, так как представляет собой поток высокотемпературных продуктов сгорания, вмешивающийся в смесеобразование топливного газа со вторичным воздухом и ускоряющий возникновение устойчивой зоны воспламенения образующейся горючей смеси.

Оба описанных вкратце типа процессов сжигания твердого топлива на лету — факельный (пылеугольный) и циклонный — принадлежат к числу наиболее передовых в современной топочной технике.

Но, быть может, особенно ярко именно на циклонном принципе сжигания отражаются общие устремления всей современной нам технике, направленные на достижение возможно более высокой интенсивности и экономичности протекающих процессов, на переход к полной механизации обслуживания этих процессов и, в дальнейшем, на возможность их перевода на еще более высокий уровень техники — автоматическое управление.

---

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОЯСНЕНИЯ  
К ТЕКСТУ

<sup>1</sup> Практически «воздушной атмосферой» является наземная газовая оболочка, ограниченная тропосферой и стратосферой, в пределах которых заключено свыше 95% всего воздуха совершенно постоянного состава. Водяные пары, поступающие в атмосферу от испарения земных водных бассейнов (океанов, морей, озер, рек и пр.), практически целиком сосредоточены в пределах тропосферы.

<sup>2</sup> Всякая сила, в том числе и вес, называемый «силой тяжести», измеряется в технике в килограммах или тоннах. Давлением же называется та доля силы, которая приходится на единицу поверхности. Маленькая сила, приложенная к малой поверхности, может создать достаточно большое давление (например, острие отточенного ножа, нажимаемого рукой человека), равно как большая сила, приложенная к достаточно большой поверхности, может создать умеренное давление (например, вес тяжелого паровоза, давящий на поверхность насыпи через множество шпал, без наличия которых он вместе с рельсами врезался бы в эту насыпь). Давление воздушной атмосферы, как указывалось в тексте, равно  $10\,333\text{ кг на }1\text{ м}^2$  или, что то же,  $1,03\text{ кг на }1\text{ см}^2$ . Такое же давление создает столб воды высотой  $10\,333\text{ мм}$  или столб ртути высотой  $760\text{ мм}$  (так как ртуть в  $13,6$  раза тяжелее воды). Полезно запомнить для дальнейшего, что давление  $1\text{ кг/м}^2$ , как это видно из сказанного, равнозначно давлению столба высотой  $1\text{ мм}$  (давлению  $1\text{ мм вод. ст.}$ ).

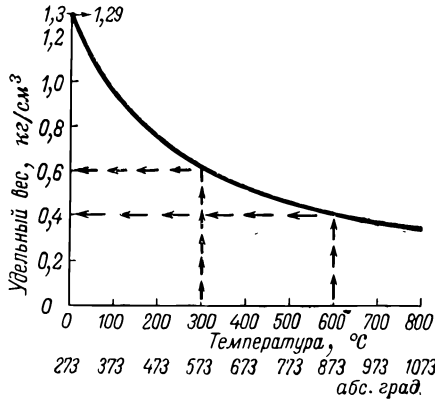
Для простоты счета в технике давлением в одну «техническую атмосферу» называют такое давление, которое создается ровно  $10\text{ т на }1\text{ м}^2$  или  $1\text{ кг на }1\text{ см}^2$ . Такое давление равнозначно давлению столба воды высотой  $10\,000\text{ мм}$  или столба ртути высотой  $735\text{ мм}$ .

<sup>3</sup> Удельным весом называется выраженный в килограммах вес  $1\text{ м}^3$  вещества (например, удельный вес воды равен  $1\,000\text{ кг/м}^3$ , удельный вес стали  $7\,900\text{ кг/м}^3$ ). Газы или, как их иногда называют, «сжимаемые жидкости», вследствие способности сильно сжиматься и расширяться, обладают переменным удельным весом в зависимости от того, под каким давлением они находятся и насколько они нагреты. Простые газы имеют свойство увеличивать свой удельный вес во столько раз, во сколько раз увеличивается их давление, и уменьшать во столько раз, во сколько раз увеличивается их абсолютная температура. Иначе говоря, удельный вес простых газов прямо пропорционален давлению и обратно пропорционален абсолютной температуре.

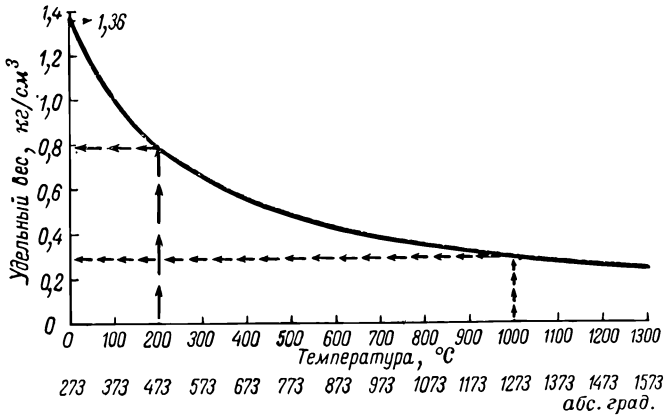
Абсолютной температурой называется такое число градусов, которое отсчитано не от нуля обычного градусника Цельсия (в нем, как известно, за  $0^\circ$  принимается температура таяния водяного льда), а от так называемого «абсолютного нуля», при котором все тела на земле, в том числе и любые газы, должны были бы уплотниться до предела, стать твердыми и абсолютно неподвижными. Эта абсолютная нулевая точка (почти уже достигнутая в лабораторной технике) лежит примерно на  $273$  градуса ниже точки таяния водяного льда. Следовательно, любые градусы, отсчитанные по Цельсию, всегда легко пересчитать на абсолютные, только прибавив к ним  $273$  градуса. Например,  $27^\circ\text{С}$  по абсолютной шкале будут равны  $27 + 273 = 300$  абсолютным градусам.

Удельный вес воздуха при атмосферном давлении и  $0^\circ\text{С}$  (или, что то же, при  $273$  абс. градусах) равен  $1,293\text{ кг/м}^3$ . При  $2\text{ ат}$  и той же температуре,

согласно сказанному, он окажется в 2 раза больше:  $1,293 \cdot 2 = 2,586 \text{ кг/м}^3$ . При 1 ат и вдвое большей абсолютной температуре, т. е. при 546 абс. градусах (или, что то же, при  $273^\circ \text{C}$ ) удельный вес воздуха окажется вдвое меньше нормального, т. е. равным  $1,293 \frac{273}{546} = 0,646 \text{ кг/м}^3$ . На фиг. 77 показано изменение удельного веса воздуха с повышением температуры при атмосферном давлении.



$\alpha$  — удельный вес воздуха при атмосферном давлении и различной температуре; стрелками указаны: удельный вес при  $300^\circ \text{C}$ , равный около  $0,6 \text{ кг/м}^3$ , и при  $600^\circ \text{C}$ , равный около  $0,4 \text{ кг/м}^3$ .



$\beta$  — удельный вес топочных газов обычного состава при атмосферном давлении и различной температуре. Стрелками указаны: удельный вес при  $200^\circ \text{C}$ , равный около  $0,79 \text{ кг/м}^3$ , и при  $1000^\circ \text{C}$ , равный около  $0,29 \text{ кг/м}^3$ .

Фиг. 77.

Для сравнения удельные веса некоторых газов при атмосферном давлении и  $0^\circ \text{C}$  приведены ниже.

Воздух . . . . .	1,293 $\text{кг/м}^3$	Углекислота . . . . .	1,977 $\text{кг/м}^3$
Кислород . . . . .	1,429 "	Метан . . . . .	0,717 "
Азот . . . . .	1,251 "	Водород . . . . .	0,089 "
Водяные пары . . . . .	0,805 "	Топочные газы	
Оксись углерода . . . . .	1,250 "	(обычные) . . . . .	1,350 "

<sup>4</sup> Давления воздушной атмосферы было бы вполне достаточно, чтобы раздавить многие предметы или любой организм на земле, в том числе и человека. Этого не происходит только потому, что во всех организмах, как и в большинстве предоставленных самим себе пустотелых или пористых предметов, находящихся в воздушной атмосфере, изнутри устанавливается такое же атмосферное давление, давящее навстречу и уравновешивающее наружное. В этом смысле существенно не абсолютное давление, испытываемое телом с какой-нибудь одной стороны, а разность давлений, действующая на оболочку тела, если эта разность возникает естественно или искусственно создается. Разность давлений и создает соответствующее напряжение, которое учитывается при расчете такой оболочки на прочность. Так, напряжение в стенках парового котла создается разностью давлений между абсолютным, т. е. полным давлением пара, действующим на стенку котла изнутри, и обратным давлением наружной атмосферы. В технике подобного рода вместо «абсолютных» (полных) атмосфер находят удобные вести счет на так называемые «избыточные» атмосферы, т. е. на полное число атмосфер, развиваемых внутри сосуда паром (или газом, водой и т. п.), за вычетом давящей в обратную сторону (т. е. снаружи) воздушной атмосферы. Технические манометры, при помощи которых контролируют давление, развиваемое в паровых котлах и других сосудах, находящихся под давлением, указывают непосредственно «избыточное» давление, которое меньше абсолютного, как понятно из изложенного, на 1 ат.

Наглядным примером значения противодействия является надутый воздухом резиновый мяч, который в этом случае находится практически под уравновешенными давлениями изнутри и снаружи. Если из такого мяча выкачать воздух (снять давление изнутри), то он немедленно сплоскнется под давлением наружной атмосферы. Если же, наоборот, поместить его в надутым состоянии под плотный колпак и выкачать воздух из-под этого колпака (снять наружное атмосферное давление), то мяч под воздействием внутреннего давления газа начнет раздуваться и лопнет, когда стенки его, вытянувшись, станут столь тонкими, что уже потеряют способность сопротивляться создавшемуся в них напряжению.

<sup>5</sup> Следует в известной мере различать излучение «световое» (видимое глазом) и «тепловое» (невидимое глазом). Человеческий глаз обладает способностью «видеть» только такое излучение, которое характеризуется сравнительно короткими длинами волн: от 0,4 микрона (фиолетовые лучи) до 0,74 микрона (красные лучи), между которыми располагаются все цвета радуги (один микрон равен одной тысячной доли миллиметра). Меньшими длинами волн характеризуются ультрафиолетовые, рентгеновские и так называемые гамма-лучи. Большими длинами волн характеризуются тепловые и электромагнитные лучи, в том числе применяемые в радиотехнике.

Тепловое излучение не воспринимается глазом, но достаточно чувствительно для человеческой кожи, в чем легко убедиться, приблизившись на достаточное расстояние к умеренно нагретому телу и не соприкасаясь с ним, например к поверхности нагретой печи. Область теплового излучения по промежутку длин волн весьма обширна по сравнению с ничтожной областью светового излучения, воспринимаемого человеческим глазом.

Чем меньше температура излучающей поверхности, тем меньше становится доля светового излучения и тем больше — теплового. Солнце излучает на землю большое количество световых лучей, так как его излучающая поверхность обладает очень высокой температурой (примерно 6 000° С). Световые лучи беспрепятственно достигают поверхности земли, проникая через неспособную задержать их воздушную атмосферу. Обратное излучение земной поверхности в мировое пространство происходит уже при весьма умеренной температуре и поэтому носит в основном тепловой характер. Эти тепловые лучи практически целиком перехватываются (поглощаются) в толще тропосферы водяными парами, обладающими способностью поглощать тепловые лучи в промежутках определенных длин волн. Это позволяет земной поверхности не так быстро охлаждаться в ночное время в отличие от ряда других планет (например, Меркурия или земного спутника Луны), не имеющих защитной газовой атмосферы.

Области излучения	Длины волн
Гамма-лучи . . . . .	0,000001 — 0,0001 микрона
Рентгеновские лучи . . . . .	0,0001 — 0,002 "
Ультрафиолетовые („химические“) лучи . . . . .	0,002 — 0,04 "
Световые (видимые) лучи . . . . .	0,4 — 0,76 "
Тепловые (инфракрасные) лучи . . . . .	0,76 — 400 "
Электромагнитные лучи (радиоволны) . . . . .	От сантиметров до неограниченного числа километров

<sup>6</sup> Все эти значительные перемещения воздушных масс в различных направлениях постепенно затихают при приближении к стратосфере. Для воздушных масс самой стратосферы уже характерно постоянное одностороннее направленное движение: наблюдателю, находящемуся в неподвижности на земле, казалось бы (если бы он мог наблюдать это своими глазами), что весь стратосферный воздух непрерывным потоком перемещается с востока на запад. Это объясняют тем, что в стратосфере воздух уже настолько разрежен, что трение его частиц друг о друга значительно ослабевает, и они перестают при своем перемещении сколько-нибудь заметно увлекать одна другую. Вследствие этого разреженные массы стратосферы уже не в состоянии поспевать за плотной и вязкой средой тропосферы, которая вращается вместе с землей с запада на восток, и отстают от этого быстрого вращения земли вместе с сопутствующей ей тропосферой. Такое отставание равносильно непрерывному перемещению воздушных масс стратосферы всегда в одном и том же направлении, обратном направлению вращения земли.

<sup>7</sup> Теоретическую силу тяги можно подсчитывать по приближенной формуле

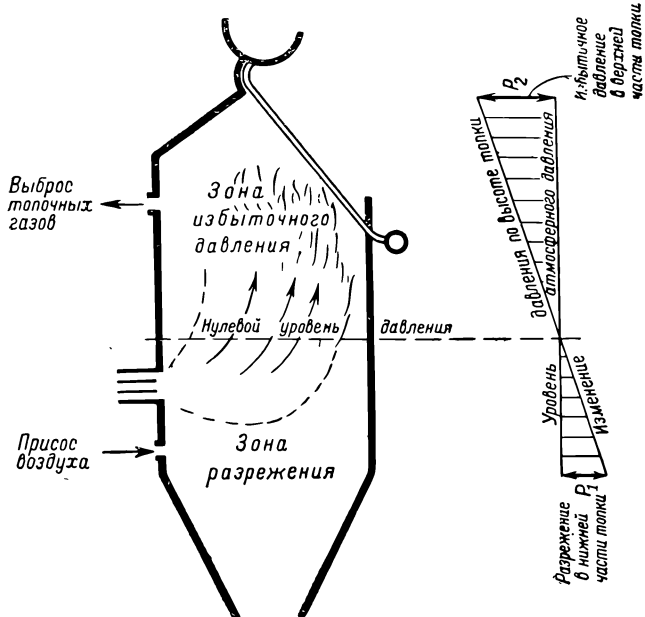
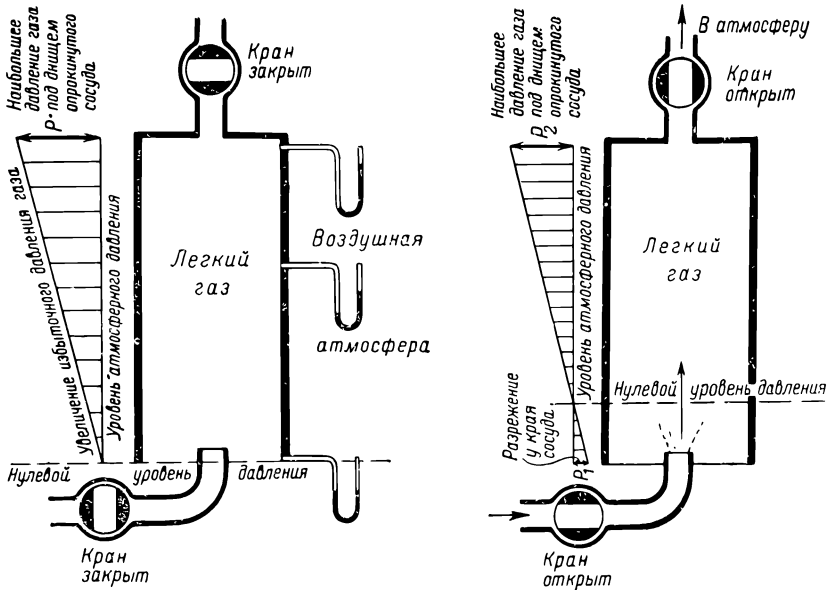
$$P = 355 \cdot H \left( \frac{1}{300} - \frac{1}{T} \right) \text{ мм вод. ст.},$$

в которой  $H$  — высота трубы  $m$ , а  $T$  — средняя температура дымовых газов, заполняющих трубу (в абс. градусах). При практических расчетах следует иметь в виду, что часть теоретически подсчитанной силы тяги пропадает в самой трубе вследствие возникающего в ней потерь из-за сопротивления, создаваемого самой трубой, и частичного остывания газов, движущихся по ней.

Сам термин «сила тяги» представляется устарелым и неудачным, так как из изложенного ранее можно было видеть, что горячие газы никто не «тянет» кверху, а их «выталкивает» снизу вверх холодный атмосферный воздух, подобно тому как любое легкое тело с удельным весом, меньшим удельного веса воды, опущенное в воду, выталкивается ею кверху, так как она тяжелее его (например, надутой резиновый мяч, опущенный в воду, «всплывает» на поверхность воды, вытесняемый «тяжелой» водой).

<sup>8</sup> Среди газов имеются, как известно, и такие, которые значительно легче воздуха (например, гелий, водород). Такие газы получают применение в аэронавтике (аэростаты, воздушные шары). Воздушный шар, заполненный очень легким газом, имеет «средний» удельный вес (вес всего устройства вместе с заполняющим его газом, оболочкой и присоединенными тяжестями, отнесенный ко всему объему этого устройства), значительно меньший удельного веса воздуха нижних слоев тропосферы. Такой шар будет вытесняться более тяжелым воздухом кверху (всплывать) до тех пор, пока не достигнет слоев воздушной атмосферы, в которых удельный вес его сравняется с удельным весом разреженного воздуха. Выше этих слоев атмосферы шар уже подняться не сможет, если не освободится от имеющегося на нем запасного балласта.

Топочный объем, заполненный горячими газами, напоминает собой сосуд, заполненный легким газом. Представим себе металлический стакан, перевернутый вверх дном и заполненный легким газом, например водородом (фиг. 78). На нижней кромке такого стакана давление внутри стакана и сна-



Фиг. 78. Изменение давления по высоте сосуда, заполненного легким газом.

ружи окажется одинаковым и равным атмосферному (на данном горизонтальном уровне). Внутри же стакана давление водорода будет повышаться сверх давления на этом нижнем уровне, так как вследствие разности удельных весов наружного воздуха и водорода создается и соответствующая разность давлений: наружный воздух, напирая снизу на водород, сжимает его тем сильнее, чем выше слой водорода, заполняющего стакан. Наибольшее давление водорода возникает в самой верхней части стакана, под его днищем. Это легко наблюдать при помощи присоединенных к стакану измерительных разности давлений, подобных рассмотренным ранее.

Таким образом, внутри стакана установится растущее кверху давление выше атмосферного. Если в стакане открыть отверстие, то водород, за счет такого избыточного давления, начнет выжиматься воздухом в атмосферу, а воздух — втекать в стакан снизу. Это явление можно поддерживать в установленном состоянии, если не давать вытечь всему водороду и непрерывно добавлять его через нижнюю трубочку из какого-нибудь водородного резервуара в количестве, равном количеству вытекающего водорода. В этом случае атмосферная линия («нулевой уровень») переместится несколько выше, причем ниже этой линии возникнет некоторое разрежение, а выше — растущее кверху избыточное давление.

Такой прибор будет некоторым подобием (моделью) топочного пространства, достаточно развитого в высоту. В высоких топочных пространствах, характерных для современных котельных топок, нередко имеется положительное давление в верхней его части и некоторое разрежение в нижней. Гляделка, открытая в верхней части топки, будет вышибать горячий газ, пламя и дым наружу, в то время как открытая нижняя гляделка будет подсасывать внутрь наружный атмосферный воздух. Понятно, что это происходит оттого, что положительная разность давлений между топкой и окружающей атмосферой в верхней части топочного объема направлена изнутри наружу, а внизу — снаружи внутрь. На каком-то уровне, как уже упоминалось, давление наружного воздуха и газов в топке сравняется и открытая гляделка, расположенная на этом уровне, вследствие отсутствия разности давлений не будет ни дымить, ни подсасывать холодный воздух (фиг. 78).

<sup>9</sup> На самом деле, кроме аргона, в воздухе могут содержаться в ничтожных количествах и другие газы: гелий, неон, углекислота, водород, присутствием которых вполне можно пренебречь.

<sup>10</sup> Все окислы принято делить на «кислотные», образующие кислоты, и «основные», образующие особую группу химических веществ, называемых «основаниями». Основания при соединении с кислотами образуют соли, погашая кислотные свойства первичных кислот. «Основные» окислы образуются при окислении металлов. Кислотными свойствами обладают также и некоторые вещества, не содержащие кислорода (фтор, хлор, бром и иод). Существуют и такие окислы, которые трудно отнести по привычным химическим признакам к кислотным или основным: они проявляют и те и другие свойства, почему их называют двусторонними («амфотерными»). Щелочи принадлежат к «основаниям».

<sup>11</sup> В настоящее время найдено, что ряд химических элементов обладает в той или иной степени радиоактивностью (медленным самораспадом). Еще недавно предполагалось, что последним по местоположению в периодической системе Менделеева является уран — 92-й элемент, который по атомному весу тяжелее водорода в 238 раз. В настоящее время уже насчитывается по крайней мере 96 элементов, частично найденных в природе, частично искусственно полученных. Последние элементы таблицы, следующие за ураном, представляют собой вещества с наиболее тяжелым атомным весом; некоторые разновидности их (изотопы) крайне радиоактивны, т. е. обладают неустойчивым строением атома.

<sup>12</sup> Трехатомный кислород  $O_3$ , называемый «озоном», представляет собой неустойчивое соединение атомов, образующееся, например при электрических разрядах (в «вольтовой дуге»). Это — бесцветный, обладающий специфическим запахом, химически крайне активный газ; легко распадается, образуя обычный молекулярный кислород  $O_2$  и отделяя неустойчивый атомарный кислород, быстро вступающий в окислительные процессы.

<sup>13</sup> Возможны случаи самовоспламенения при биохимических процессах, например самовоспламенение гниющей соломы или сена на скотных дворах, сухих торфяников, углей, хранящихся на плохо проветриваемых угольных складах. Очагом воспламенения является в этих случаях место, оказавшееся хорошо прикрытым от потери тепла на наружное охлаждение и постепенно разогревающееся от тепла, выделяющегося при одновременно развивающихся процессах гниения и окисления под воздействием воздушной атмосферы.

<sup>14</sup> Азотная кислота — жидкость, молекула которой состоит из атома водорода, атома азота и трех атомов кислорода ( $\text{HNO}_3$ ). В состав ее по весу входят

Водород . . . . .	1,6%
Азот . . . . .	22,2%
Кислород . . . . .	76,2%
—————	
	100,0%

При распаде молекулы 12,8% кислорода расходуется на окисление собственного 1,6% водорода, а остаток кислорода в размере  $76,2 - 12,8 = 63,4\%$ , выделяясь в свободном виде, идет на окисление топлива.

Окислителями могут служить не только вещества, содержащие избытки кислорода, но и так называемые галогены («солероды»): фтор, хлор, бром и иод. Сера представляет собой вещество со слабыми свойствами окислителя, но сама охотно вступает в соединение с более сильными окислителями, являясь в этом случае топливом.

<sup>15</sup> Существуют так называемые «унитарные топлива», под которыми понимаются вещества, содержащие в себе равномерную смесь топлива и окислителя и, следовательно, способные «гореть» без доступа атмосферного воздуха. К ним принадлежат различные пороха, «бикфордов шнур», термитные смеси и т. п. Однородная горючая смесь может быть создана и в газообразном состоянии (например, из газообразного топлива и воздуха). Создание и хранение таких смесей требует соблюдения ряда предосторожностей вследствие их значительной взрывоопасности.

<sup>16</sup> В этой книге мы условимся называть «прямыми» реакциями реакции, идущие с выделением тепла, а реакции, поглощающие тепло, назовем «обратными», что несколько расходится с определениями прямых и обратных реакций в курсах химии. В виде исключения наблюдаются и необратимые реакции, т. е. идущие только в одну сторону. Однако это еще не означает, что не существует таких условий, при которых они могли бы получить и обратное направление.

<sup>17</sup> Присущие атомам различных химических элементов свободные связи принято называть «валентностями». Именно числом этих связей (валентностей) и определяется число атомов, входящих в состав образующихся молекул. Атом водорода имеет одну свободную связь (одновалентен), при помощи которой он присоединяется к атомам других веществ. Если такой атом присоединяется к атому другого одновалентного вещества, то возникает молекула из двух атомов. Например, атом хлора тоже обладает одиночной свободной связью и образует с атомом водорода молекулу  $\text{HCl}$  — вещества, которое в водном растворе носит название соляной кислоты. Если одновалентный атом водорода в этой молекуле заменить одновалентным атомом натрия, то получится молекула  $\text{NaCl}$ , известная под названием поваренной соли. Атом кислорода имеет две свободные связи (двухвалентен), почему он при окислении водорода способен присоединить к себе два атома водорода и создать прочную молекулу воды или водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$ . Гораздо менее прочным соединением окажется так называемая перекись водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ , в которой, как понятно, недостаточно погашены свободные связи, присущие кислородным атомам, и потому молекула перекиси оказывается неустойчивой и охотно разваливается на более прочную молекулу воды и активный атом свободного кислорода, вступающий в связь с другим таким же кислородным атомом или каким-нибудь другим достаточно активным веществом.

В этом отношении активными являются и всевозможные осколки органических молекул, например осколок молекулы метана с одной свободной связью, если от нее оторвался атом водорода ( $\text{CH}_3$ ). Такое неустойчивое вещество носит название метила. Обладая одной свободной связью, оно экви-

валентно атому водорода. Будучи крайне неустойчивым, метил может заместить собой любой атом водорода или другое одновалентное вещество.

<sup>18</sup> Способностью создавать длинные цепочки обладает также кремний (Si), однако эти цепочки имеют совершенно другой характер и не являются основой органических тканей. Кроме того, для мертвой материи характерна способность образования весьма больших однородных сплошных молекул в виде кристаллов, например кристаллов поваренной соли, углерода в виде плоской кристаллической решетки графита или еще более крепких кристаллов алмаза, в которых атомы углерода прочно связаны по всему объему, и т. п.

<sup>19</sup> Следует, однако, учесть, что чем длиннее становится органическая молекула, тем медленнее она накапливает энергию по сравнению со скоростью увеличения своего веса. Поэтому при расчете на 1 кг наибольший удельный запас энергии, выделяемый в виде свободного тепла, принадлежит к наиболее легким углеводородам, достигая наивысшего предела в метане.

<sup>20</sup> О температуре твердых веществ можно приблизительно судить по цвету свечения по следующей примерной шкале:

Свечение	Примерная температура, °С
Начало свечения . . . . .	Около 500
Темновиншневое . . . . .	700—750
Светлокрасное . . . . .	850—900
Светложелтое . . . . .	1 000—1 050
Белое . . . . .	1 200—1 300 и выше

<sup>21</sup> Всякая работа равнозначна затрате определенного количества энергии и измеряется в тех же единицах. В технике работа чаще всего измеряется в килограммометрах (*кгм*)— единицах, представляющих собой произведение 1 кг на 1 м (такая работа затрачивается при подъеме груза в 1 кг на высоту 1 м). Примерно 427 *кгм* равноценны большой калории (*ккал*)— тепловой единице, равной количеству тепла, затрачиваемому при нагреве 1 кг воды с 14,5 до 15,5° С, т. е. на 1° С. Одна малая или просто калория (*кал*) равна одной тысячной доли большой калории, т. е. представляет собой количество тепла, затрачиваемое при нагреве 1 г 15-градусной воды на 1° С. Количество электрической энергии измеряется в технике в киловаттчасах. 1 *квтч* равноценен (эквивалентен) 860 *ккал* или 367 170 *кгм*. Пересчет энергетических единиц дан в следующей таблице.

Единицы измерения энергии		
Тепло килокалории ( <i>ккал</i> ) при 15° С	Механическая работа килограммометры ( <i>кгм</i> )	Электричество киловаттчас ( <i>квтч</i> )
1	426,8	0,00016
0,00234	1	0,0000037
860,2	367 167	1

<sup>22</sup> Определение теплотворной способности топлива ведут сжиганием пробы под водой, воспринимающей выделенное при этом тепло. Количество выделенного тепла определяют по числу градусов, на которые повысилась температура воды, учитывая, что на каждый градус нагрева 1 кг воды расходуется 1 *ккал*. При таких определениях точно взвешенную пробу топлива помещают в герметически плотную бомбу, которую заполняют сжатым кислородом и погружают в сосуд, заполненный определенным количеством воды.

Внутри бомбы топливо поджигают электрическим запалом. Схема водяного прибора для определения количества тепла изображена на фиг. 79.

В практических расчетах теплотворная способность принимается за величину, не зависящую от температуры. Строго же говоря, выделяющееся при сгорании тепло несколько зависит от температуры, при которой идет сгорание, так как удельный расход тепла на нагрев исходных веществ (топлива и воздуха) и получающихся продуктов сгорания (топочных газов) по-разному зависит от температуры, что косвенно отражается и на освобождающемся количестве тепла. Во избежание получающейся, таким образом, некоторой неопределенности калориметрические определения условились вести при начальной температуре воды около 15° С.

При определении описанным путем теплотворной способности в бомбе приходится учитывать вычислениями или предварительными определениями различные поправки: на одновременный с водой нагрев металлических частей калориметра, на наружное охлаждение прибора (сведенное к небольшой величине защитными стенками), на образование кислот и т. п.

<sup>23</sup> Приведем несколько простых примеров расчета теплотворной способности:

1. Рассчитать низший предел теплотворной способности дров с 50% влажности, если абсолютные сухие дрова имеют низшую теплотворную способность, равную 4 500 ккал/кг.

В дровах такой влажности горячая масса составит лишь 0,5 кг на 1 кг топлива. Следовательно, всего выделится тепла на 1 кг топлива с 50% влажности.

$$0,5 \cdot 4\,500 = 2\,250 \text{ ккал/кг,}$$

из которых на испарение влаги пойдет  $0,5 \cdot 600 = 300$  ккал. Тогда низший предел теплотворной способности дров окажется равным  $2\,250 - 300 = 1\,950$  ккал/кг.

2. Рассчитать низший предел теплотворной способности газового угля:

а) Если неизвестен состав, но известны низшая теплотворная способность горючей массы, равная 7 850 ккал/кг, и балласт: золы 12 и влаги 8%!

Фиг. 79. Водяной калориметр для определения теплотворной способности топлива.

1 — проба топлива, помещенная в чашку (тигелек), подвешенную к металлическому стержню внутри бомбы; 2 — внутренняя полость бомбы, заполненная сжатым кислородом (при давлении  $15 \pm 30$  ат); 3 — стальная бомба с завинчивающейся крышкой; 4 — металлическая трубка для продувки и заполнения бомбы кислородом; 5 — сосуд со взвешенной водой, нагреваемой от сгорания пробы; 6 — точный градусник, измеряющий повышение температуры воды при нагреве; 7 — крышка калориметра; 8 — полый сосуд с водой, защищающий калориметр от чрезмерного наружного охлаждения; 9 — водяная мешалка, вращающаяся от электропривода; 10 — электрические клеммы (зажимы), для запала; 11 — головки игольчатых вентилях для продувки и заполнения бомбы кислородом.

Общий балласт (зола + влага) составляет 20%; следовательно, в 1 кг топлива будет содержаться чистой горючей массы 0,8 кг. В этом случае полное тепловыделение при сгорании 1 кг топлива будет равно

$$0,8 \cdot 7\,850 = 6\,270,$$

причем дополнительно на испарение 8% влаги пойдет  $0,08 \cdot 600 = 50$  ккал (с округлением). Следовательно, низшая теплотворная способность угля составит  $6\,270 - 50 = 6\,220$  ккал/кг.

б) Известен состав топлива, но неизвестна его теплотворная способность. В 1 кг топлива содержится:

углерода . . . . .	0,648 кг	(64,8%)
водорода . . . . .	0,044 "	(4,4%)
кислорода . . . . .	0,068 "	(6,8%)
азота . . . . .	0,008 "	(0,8%)
серы . . . . .	0,032 "	(3,2%)
<hr/>		
Итого горючей массы . . . . .	0,80 "	(80,0%)
зола . . . . .	0,12 "	(12,0%)
влаги . . . . .	0,08 "	(8,0%)
<hr/>		
Всего . . . . .	1,0 кг	(100,0%)

Расчет ведется по формуле, приведенной в табл. 6 для битуминозных каменных углей:

$$8\,550 \cdot C + 25\,600 \cdot H - 3\,200 \cdot O \text{ ккал/кг:}$$

первое слагаемое по углероду дает . . . . .	$8\,550 \cdot 0,648 = 5\,530$	ккал/кг
второе " " водороду " . . . . .	$25\,600 \cdot 0,044 = 1\,130$	"
серы прибавляет дополнительно . . . . .	$2\,200 \cdot 0,032 = 70$	"

Сумма положительных членов 6730 ккал/кг

Отрицательный член по кислороду . . . . .	$-3\,200 \cdot 0,068 = -220$	ккал/кг
Высшая теплотворная способность (по разности) . . . . .	$6\,730 - 220 = 6\,510$	ккал/кг

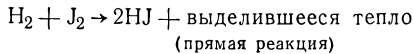
На испарение влаги, образовавшейся от сгорания водорода, уйдет . . . . .	$600 \cdot 9 \cdot 0,044 = 240$	ккал/кг
На испарение влажности топлива . . . . .	$600 \cdot 0,08 = 50$	"

Итого потребуется на испарение 290 ккал/кг

Тогда нижняя теплотворная способность будет равна (по разности)  $6\,510 - 290 = 6\,220$  ккал/кг. Все расчеты даны с соответствующими округлениями.

<sup>24</sup> Скорость протекания химических реакций, т. е. скорость исчезновения реагирующих молекул или, что то же, скорость образования новых молекул, возникающих при этих реакциях, подчиняется так называемому «закону действующих масс». Согласно этому закону скорость реакции пропорциональна концентрациям как одного, так и другого реагирующих между собой веществ, т. е. произведению их концентраций.

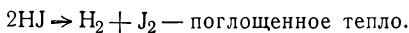
В рассматриваемом примере образования иодоводорода на молекулу водорода тратится молекула иода, причем получаются две молекулы иодоводорода по схеме



Обозначим концентрацию водорода в смеси через  $C_{H_2}$ , концентрацию иода — через  $C_{J_2}$ , а концентрацию образующегося иодоводорода — через  $C_{HJ}$ . Тогда скорость прямой реакции будет описываться выражением

$$V_{пр.реакц} = K_1 \cdot C_{H_2} \cdot C_{J_2}$$

Одновременно идет и обратная реакция разложения («диссоциации») иодоводорода на водород и иод по обратной схеме



Так как молекула водорода и молекула иода могут возникнуть по этой реакции только из двух молекул иодоводорода, то нужна двойная концентрация иодоводорода, чтобы получить одиначные концентрации водорода и иода. Следовательно, скорость обратной реакции будет дважды пропорциональна концентрации иодоводорода в смеси или, иначе говоря, пропорциональна квадрату его концентрации по выражению

$$V_{обр.реакц} = K_2 \cdot (C_{HJ}) \cdot (C_{HJ}) = K_2 \cdot (C_{HJ})^2.$$

В приведенных выражениях числа  $K_1$  и  $K_2$  представляют собой коэффициенты пропорциональности, неравные друг другу. Обе реакции — прямая и обратная — идут одновременно, но с разными скоростями. Скорость прямой реакции замедляется по мере исчезновения исходных веществ ( $H_2$  и  $J_2$ ), а скорость обратной — увеличивается по мере увеличения содержания образующегося иодоводорода ( $HJ$ ). В конце концов скорости обеих реакций выравниваются и они приходят в равновесие:

$$V_{прям} = V_{обр}$$

или

$$K_1 \cdot C_{H_2} \cdot C_{J_2} = K_2 \cdot C_{HJ}^2.$$

Отношение характеристических чисел  $K_1$  и  $K_2$  носит название «константы равновесия» и из предыдущего равенства подсчитывается по выражению

$$K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{C_{HJ}^2}{C_{H_2} \cdot C_{J_2}}.$$

Константа равновесия зависит от температуры, и точка равновесия смещается по мере повышения температуры в сторону убыстрения обратной, теплопоглощающей реакции. Иначе говоря, с повышением температуры скорость обратной реакции, подрастая, сначала догоняет скорость прямой реакции, а потом перегоняет ее, что и вызывает указанное смещение равновесия.

В химии обратимое разложение вещества (например, разложение иодоводорода на водород и иод) носит название диссоциации. Чаще всего это разложение вызывается высокой температурой («термическая диссоциация»).

<sup>25</sup> Для простоты умножения или деления многозначных чисел оказывается весьма удобным изображать какое-нибудь (любое) число  $A$  в виде другого числа («основания»), взятого в соответствующей степени. Если, например, за основание принять число десять, то это число  $A$  может быть записано в виде следующего выражения:

$$A = 10^a.$$

Степень  $a$  носит название десятичного логарифма числа  $A$ , т. е.  $\lg A = a$ . Например, число 100 может быть изображено как десять во второй степени, так как  $100 = 10^2$ ; следовательно, десятичным логарифмом 100 будет число 2. Таким же образом десятичным логарифмом 1 000 окажется число 3, так как  $1\,000 = 10^3$ , и т. д. Понятно, что для подавляющего большинства чисел их десятичный логарифм окажется длинной десятичной дробью. Так, логарифмом двойки будет число 0,30103, логарифмом пяти будет число 0,69897 или приблизительно 0,7, логарифмом 101 будет число 2,00432 и т. д. Система десятичных логарифмов широко используется для быстрых подсчетов и издается в виде специальных таблиц. Она позволяет вместо длительных операций умножения и деления свести подсчеты к сложению или вычитанию логарифмов. На этой основе построены и счетные логарифмические линейки.

Однако для удобства операций в высшей математике еще удобнее пользоваться не десятичными логарифмами, а так называемыми логарифмами натуральных, основанием которых вместо числа десять, выбрано особое «на-

туральное» число  $e = 2,71828\dots$ . Тогда, как понятно, любое число в натуральных логарифмах будет изображаться выражением

$$A = e^n$$

и натуральным логарифмом числа  $A$  будет уже не число  $a$ , а число  $n$  ( $\ln A = n$ ). В этой системе логарифмов основание значительно меньше основания десятичных логарифмов, поэтому для получения того же самого числа  $A$  натуральное число  $e$  надлежит возводить в соответственно большую степень. Иначе говоря, натуральный логарифм числа  $A$  будет больше десятичного логарифма этого же числа (примерно в 2,303 раза). Так, натуральным логарифмом десяти будет число 2,30259; натуральным логарифмом 100 будет число 4,6052; натуральным логарифмом 1 000 будет число 6,9078 и т. д. Таким образом,

$$\ln A \approx 2,3 \lg A.$$

В природе чрезвычайно распространены явления, при которых скорость убывания или нарастания количества действующего вещества в единицу времени оказывается пропорциональной *самому количеству* действующего вещества. Дальнейшая математическая обработка таких закономерностей неизбежно приводит к логарифмической связи между независимой увеличивающимся временем  $\tau$  сек. протекания этих явлений и зависимо от времени меняющимся количеством действующего вещества, убывающим или возрастающим.

Типичным примером такой логарифмической связи является зависимость меняющейся концентрации реагирующего вещества  $C$  от времени протекания химической реакции  $\tau$ , так как скорость протекания простейшей химической реакции (скорость убывания концентрации  $C$  реагирующего вещества в единицу времени) прямо пропорциональна самой концентрации:

$$\text{скорость реакции} = \pm k \cdot C.$$

Знак плюс ставится тогда, когда с возрастанием времени количество вещества также растет, знак минус, — когда с возрастанием времени количество вещества убывает.

Такая закономерность и приводит к тому, что пропорциональной увеличивающемуся количеству времени ( $\tau$  сек.) оказывается не сама концентрация  $C$ , а ее натуральный логарифм ( $\ln C$ ), т. е.

$$\ln C = \pm k \cdot \tau.$$

Тогда, как понятно из всего предыдущего, число  $C$  (величина концентрации реагирующего вещества) может быть изображено как натуральное число  $e$  в степени  $\pm k \cdot \tau$  или

$$C = e^{\pm k \tau}.$$

Подобного рода закономерности, хорошо описывающие многие физические и химические явления, представляют собой особую группу зависимостей, в которых независимая переменная (например, время, температура и т. п.) входит множителем или делителем в состав степени при числе  $e$ . Они с успехом применяются в тех случаях, когда приходится математически выражать очень сильную зависимость какой-нибудь искомой физической величины (функции) от независимой переменной (аргумента), т. е. в тех случаях, когда простые степенные зависимости, в которых независимая переменная стоит в выражении простым множителем в какой-либо степени, не в состоянии правильно описать ход интересующего нас процесса.

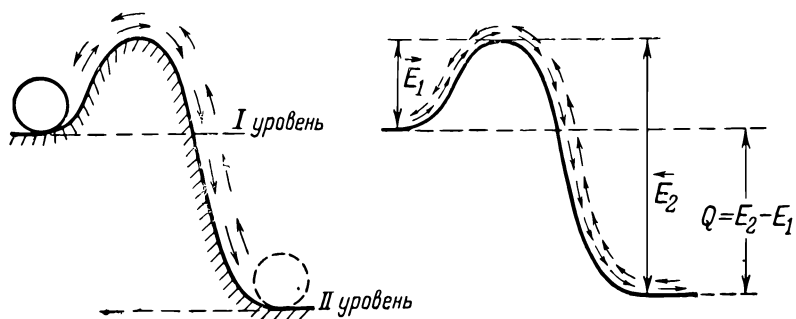
Ярким и важным для нашего изложения примером подобной сильной зависимости одной величины от другой является, как мы видели из приведенного в основном тексте примера, зависимость скорости протекания химической реакции от температуры: малейшее увеличение температуры приводит к огромному ускорению хода самой реакции.

Это влияние температуры сказывается на численном значении коэффициента пропорциональности  $k$ , входящего множителем в выражение для ско-

рости реакции (*скорость реакции* =  $\pm k \cdot C^a$ ). Именно этот-то коэффициент  $k$  численно резко меняется при малейшем изменении температуры, и связь его с температурой может быть описана выражением

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{2T}}$$

В этом выражении коэффициент пропорциональности  $k_0$  характеризует собой полное число столкновений молекул в единице объема реагирующей смеси ( $k_0$  пропорционально полному количеству столкновений как холостых, так и активных, т. е. приводящих к реакции), а второй множитель, написанный в виде натурального числа  $e$  в степени  $\left(-\frac{E}{2T}\right)$ , представляет собой ту долю полного числа столкновений, которые характеризуются достаточной энергией, приводящей к расшатыванию или разрушению атомарных связей в первич-



а — модель механического барьера. Шарик, прежде чем самопроизвольно скатиться до нижнего II уровня, должен преодолеть препятствие в виде возвышения, для чего требуется первичная затрата энергии.

б — химическая модель барьера. Прежде чем самопроизвольно протечет химическая реакция и выделится освобождающееся тепло  $Q = E_2 - E_1$ , должно быть затрачено некоторое количество энергии  $E_1$  для преодоления внутримолекулярных связей.

Фиг. 80. Схемы энергетических барьеров.

ных молекулах и заставляющей их обмениваться атомами, т. е. вступать в реакцию. Величина  $E$  и характеризует ту минимальную энергию, которую необходимо затратить, чтобы преодолеть сопротивление первичных молекул их разрушению. Она носит название «энергии активации». Энергия активации служит характеристикой активности реагирующих между собой веществ и в этом смысле отражает их первичные свойства. Величина ее показывает, насколько охотно вещества вступают между собой в реакцию: чем она больше, тем труднее данные вещества начинают реагировать. Для одного и того же вещества энергия активации численно больше при обратных реакциях, идущих с потреблением тепла, чем при прямых, идущих с тепловыделением. Энергия активации как бы представляет собой тот энергетический барьер, который должен быть предварительно преодолен, прежде чем реакция потечет самопроизвольно.

Наглядно это можно представить себе в виде следующего сопоставления, схематически изображенного на фиг. 80. Шарик помещен на верхнем уровне I. Для того чтобы он с верхнего уровня I пошел на нижний уровень II, необходимо преодолеть преграду, высотой  $E_1$ , затратив на это соответствующее количество работы (энергии). Как только он после этого перевалит через это препятствие, он самопроизвольно, под действием собственной силы тяжести, скатится на нижний уровень II. Если же осуществить обратное действие, т. е. поднять шарик с нижнего уровня II на верхний уровень I, то понадобится преодолеть значительно большую преграду высотой  $E_2$ , и только после этого шарик самопроизвольно скатится на уровень I.

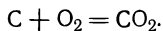
Подобным же образом можно представить себе схему протекания химических реакций, прямой и обратной. Прямая (тепловыделяющая) реакция начинает протекать самопроизвольно после преодоления энергетической преграды, на что израсходуется энергия в количестве  $E_1$ . При обратной (теплопотребляющей) реакции приходится расходовать значительно больше энергии  $E_2$ . Разность между ними будет представлять то количество тепла  $E_2 - E_1$ , которое при прямой реакции выделится в свободном виде, а при обратной должно затрачиваться из какого-нибудь постороннего источника.

<sup>26</sup> Если вес атома водорода принять за единицу, то при точном счете веса атомов других химических веществ не будут целыми числами. Например, атом углерода будет весить 11,9071 водородных весовых единиц, атом кислорода — 15,8762 водородных единицы и т. д. По международному соглашению теперь условились принять за основу весового счета вес атома кислорода, приписав ему точно 16 весовых единиц. При таком счете атом углерода будет содержать 12 весовых единиц, атом водорода 1,0078 весовых единиц.

<sup>27</sup> Избыток воздуха можно было бы вычислять по расходу воздуха и топлива в единицу времени, сопоставляя действительный удельный расход воздуха на 1 кг сжигаемого топлива с теоретическим удельным расходом этого воздуха, вытекающим из расчетно-теоретического соотношения, приводившегося, например, для некоторых топлив в табл. 10 и 11. Для этой цели пришлось бы вести учет расхода как воздуха, так и топлива во время работы топки. Однако такой текущий учет организуется только в специальных топочных устройствах и в основном на газообразном или жидком топливах при помощи специальных расходомеров для воздуха, топливного газа и жидкого топлива. В установках наземных и особенно при сжигании твердого топлива проще воспользоваться анализом топочных газов, в составе которых должна регистрироваться концентрация углекислоты или остаточного кислорода. Основным методом анализа газов является химический анализ. Для этой цели применяются различные химически активные жидкости, способные быстро входить в химическое соединение с тем или иным газом или, как говорят, поглощать его. Так, водный раствор едкой щелочи (едкое кали или едкий натр) быстро и нацело поглощает углекислоту, а если в такой щелочи добавочно растворить пирогаллол (окисел бензола  $C_6H_3O_3$ ), то такой раствор будет быстро поглощать кислород.

Пробу топочных газов, отсосанную из газохода, забирают в размере 100 см<sup>3</sup> в специальную стеклянную измерительную бюретку с водяным затвором (газоанализатор типа Орса). Затем по очереди выжимают водой эту пробу сначала просто в щелочь для поглощения углекислоты ( $CO_2$ ), а затем в пирогаллол для поглощения кислорода ( $O_2$ ). Наличие в топочных газах оставшегося кислорода, не использованного в топочном процессе, свидетельствует о наличии избыточного воздуха. О том же свидетельствует и выясненная таким анализом концентрация углекислоты, если она оказалась ниже известной нормы. Чем больше избыток воздуха, тем меньше концентрация углекислоты в топочных газах. Количественные определения делают на следующих основаниях.

Углекислота, получаемая от окисления углерода кислородом, рассчитывается по следующей схеме:



Это показывает, что из одного объема кислорода получается один объем углекислоты. Так как в воздухе кислород содержится в размере 21% по объему, то предельное количество углекислоты, могущее образоваться при воздушном окислении, если весь кислород воздуха будет истрачен только на образование углекислоты, будет:  $CO_2^{пред} = 21\%$  по объему. Такой результат был бы возможен лишь в том случае, если бы топливо состояло только из одного чистого углерода. Однако натуральные топлива органического происхождения содержат, кроме углерода, еще и водород и собственный кислород. Водород особенно активен по отношению к кислороду воздуха и окисляется в первую очередь, отнимая часть кислорода от углерода. Вследствие этого на окисление углерода в углекислоту остается воздушного кислорода тем мень-

ше, чем больше водорода содержится в топливе (полезно вспомнить табл. 7). Таким образом, при горении в воздухе предельно возможное содержание углекислоты в топочных газах, соответствующее теоретическому расчетному соотношению между воздухом и топливом ( $\alpha = 1$ ), будет зависеть от состава топлива и окажется тем меньше, чем богаче топливо водородом.

Наоборот, чем больше окислено топливо, т. е. чем больше оно содержит собственного кислорода, тем, как понятно, больше будет предельно возможное содержание в топочных газах углекислоты, так как топливный кислород будет добавляться к кислороду воздушному.

Примерные усредненные значения предельного содержания углекислоты ( $\text{CO}_2^{пред}$ ) для главнейших сортов топлива приводятся в таблице.

**Предельное теоретическое (т. е. при  $\alpha = 1$ ) содержание углекислоты в продуктах полного сгорания для различных топлив**

Название топлива	$\text{CO}_2^{пред}$ , % по объему	Название топлива	$\text{CO}_2^{пред}$ , % по объему
Чистый углерод . . . . .	21	Каменный уголь жирный . .	18,4
Чистый водород . . . . .	0	Бурный уголь подмосковный	19,3
Метан . . . . .	11,7	Торф средней разложени-	
Природный газ (саратовский)	12,1	ности . . . . .	19,6
Бензин . . . . .	14,8	Древесное топливо . . . . .	20,1
Керосин . . . . .	15,4	Антрацит . . . . .	20,1
Мазут . . . . .	15,7		
Каменный уголь газовый . .	17,5		

Таблица сосчитана по составу топлив, приведенному в табл. 7.

На самом деле, в процессе окажется объемных процентов углекислоты во столько раз меньше, во сколько раз топочные газы разбавлены избыточным воздухом. Отсюда коэффициент избытка воздуха будет равен частному от деления предельного содержания углекислоты на фактическое содержание ее в газах.

Так, например, если в трех разных случаях в составе газов оказалось 10% углекислоты при полном сжигании мазута, каменного жирного угля и древесного топлива, то в указанных трех случаях коэффициент избытка воздуха окажется равным:

1) для мазута  $\alpha = \frac{15,7}{10} = 1,57$ , т. е. свыше полуторного;

2) для жирного каменного угля  $\alpha = \frac{18,4}{10} = 1,84$ ;

3) для древесного топлива  $\alpha = \frac{20,1}{10} = 2,01$ , т. е. свыше двойного.

Не менее просто вычислить коэффициент избытка воздуха, если по анализу газа известно, сколько процентов кислорода осталось в топочных газах неиспользованными. Если, скажем, в тех же трех случаях оказалось в топочных газах по 5% кислорода, то во всех трех случаях коэффициент избытка воздуха будет равен:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 5} = \frac{21}{16} = 1,3.$$

В числителе показано полное количество кислорода, в знаменателе — действительно необходимое (расчетное); отношение этих количеств и дает вели-

чину коэффициента избытка воздуха. Эти примеры убеждают, что показания газового анализа по содержанию кислорода в топочных газах имеют более универсальный характер. К сожалению, определению содержания кислорода все равно должно предшествовать определение содержания углекислоты, которое хоть и не имеет столь универсального характера, но также вполне удобно используется для оценки численного значения избытка воздуха. Имеется немало различных конструкций автоматических газоанализаторов, работающих на химическом принципе или на различных физических принципах, при помощи которых регистрируется непрерывное содержание углекислоты, по которому судят о колебаниях избытка воздуха в процессе.

При наличии неполного горения расчет избытка воздуха несколько усложняется, так как часть кислорода, оставшегося свободным, не является избыточной, а должна была бы пойти на дожигание несгоревших горючих газов или углерода.

<sup>28</sup> Аналогичное явление наблюдается и при горении порохов, представляющих собой однородную твердую горючую смесь топлива и окислителя. При известных условиях «детонации» смесь может практически мгновенно прореагировать по всему объему, создав резкий скачок давления в закрытом объеме за счет внезапного значительного газообразования (изменения объема). В нормальных условиях подожженная с одного конца смесь постепенно вытесняет с умеренной скоростью распространения фронта горения (например, в сигнальных или фейерверочных ракетах).

Для всех таких готовых горючих смесей характерна возможность горения в любой безвоздушной среде, так как окислитель уже содержится в них в соответствующем количестве (пороха, бикфордов шнур, термитные смеси, газовые горючие смеси). Готовые смеси для жидких топлив и окислителей не могут осуществляться вследствие крайней взрывоопасности.

<sup>29</sup> Воспламенение газообразной горючей смеси при помощи достаточно сильного сжатия, при котором одновременно увеличивается не только плотность газа, но и его температура, применяется в специальном типе двигателей внутреннего сгорания, именуемом дизелем. В отличие от этого в остальных типах двигателей горючая смесь поджигается электрической искрой. При некоторых сортах топлив в цилиндре двигателей могут наблюдаться явления детонационного характера, внешне проявляющиеся в виде сухого металлического стука и опасные по возможному разрушительному воздействию.

<sup>30</sup> Два вида течения — спокойно-струйчатое («ламинарное») и взбудораженно-смесительное («турбулентное») — возникают при любых жидкостях и газах. Переход от первого ко второму (кризис течения) наступает тем позднее, т. е. при тем больших скоростях потока, чем значительнее вязкость вещества, а также чем меньше диаметр (сечение) канала, стенки которого оказывают успокаивающее действие на поток. Вместе с тем возмущение потока, т. е. переход к взбудораженному, смесительному течению, наступает тем скорее, т. е. при тем меньших скоростях, чем больше шероховатость канала (чем значительнее неровности на его стенках), способная вызвать возмущение в спокойном течении потока.

<sup>31</sup> Чем меньше давление, иначе говоря плотность среды, тем свободнее окажется перемещение молекул, тем скорее закончится процесс такого молекулярного смесеобразования. Весьма быстро молекулярная диффузия заканчивается в разреженном газе. В жидкостях, представляющих собой плотные, конденсированные среды, диффузия протекает очень замедленно. Чрезвычайно медленное проникновение молекул одного вещества в другое наблюдается в твердых телах.

<sup>32</sup> Удельной теплоемкостью называется количество тепла (*ккал*), затрачиваемое при повышении температуры на 1°С единицы количества вещества. Из самого определения килокалории как единицы для измерения количества тепла явствует, что теплоемкость воды равна единице (строго говоря — при 15°С). Следовательно, число килокалорий, содержащихся в воде, равно числу градусов, до которых она нагрета (по стогоградусной шкале при атмосферном давлении). Теплоемкость металлов в несколько раз меньше теплоемкости воды; это означает, что нагревание металлов до той же температуры, что и воды, требует в несколько раз меньшего расхода тепла. Так, например, сред-

няя теплоемкость железа составляет только 0,11 ккал/кг на 1°С нагрева. Значит, 1 ккал, способная нагреть 1 кг воды на 1°С, нагреет 1 кг железа на целых 9°С или же на 1°С 9 кг железа.

Различают весовую и объемную теплоемкости. Чтобы пересчитать весовую теплоемкость на объемную, следует первую увеличить на удельный вес вещества, так как удельный вес и означает число килограммов, содержащихся в 1 м<sup>3</sup> вещества. Следовательно, удельный расход тепла на прогрев 1 м<sup>3</sup> вещества на 1°С равен произведению весовой теплоемкости, умноженной на удельный вес этого вещества.

Так как теплоемкость, хотя и сравнительно слабо, но все же несколько увеличивается с повышением температуры, при вычислении накопленного в данном количестве вещества запаса тепла за весь нагрев от 0°С до интересующей нас температуры следует применять не истинные теплоемкости, а так называемые «средние», для которых составляются специальные таблицы, учитывающие последовательное изменение теплоемкостей по мере повышения температуры. Средние теплоемкости также зависят от температуры, но несколько слабее, чем истинные. Для грубых расчетов их принимают за постоянные величины, как бы не зависящие от температуры.

Теплоемкости газов зависят от характера расширения газов и давления. В топочных процессах давление можно принимать постоянным, и из таблиц теплоемкостей необходимо брать теплоемкости, подсчитанные для постоянного давления.

<sup>33</sup> Потеря части теплотворной способности топлива вследствие некоторого недожога горючих газов (СО, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub> и т. п.), носящая название «химического недожога», может явиться следствием трех причин:

- 1) общего недостатка воздуха в процессе ( $\alpha < 1$ );
- 2) местного недостатка воздуха в одной из зон процесса вследствие плохого, неполного смесеобразования в топочной камере;
- 3) низкого температурного уровня всего процесса в целом.

Первая причина не требует добавочных разъяснений. Вторая причина возникает при плохо организованном, вялом вторичном смесеобразовании в топочном пространстве, что становится особенно существенным при неравномерном составе газов, выдаваемых горелкой (или системой горелок). В этом случае различные слои газозвдушенного потока, движущегося через топку, будут характеризоваться либо избытком, либо недостатком воздуха. При перемешивании этих слоев избыточный воздух мог бы пойти на дожигание горючих газов и устранение химического недожога. Характерным для этого случая является одновременное наличие в составе уходящих из топки газов как недожженных горючих газов, так и оставшегося неиспользованным кислорода воздуха. Третья причина — низкая температура горения либо из-за слишком большого избытка воздуха, либо из-за слишком сильного переохлаждения топочного пространства холодными поверхностями нагрева — может вызвать столь вялое протекание самой химической реакции, которая, как известно, в очень сильной степени зависит от температуры, что полное сгорание не успеет осуществиться в пределах топочного объема, и топка начнет выдавать недожженные газы, даже при, казалось бы, полной обеспеченности кислородом.

О степени химического недожога судят по составу газов, который выясняется при помощи газового анализа (см. дополнительное разъяснение 27). Если подробным газовым анализом установлено процентное содержание в топочных газах таких горючих газов, как СО, Н<sub>2</sub> и СН<sub>4</sub>, то нетрудно подсчитать число калорий, потерянных вследствие химического недожога. Для этого надо сначала подсчитать объемы этих газов, каждый в отдельности, приходящиеся на 1 кг сжигаемого топлива. Каждый из этих объемов следует помножить на теплотворную способность этих газов, отнесенную к единице объема (ккал/м<sup>3</sup>).

Объемная теплотворная способность топлива представляет собой величину, равную произведению весовой теплотворной способности на удельный вес ( $\gamma$ ) топлива:

$$K_{\text{вес}} (\text{ккал/кг}) \cdot \gamma (\text{кг/м}^3) = K_{\text{объем}} (\text{ккал/м}^3).$$

Интересующие нас горючие газы обладают следующими объемными теплотворными способностями (их называют также «теплотностями» топлива):

Оксись углерода . . . . .	$K_{CO} = 3\ 050$	ккал/м <sup>3</sup>
Водород* . . . . .	$K_{H_2} = 2\ 570$	„
Метан* . . . . .	$K_{CH_4} = 8\ 550$	„

Объемы указанных газов, приходящиеся на 1 кг сжигаемого топлива, зависят от содержания в топливе углерода и суммарного количества получающихся углеродистых газов CO<sub>2</sub>, CO и CH<sub>4</sub>. Если через С, как всегда, обозначить содержание углерода в топливе, а через V — объемы газов, приходящиеся на каждый килограмм сжигаемого топлива, то легко подсчитать по выражениям:

$$V_{CO} = 1,86 \cdot C \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO + CH_4} \text{ м}^3 \text{ окиси углерода на 1 кг топлива;}$$

$$V_{H_2} = 1,86 \cdot C \cdot \frac{H_2}{CO_2 + CO + CH_4} \text{ м}^3 \text{ водорода на 1 кг топлива;}$$

$$V_{CH_4} = 1,86 \cdot C \cdot \frac{CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} \text{ м}^3 \text{ метана на 1 кг топлива.}$$

Потери тепла, вызванные недожогом этих количеств горючих газов, приходящиеся на каждый килограмм сжигаемого топлива, будут, как ясно из предыдущего, равны произведениям:

потеря тепла от недожженной окиси углерода

$$Q_{CO} = K_{CO} \cdot V_{CO} \text{ ккал на 1 кг сжигаемого топлива;}$$

потеря тепла от недожженного водорода

$$Q_{H_2} = K_{H_2} \cdot V_{H_2} \text{ ккал на 1 кг сжигаемого топлива;}$$

потеря тепла от недожженного метана

$$Q_{CH_4} = K_{CH_4} \cdot V_{CH_4} \text{ ккал на 1 кг сжигаемого топлива.}$$

Полная потеря тепла от химического недожога будет равна сумме этих величин:

$$Q_{\text{хим.недож}} = Q_{CO} + Q_{H_2} + Q_{CH_4} \text{ ккал 1 кг топлива.}$$

Тогда коэффициент полноты тепловыделения  $\varphi$  окажется равным:

$$\varphi = \frac{K_{\text{вес}} - Q_{\text{хим.недож}}}{K_{\text{вес}}}$$

Для примера представим себе, что на газовом угле с теплотворной способностью  $K_{\text{вес}} = 5\ 910$  ккал при зольности 11% и влажности 9%, т. е. при 80% горючей массы и 20% балласта, при содержании углерода, равном 65%, в составе топочных газов обнаружено при избытке  $\alpha = 1,4$  окиси углерода 1,5%, водорода 0,5% и метана 0,5%. Содержание углекислоты в этих газах, если бы не было никакого недожога при избытке  $\alpha = 1,4$  оказалось бы равным 12,5%, а при указанном недожоге концентрация углекислоты уменьшится на 1,5% окиси углерода и 0,5% метана, т. е. станет равной 10,5%.

Даны «нижние пределы» теплотворной способности, т. е. с учетом тепла, расходуемого на испарение воды, образующейся от сгорания водорода. Следует вспомнить определение, данное в гл. 4.

Тогда объемы горючих газов, приходящиеся на 1 кг топлива, по приведенным выражениям окажутся равными:

$$V_{CO} = 1,86 \cdot 0,65 \cdot \frac{1,5}{10,5 + 1,5 + 0,5} = 0,148 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива};$$

$$V_{H_2} = 1,86 \cdot 0,65 \cdot \frac{0,5}{10,5 + 1,5 + 0,5} = 0,048 \text{ м}^3 \text{ на 1 кг топлива};$$

$$V_{CH_4} = 1,86 \cdot 0,65 \cdot \frac{0,5}{10,5 + 1,5 + 0,5} = 0,048 \text{ м}^3 \text{ на 1 м}^3 \text{ топлива}.$$

Помножая эти объемы на объемные теплотворности каждого газа, получим потерянное (невыделенное) этими газами тепло на каждый килограмм топлива в количестве:

$$Q_{CO} = 0,148 \cdot 3050 = 450 \text{ ккал на 1 кг топлива};$$

$$Q_{H_2} = 0,048 \cdot 2570 = 123 \text{ ккал на 1 кг топлива};$$

$$Q_{CH_4} = 0,048 \cdot 8550 = 410 \text{ ккал на 1 кг топлива},$$

что в сумме составит полную потерю от химического недожога:

$$Q_{\text{хим.недож}} = 450 + 123 + 410 = 983 \text{ ккал на 1 кг топлива}.$$

Следовательно, вместо полного тепла, заключенного в топливе (5910 ккал/кг), в этом случае удалось выделить лишь 5910 — 983 = 4927 ккал/кг. В этом случае коэффициент полноты тепловыделения окажется равным, как понятно:

$$\varphi = \frac{4927}{5910} = 0,835,$$

т. е. лишь 83,5% теплотворной способности топлива.

Представим себе теперь, что при помощи соответствующих замеров мы убедились, что в среднем температура уходящих из топки газов равна 900° С.

Используя для приближенных расчетов табл. 16, мы можем подсчитать, что при такой температуре топочных газов их теплосодержание на каждый килограмм топлива будет примерно равно  $4,65 \cdot 900 = 4185$  ккал. Тогда по разности между действительно выделенным теплом с каждого килограмма топлива (4927 ккал/кг) и теплом, воспринятым топочными газами (4185 ккал/кг), получим тепло, отданное на охлаждение топочного пространства в размере  $4927 - 4185 = 742$  ккал на 1 кг топлива. Коэффициент охлаждения («прямая отдача топки» и ее наружное охлаждение) топочного пространства оказывается в этом случае равным:

$$\sigma = \frac{742}{5910} = 0,125,$$

т. е. 12,5% теплотворной способности топлива.

Рассмотрение приведенных в этом примерном расчете цифр показывает, что в данном случае избыток воздуха (разбавление топочных газов) является сравнительно умеренной величиной, не выходящей за обычные его значения при сжигании твердого топлива в слое. Так же умеренно охлаждено и топочное пространство за счет лучевоспринимающих поверхностей нагрева (прямая отдача топки в размере 10—15% характерна для неэкранированных слоевых топек старого типа).

Следовательно, столь сильный химический недожог, составляющий  $983/5910 = 0,165$ , т. е. 16,5% теплотворной способности топлива, мог быть вызван только плохой организацией смесеобразования в топочном объеме, не обеспечившей удовлетворительного перемешивания слоев газа, содержащих повышенные избытки воздуха, со слоями газа, в которых вследствие неравномерной работы слоя оказался избыток топлива в виде горючих газов.

Такого рода результат частенько имеет место при работе слоевых топок устаревшего типа. Вызывается он неравномерностью работы слоя, неудачной конфигурацией камеры, отсутствием вторичного острого дутья и низкой камерой, т. е. низкой посадкой холодных поверхностей нагрева над слоем. Все эти причины, свидетельствующие о неудовлетворительной конструкции топки, прозоры или вместе не дают завершить процесс смесеобразования между горючими газами и кислородом воздуха в пределах топки, а следовательно, и добиться высокой полноты тепловыделения. Средствами современной организации топочных процессов легко во всех случаях добиться этой высокой полноты, в основном за счет рациональных способов организации вторичного смесеобразования в топочном объеме.

<sup>34</sup> Механический недожог особенно характерен при сжигании твердого топлива, хотя может наблюдаться и при сжигании жидких сортов топлива в виде покидающих топочное пространство неиспаренных или испарившихся капель, способных снова сгущаться в исходное жидкое топливо в холодных участках топки. Существо тепловой потери сводится при механическом недожоге к тому, что часть топлива механически выпадает из процесса газификации и смесеобразования с воздухом, а следовательно, и из горения.

Однако в обычной топочной практике за механический недожог принимается только невыжженный углерод. Это делается на том основании, что в той или иной мере в громадном большинстве топок для твердого топлива последнее успевает пройти ту часть тепловой обработки, которая связана с выходом летучих, что приводит к потере только коксовой, т. е. углеродной, основы топлива. Твердый кокс может выйти из процесса недогазифицированным либо в виде провала его мелких частиц через воздушные прозоры колосниковой решетки, либо в виде шлаков, внутри которых оказывается кокс, разобренный шлаками с воздухом, либо в виде уноса мелких частиц топлива через топочное пространство в холодные газоходы и трубу. К этому же можно отнести ту часть твердого углерода, которая покидает топку в виде сажи — углерода, отщепившегося в твердом виде от органических газовых молекул.

Весовая теплотворная способность углерода равна около 8000 ккал/кг (точнее 7850). Если испытанием пробы провала, шлаков или уноса установлено, сколько углерода осталось невыжженным на каждый килограмм топлива, то потеря тепла окажется равной произведению теплотворной способности углерода на его количество, выраженному в долях килограмма (приходящемуся на 1 кг топлива). Обозначим это количество через  $C_{\text{мех.недож}}$ . Тогда потеря тепла на 1 кг углерода окажется равной:

$$Q_{\text{мех.недож}} = 8000 \cdot C_{\text{мех.недож}} \text{ ккал на 1 кг топлива.}$$

Представим себе, что в примере со слоевым сжиганием газового каменного угля, приведенном в дополнительном пояснении 33, имел место недожог углерода в размере 2% от 1 кг топлива; это означает, что в процессе газификации и горения приняли участие не все 65% углерода, содержавшегося в топливе, а только 63%. Тогда, как понятно, потеря тепла от механического недожога оказалась бы равной:

$$Q_{\text{мех.недож}} = 8000 \cdot 0,02 = 160 \text{ ккал на 1 кг топлива.}$$

Если присоединить эту потерю к потере от химического недожога, которая была подсчитана для этого случая, то общий недожог (химический и механический) оказался бы равным:

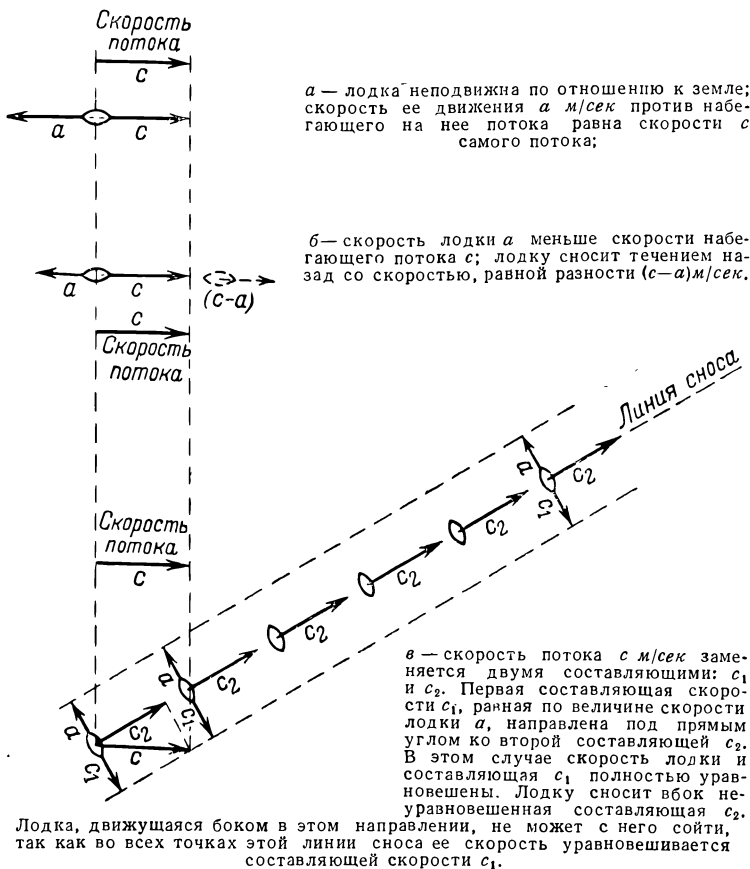
$$Q_{\text{недож}} = Q_{\text{хим.недож}} + Q_{\text{мех.недож}} = 983 + 160 = 1143 \text{ ккал/кг.}$$

При таком общем недожоге коэффициент полноты тепловыделения оказался бы еще ниже и равнялся бы отношению

$$\varphi = \frac{5910 - 1143}{5910} = 0,81.$$



37 В том случае, когда скорость лодки  $a$  (фиг. 81,а), направленная против потока, оказывается меньше скорости потока  $c$  (фиг. 81,б), лодку будет сносить назад по потоку со скоростью, равной разности этих скоростей ( $c-a$ ). Представим теперь себе, что та же лодка, движущаяся медленнее потока, изменила направление своего движения под некоторым углом к направлению движения потока (фиг. 81,в). Тогда она начнет передвигаться к противоположному берегу, но одновременно поток будет ее сносить в сторону. Если по известному геометрическому правилу разложить скорость потока на



Фиг. 81. Полное и частичное уравновешивание скорости лодки, движущейся против сносящего ее потока.

две составляющие, полностью заменяющие истинную величину и направление этой скорости: одну — направленную под прямым углом к линии сноса, и другую — направленную вдоль линии сноса, то окажется, что первая составляющая скорости потока действительно уравновешена скоростью движения самой лодки. Вторая же составляющая скорости потока ничем не уравновешена и будет увлекать лодку вбок именно по возникшей линии сноса. Во всех точках этой линии сноса действительная скорость движения лодки (скорость  $a$  на фиг. 81) окажется уравновешенной перпендикулярной составляющей скорости потока (скорость  $c_1$  на фиг. 81). Таким образом, линия сноса является линией равнодействия этих двух скоростей, а скорость сноса определится второй составляющей потока, направленной вдоль этой линии (скорость  $c_2$  на фиг. 81). Представим теперь себе, что прямо поперек потока выстроилось множество

лодок рядом друг с другом и движется одновременно против потока с одинаковой с ним скоростью. Наблюдатель на берегу увидит в этом случае неподвижный прямой (поперечный) фронт лодок, никуда не сносимых. Если же лодки одновременно движутся против потока с меньшей, чем у него, скоростью, их все начнет сносить поток по одной и той же линии сноса, как это показано на фиг. 78. Наблюдатель с берега снова увидит установившийся, как бы неподвижный фронт лодок, протянувшийся по линии сноса, но теперь уже ни одна лодка не будет находиться в неподвижности, а последовательно, одна за другой они будут по этой линии относиться к противоположному берегу. Такой фронт устойчиво может существовать только в том случае, если сносимые лодки будут непрерывно заменяться другими в начальной точке их отправления. Если же запас лодок будет исчерпан, то после того как последнюю лодку отнесет к противоположному берегу, косой фронт лодок исчезнет.

<sup>38</sup> Начавшийся ветер или сквозняк может задуть недостаточно устойчивый и малопродуктивный очажок горения, подобно тому как мы задуваем свечу. Однако если даже ничтожный по теплопроизводительности очажок сколько-нибудь защищен от непосредственного воздействия потока воздуха и последний имеет возможность вмешиваться только в зону уже развивающегося процесса, не затрагивая первичной поджигательной зоны, то такое вмешательство приведет только к развитию пламенного процесса и его распространению на весь доступный запас горючего, нередко превращая очаг горения в стихийное бедствие. Коренным мероприятием при ликвидации стихийно возникшего очага горения является изоляция его от непосредственного воздействия воздушной атмосферы на весь период времени, достаточный для снижения температуры этого очага до безопасного предела.

<sup>39</sup> В современной энергетике получают все большее применение газотурбинные двигатели и двигатели реактивного типа. В первом случае топочные газы из специальной топки, работающей под давлением, направляются прямо на лопатки турбины, при помощи которой соответствующая часть тепловой и кинетической энергии (энергии движения) превращается в механическую работу (или электрическую энергию). Работа реактивного двигателя основана на отгаливующем действии вытекающей с очень большими скоростями струи топочных газов, совершенно подобно тому, как это имеет место в обычной пороховой ракете (фейерверковые или сигнальные ракеты). В современных реактивных двигателях, применяемых в артиллерийском деле (реактивные снаряды), или в скоростной авиации применение жидкого топлива оказывается эффективнее применения порохов, выделяющих меньше тепловой энергии вследствие сравнительно большого содержания балласта.

В обоих случаях топка играет роль основного органа двигателя. В отличие от «силовых топков» топки «тепловые» обслуживают теплообменные процессы (паровые котлы, печи, огневые сушилки и т. п.).

<sup>40</sup> Свидетельством высокой температуры, развиваемой пламенем керосиновой лампы, является яркая светимость этого пламени, возникающая от накала углеродных частичек, выделяющихся в зоне газообразования при расщеплении углеводородных молекул. Для увеличения яркости пламени керосиновых и особенно спиртовых ламп применялись в свое время огнеупорные сетчатые колпачки, обеспечивавшие усиление светимости за счет собственного раскала.

Зона высокой температуры прижата к грибку горелки окружающим ее потоком избыточного воздуха, назначением которого является охлаждение стекла.

<sup>41</sup> Если удельный вес воды принять за единицу, то удельный вес нефти окажется равным 0,8—0,9 (в обычных единицах удельный вес воды равен 1 000 кг/м<sup>3</sup>). По этой причине нефть как более легкая жидкость всплывает на поверхность воды (вытесняется кверху более тяжелой водой). Наиболее легкими погонями нефти являются: бензин (удельный вес составляет около 0,7 удельного веса воды) и керосин (удельный вес составляет около 0,8 удельного веса воды). Самыми тяжелыми являются нефтяные остатки от перегонки: удельный вес мазута свыше 0,9—0,95 удельного веса воды.

<sup>42</sup> Струя сжатого воздуха или пара пропускается через расширительное сопло, в котором расширенный воздух или пар достигает скоростей, близких

к скорости распространения звука в воздухе или газе (около 330 м/сек при температуре воздуха около 0°С). Приходя в соприкосновение с поверхностью медленно текущей жидкости, расширенный воздух или пар дробит эту поверхность, разрывая сплошную струю жидкости на мельчайшие капли. Работа форсунок этого типа сопровождается неприятным шумом.

<sup>43</sup> Кусочек мела в виде прямоугольного кубика размером 1 см<sup>3</sup> имеет шесть граней, суммарная поверхность которых равна 6 см<sup>2</sup> при весе всего кусочка, равному нескольким граммам. Если разрезать этот кусочек пополам, то добавятся еще две поверхности, каждая по 1 см<sup>2</sup>. Новый поперечный разрез добавит еще две такие поверхности. Таким образом, дробление вызывает значительное увеличение суммарной поверхности, которое при тончайшем распылении может довести эту суммарную поверхность до величин, превышающей 60 м<sup>2</sup>. При таком чрезвычайном развитии удельной поверхности (приходящейся на те же несколько граммов веса) она сопротивляется движению пылинки в воздухе под воздействием их собственной силы тяжести, подобно тому как достаточно большой парашют сопротивляется падению человека в воздухе, резко замедляя это падение. По этой причине падение пыли в воздухе также резко затормаживается, и она начинает «витать» в воздухе, пассивно подчиняясь движению самого воздуха. На этом эффекте основано, например, действие дымовых завес, туманов и т. п.

<sup>44</sup> Сопротивление горящего слоя топлива может оказаться весьма различным в зависимости от толщины и плотности слоя. При сравнительно слабой трубной тяге применяются решетки с относительно большим живым сечением: площадь воздушных проходов в таких решетках составляет до 20—25% всей площади решетки. В этом случае основное сопротивление создает топливный слой. При достаточно сильной тягодутьевой системе применяются «закатые» решетки с живым сечением, не превышающим 8—10% всей площади решетки. В этом случае суммарное сопротивление решетки становится соизмеримым с сопротивлением слоя топлива. Это способствует более равномерному распределению воздуха по всей площади слоя и, следовательно, более равномерному выгоранию топлива. При этом процесс становится менее чувствительным к возникающим прогарам в слое.

Сопротивление слоя и решетки, выраженное в миллиметрах водяного столба, колеблется в широких пределах в зависимости от толщины и плотности слоя и тепловой удельной нагрузки последнего (от 4 мм вод. ст. в дровяных топках до 80 мм вод. ст. на рядовом антраците).

<sup>45</sup> Частицы углей со спекающимся коксом ведут себя несколько своеобразно. Проходя при нагреве период размягчения примерно до 300—350°С, они могут увеличиваться в размере за счет раздутия, возникающего от напора скопившихся внутри газов разложения. При дальнейшем прогреве поверхность их откоксувается и твердеет, после чего, потеряв эластичность и приобретя хрупкость, коксовая оболочка может «взорваться» от чрезмерного напора газов разложения, разлетевшись на осколки (или через образовавшийся разрыв извергнуть размягченную пластическую массу).

<sup>46</sup> Скорость охлаждения твердой поверхности маленькой частицы от соприкосновения с окружающим ее более холодным газом (воздухом) обратно пропорциональна линейному размеру этой частицы: чем меньше диаметр этой частицы, тем скорее она охлаждается. Вследствие этого маленькие частицы угольной пыли отдают тепло окружающему их потоку воздуха быстрее, чем получают это тепло от излучения пламени и раскаленных стен топки.

В свою очередь, если несущие угольную пыль топочные газы (или горячий воздух) обладают температурой, превышающей температуру самих пылинок, последние будут прогреваться от этих газов тем скорее, чем они мельче. Это и делает роль сильно подогретого воздуха или возвращенных к началу факела высокотемпературных топочных газов столь существенной для быстрого развития газификационных процессов и возникновения первичного фронта воспламенения пылеугольного факела. Понятно, что при одинаковых размерах частиц газификация их пойдет тем быстрее, чем выше будет температура несущей их газообразной среды.

Автор *Кнорре Георгий Федорович*  
„ЧТО ТАКОЕ ГОРЕНИЕ?“

Редактор *С. А. Николаев*  
Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

\* \* \*

Сдано в набор 18/XI 1954 г.  
Подписано к печати 25/II 1955 г.  
Бумага 60 × 92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. 14 п. л.  
Уч.-изд. л. 15,6 Тир. 10 000  
Т-01714. Цена 8 р. 80 к. Зак. 1492

---

Типография Госэнергоиздата.  
Москва, Шлюзовая наб., 10.

### ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
29	19 снизу	и аммиачные	(аммиачные)
30	7 „	и аммиачных	(аммиачных)
31	Фиг. 8	Правое предсердие Правый желудочек Левое предсердие Левый желудочек	Левое предсердие Левый желудочек Правое предсердие Правый желудочек
73	1 снизу	окислителя	(окислителя)

Г. Ф. Кнорре „Что такое горение?“.

Цена 8 р. 80 к.