

4. В чем заключается петрографическое описание состава бурых и каменных углей?

5. По каким причинам в твердом топливе всегда присутствуют минеральные примеси? Какие вещества входят в состав таких примесей?

6. Какие изменения происходят в составе минеральных примесей топлива в процессе превращения их в золу?

7. В силу каких физико-химических явлений в твердых топливах присутствует влага? Как влагосодержание топлива зависит от внешних условий?

8. Какой смысл имеют обозначения W_t^r , W_{ex}^a , W_h , W^a , $W_{сып}$, $W_{см}$?

9. Что собой представляет водоугольное топливо? Каковы его преимущества перед обычным углем?

10. Каковы условия обеспечения стабильности ВУТ при хранении?

11. Чем отличается ВУТ от ЭКОВУТ?

12. Как определяется стабильность свойств ВУТ?

13. Сформулируйте условия получения ВУТ высокого качества.

Глава 5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

5.1. Плотность и пористость

Все виды твердого топлива представляют собой неоднородные материалы, пронизанные порами и трещинами. Поэтому при определений их плотности, т.е. массы, приходящейся на единицу объема, получаются различные значения в зависимости от того, какие структурные элементы топлива входят в рассматриваемый объем. Соответственно различают несколько показателей плотности.

Действительная плотность. Этим термином обозначают значение плотности в объеме, занимаемом твердыми составными частями топлива. Значением действительной плотности топлива пользуются при выяснении его строения, определении пористости, в расчетах систем пылеприготовления, процессов горения частиц топлива в топке и т.п.

Определение действительной плотности¹ d_r , г/см³, основано на соотношении

$$d_r = m/v_T, \quad (5.1)$$

где m — масса образца топлива, г; v_T — объем входящих в него твердых веществ без объема пор, см³.

В качестве образца топлива берут навеску аналитической пробы. Объем v_T определяют с помощью пикнометра (см. § 3.4) вместимостью около 50 см³. По ГОСТ 2160-92* сначала находят массу m_1 пикнометра, заполненного до метки определенной пикнометрической жидкостью, затем массу m_2 того же пикнометра с навеской топлива массой m_3 и с той же жидкостью, уровень которой вновь доводится до метки. Пикнометрической жидкостью может служить спирт (этиловый или метиловый, но последний на практике применять избегают) или вода с добавкой 0,5 % смачивателя — поверхно-

¹ Индекс r от английского эквивалента термина действительная плотность — *real density*.

стно-активного вещества ОП-7, ОП-10, ДБ, «контакт Петрова» и др. От пикнометрической жидкости требуются хорошая смачивающая способность по отношению к топливу и точно известная плотность d_p , г/см³.

Действительную плотность топлива d_r^d рассчитывают на его сухое состояние. Рассмотрим вывод расчетной формулы для случая, когда пикнометрической жидкостью служит вода. Масса сухого вещества во взятой навеске топлива составляет

$$m = m_3(1 - W^a/100); \quad (5.2)$$

объем v_T найдем по массе воды $\Delta m_{ж}$, не поместившейся в пикнометр из-за присутствия в нем навески:

$$\Delta m_{ж} = m_1 - (m_2 - m). \quad (5.3)$$

Учитывая, что искомый объем твердой фазы составляет $v_T = \Delta m_{ж}/d_p$, и объединяя выражения (5.1)—(5.3), получаем окончательную расчетную формулу, г/см³:

$$d_r^d = \frac{m_3(1 - W^a/100)d_p}{m_1 - m_2 + m_3(1 - W^a/100)}. \quad (5.4)$$

Действительная плотность топлива зависит от плотности его органической части, а также от содержания и характера присутствующих в топливе минеральных примесей, плотность которых всегда выше плотности органических компонентов. Поэтому с ростом зольности топлива плотность его растет (приблизительно на 0,01 г/см³ с увеличением зольности на 1 %).

Средняя плотность минеральных примесей в пересчете на золу для большинства видов топлива составляет 2,9 г/см³. Обозначив плотность органической части d_o , найдем объем, занимаемый навеской 100 г сухого топлива при действительной плотности его d_r^d , и приравняем этот объем сумме объемов органической и минеральной частей:

$$100/d_r^d = (100 - A^d)/d_o + A^d/2,9. \quad (5.5)$$

Отсюда после преобразований получим формулу, связывающую действительную плотность с зольностью угля:

$$d_r^d = \frac{100d_o}{100 - A^d(1 - d_o/2,9)}. \quad (5.6)$$

Аналогично можно получить следующее уточненное соотношение, в котором учитывается, что из всех минеральных компонентов по плотности резко выделяется пирит (5 г/см³), а среднюю плотность всех остальных компонентов можно принять равной 2,6 г/см³. Тогда

$$\frac{100}{d_r^d} = \frac{100 - A^d - [\text{FeS}_2]^d}{d_o} + \frac{[\text{FeS}_2]^d}{5} + \frac{A^d}{2,6}, \quad (5.7)$$

где $[\text{FeS}_2]^d$ — содержание пирита, % сухой массы топлива.

С помощью (5.5) и (5.7) можно не только находить d_r^d при известных d_o и зольности, но и решать обратную задачу: определять плотность органической части d_o по экспериментальным данным. Значение d_o зависит от степени углефикации топлива. Для гумолитов с переходом от бурых к зрелым каменным углям d_o несколько уменьшается (с 1,5 до 1,3 г/см³), дальнейший рост степени углефикации вызывает быстрое увеличение плотности органической части до 2 г/см³. Эта зависимость может быть описана следующими эмпирическими формулами, в которых используется связь степени углефикации с элементарным составом топлива:

для антрацитов и каменных углей наивысшей степени углефикации (марки Т)

$$d_o = 100/(0,53C^{daf} + 5H^{daf}); \quad (5.8)$$

для прочих углей

$$d_o = 100/(0,354C^{daf} + 4,25H^{daf} + 23). \quad (5.9)$$

Кажущаяся плотность и пористость. Кажущаяся плотность¹ d_a — это плотность, усредненная в объеме $v_{общ}$ кусков (частиц) топлива, включающем объем твердой части v_T и объем пор $v_{п}$:

$$d_a = m/v_{общ}, \quad (5.10)$$

где m — масса взятых кусков (частиц).

Пористость P — это доля объема кусков (частиц), приходящаяся на поры. Ее представляют в долях единицы или в процентах; в последнем случае

$$P = (v_{п}/v_{общ}) \cdot 100. \quad (5.11)$$

¹ Индекс a от английского названия *apparent density*.

Представив $v_{\Pi} = v_{\text{общ}} - v_{\Gamma}$, получим из (5.11) формулу, которая связывает пористость топлива с показателями его плотности:

$$P = \frac{v_{\text{общ}} - v_{\Gamma}}{v_{\text{общ}}} 100. \quad (5.12)$$

Таким образом, пористость можно рассчитать по экспериментально найденным значениям действительной и кажущейся плотности.

Задача определения кажущейся плотности сводится к измерению массы (взвешиванию) образца топлива и определению его общего объема $v_{\text{общ}}$. Последнее по ГОСТ 2160-83* может осуществляться одним из двух методов: гравиметрическим или объемным.

Гравиметрический метод иногда называют методом гидростатического взвешивания. Он основан на измерении силы Архимеда, которая действует на кусок топлива, погруженный в жидкость. Эту силу F_A нетрудно определить, взвесив образец на воздухе (m_1) и в погруженном состоянии (m_2):

$$F_A = m_1 - m_2.$$

Как известно, сила Архимеда равна произведению объема погруженного тела на плотность жидкости, следовательно,

$$F_A = m_1 - m_2 = v_{\text{общ}} d_{\text{ж}}, \quad (5.13)$$

откуда

$$v_{\text{общ}} = (m_1 - m_2) / d_{\text{ж}}$$

и

$$d_a = m / v_{\text{общ}} = m d_{\text{ж}} / (m_1 - m_2). \quad (5.14)$$

В качестве жидкости обычно используют дистиллированную воду, $d_{\text{ж}} = 0,9982 \text{ г/см}^3$ (при 20°C).

Объемный метод определения кажущейся плотности основан на измерении общего объема кусков непосредственно по объему вытесненной ими жидкости. Измерение проводят либо в специальной мерной колбе с длинной горловиной, на которой нанесены деления, либо в обычном мерном цилиндре. На кажущуюся плотность может существенно влиять влажность топлива в основном из-за заполнения влагой пор и трещин в топливе. Найдем зависимость d_a от влажности W^r .

Предположим, что частица объемом $v_{\text{общ}}$ при влажности W^r имеет массу m . Если насытить эту частицу влагой до предела, ее влажность будет $W_{\text{макс}}$, а масса $m_{\text{макс}} = m(100 - W^r) / (100 - W_{\text{макс}})$.

Поры полностью заполнены водой, поэтому объем частицы в таком состоянии можно найти (приблизенно), просуммировав объем твердой ее части и объем воды. Каждый из этих объемов определяют делением соответствующей массы на плотность (плотность воды принимают равной 1 г/см^3):

$$v_{\text{общ}} = m_{\text{макс}} = \frac{100 - W_{\text{макс}}}{100 - d_r^d} + \frac{m_{\text{макс}} W_{\text{макс}}}{100}. \quad (5.15)$$

Разделив на $v_{\text{общ}}$ массу m , получим искомое выражение для кажущейся плотности:

$$\begin{aligned} d_a &= \frac{m}{v_{\text{общ}}} = \frac{m}{m_{\text{макс}} \left(\frac{100 - W_{\text{макс}}}{100 d_r^d + W_{\text{макс}} / 100} \right)} = \\ &= \frac{100 - W_{\text{макс}}}{100 - W^r} \frac{100 d_r^d}{100 + W_{\text{макс}} (d_r^d - 1)}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Насыпная плотность и порозность. Насыпная плотность, или плотность в засыпке, $d_{\text{н}}$ — это масса, заключенная в единице объема слоя, состоящего из большого числа кусков (частиц) топлива:

$$d_{\text{н}} = m / v_{\text{сл}} \quad (5.17)$$

где $v_{\text{сл}}$ — объем слоя топлива, включающий объемы твердого вещества v_{Γ} , пор внутри частиц v_{Π} и промежутков между частицами $v_{\text{пр}}$, т.е. $v_{\text{сл}} = v_{\Gamma} + v_{\Pi} + v_{\text{пр}}$.

Доля объема слоя, приходящаяся на промежутки между частицами, называется *порозностью слоя* Π :

$$\Pi = (v_{\text{пр}} / v_{\text{сл}}) \cdot 100. \quad (5.18)$$

Как и пористость, величину Π выражают в долях единицы или процентах. Будем представлять порозность в процентах.

Выделим мысленно в слое топлива объем 100 см^3 с массой $100 d_{\text{н}}$. Частицы (вместе с порами) составят в нем $100 d_{\text{н}} / d_a$, см^3 , а объем промежутков между частицами будет равен порозности Π , см^3 . Тогда

$$100 = 100 d_{\text{н}} / d_a + \Pi, \quad (5.19)$$

откуда следует

$$\Pi = 100(d_a - d_n)/d_a \quad (5.20)$$

Как уже было показано, плотность d_a связана с пористостью топлива. Из (5.12) имеем

$$d_a = d_r^d (100 - P) / 100. \quad (5.21)$$

Подставив это выражение в формулу (5.20), после несложных преобразований получим

$$\Pi = \frac{100 - P - (d_n / d_r^d) \cdot 100}{100 - P} \cdot 100. \quad (5.22)$$

Отсюда следует

$$d_n = d_r^d (100 - \Pi)(100 - P) \cdot 10^{-4}. \quad (5.23)$$

Из полученной формулы видно, что на насыпную плотность влияют те же факторы, что и на d_r , d_a , и, кроме того, плотность укладки частиц в слое, характеризующая порозностью.

У идеализированной модели слоя, состоящей из шаров одинакового диаметра, порозность не зависит от этого диаметра, а определяется только способом укладки шаров: от 26 % для наиболее плотной до 46,6 % для простой кубической укладки. Реальный слой топлива отличается разнообразием размеров и форм частиц, а также возможностью возникновения сил сцепления между соприкасающимися частицами.

Экспериментально насыпную плотность топлива определяют заполнением топливом емкости известного объема и взвешиванием поместившегося в емкость топлива. Мерную емкость выбирают с учетом размера кусков (частиц) контролируемого топлива. Топливо при подготовке к данному определению не подвергают измельчению и подсушке, так как изменение размеров кусков и влажности существенно влияет на насыпную плотность (рис. 5.1).

Насыпная плотность топлива может значительно (на 25—30 %) изменяться при воздействии на слой внешних сил: инерционных, гравитационных и др. Поэтому для получения воспроизводимых значений d_n мерную емкость следует заполнять строго определенным способом. Если требуется найти плотность максимально уплотненного слоя, топливо в мерном сосуде послойно утрамбовывают или уплотняют вибрацией.

Насыпная плотность подсушенного и размолотого топлива (топливной пыли) зависит от меньшего числа факторов и при измерениях дает относительно хорошо воспроизводимые значения. С приемлемой точностью ее можно найти также расчетным путем. Ниже приведена одна из пригодных для этого формул. Она связывает d_n с действительной плотностью топлива и размерами его частиц, выраженными через специфический показатель R_{90} — полный остаток пыли на сите № 90 (с размером ячейки 90 мкм, см. § 5.3), формулой

$$d_n = 0,35d_r^d + 0,004R_{90}. \quad (5.24)$$

5.2. Сыпучесть

Сыпучесть — способность кусков и частиц топлива перемещаться относительно друг друга и прилегающих поверхностей под действием силы тяжести. Данное свойство используют в устройствах для транспортирования топлива на электростанциях.

Показатели сыпучести. Перемещение кусков и частиц внутри слоя топлива под действием внешней силы представляет собой сдвиг материала в плоскостях, где эти силы создают наибольшие напряжения. Следовательно, сыпучесть можно охарактеризовать через *сопротивление сдвигу*. Сила сопротивления — это по существу сила трения, поэтому в качестве основного критерия сыпучести топлива принимают *коэффициент трения*. Для его измерения служит специальный прибор — *трибометр* (рис. 5.2), в котором горизонтально перемещают топливо, засыпанное в коробку без дна, и измеряют силу трения T при действии перпендикулярно плоскости скольжения

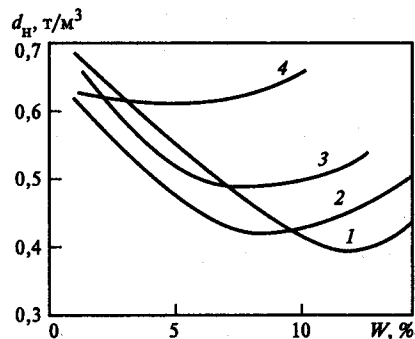


Рис. 5.1. Зависимость насыпной плотности угля от его влажности при различном размере частиц:

1 — частицы 0—0,5 мм; 2 — 0,5—1,5 мм; 3 — 1,5—5 мм; 4 — 5—6 мм

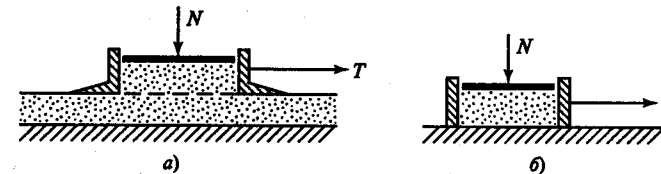


Рис. 5.2. Схема трибометра — прибора для определения коэффициентов внутреннего (а) и внешнего (б) трения

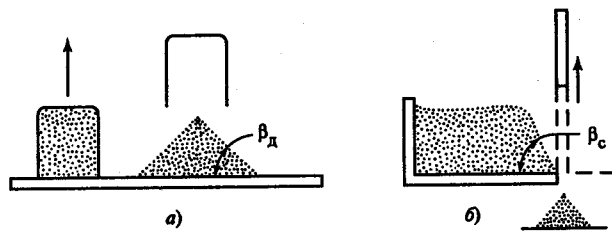


Рис. 5.3. Определение динамического (а) и статического (б) углов естественного откоса

сжимающей нагрузки N . Коэффициент трения определяют как отношение этих сил:

$$\mu = T/N. \quad (5.25)$$

В качестве показателя сыпучести применяют два варианта коэффициента трения. Первый из них — коэффициент *внутреннего трения*, характеризующий силы сопротивления движению, действующие внутри слоя топлива. Второй вариант — коэффициент *внешнего трения*, отражающий сопротивление при движении слоя топлива по поверхности определенного конструкционного материала.

Помимо коэффициентов трения в качестве показателей сыпучести топлива широко применяют *углы естественного откоса*, измерять которые намного проще, чем силы трения. Для углов естественного откоса также существуют два варианта измерений. Когда откос формируется движущимся сыпучим материалом, напримерсыпаемым из поднятого сосуда (рис. 5.3, а), угол откоса называется *динамическим* β_d . Второй вариант — обрушение части слоя, находившегося в неподвижном состоянии, после того как удалена одна из подпиравших его стенок (рис. 5.3, б). В этом случае угол откоса называется *статическим* β_c , или углом обрушения. Этот угол для топлива обычно меньше, чем динамический угол естественного откоса.

Увеличение коэффициентов трения и углов естественного откоса означает ухудшение сыпучести топлива. При $\mu \gg 1$ и $\beta_c > 60^\circ$ в работе системы топливоподачи ТЭС возникают серьезные затруднения. Полная потеря топливом сыпучести характеризуется значениями $\beta_c \geq 90^\circ$.

Основные факторы, влияющие на сыпучесть топлива. Для идеально сыпучих материалов (сухого просеянного песка, дробленого антрацита и т.п.) коэффициенты трения μ сохраняют постоянное значение в широком диапазоне сжимающих нагрузок, начиная с $N = 0$. Это означает, что между силой трения T и нагрузкой N существует прямая пропорциональность (линия 1 на рис. 5.4).

Большинство видов твердого топлива не являются идеально сыпучими материалами; зависимость T от N на начальном участке для них имеет нелинейный характер, превращаясь в прямую только правее точки A (кривая 2). Для линейного участка Б.В. Дерягиным предложено уравнение

$$T = \mu_0(S_0 p + N), \quad (5.26)$$

в котором внешняя сжимающая нагрузка N суммируется с силой стягивания частиц внутри слоя сыпучего материала. Сила стягивания определяется произведением удельного давления прилипания частиц p на площадь S_0 той поверхности, где действует это давление. Коэффициент μ_0 был назван истинным коэффициентом трения, поскольку правее точки A он сохраняет постоянное значение, тогда как коэффициент, определяемый по формуле (5.20), получается переменным во всем диапазоне изменения нагрузки N . Нелинейность начального участка кривой 2 на рис. 5.4 объясняется тем, что на этом участке давление p увеличивается от нуля до некоторого максимального значения при соответствующем увеличении нагрузки N . Найти числовое значение произведения $\mu_0 S_0 p$ можно продолжением линейного участка кривой 2 до пересечения с осью ординат.

Уравнение (5.26) показывает, что движущийся слой топлива испытывает действие не только внешних, но и внутренних сил сопротивления. Силы сцепления, действующие между одинаковыми поверхностями, в данном случае поверхностями частиц топлива, называются силами *когезии*; силы сцепления между разнородными поверхностями, например между частицей и конструкционным материалом, — силами *адгезии*.

Главная роль в явлениях когезии и адгезии принадлежит влаге, содержащейся в топливе, поэтому с ростом влажности его сыпучесть ухудшается. На рис. 5.5 показано влияние влажности на коэффициент внутреннего трения μ и углы естественного откоса. При увеличении W^r до определенного предела, соответствующего влаге сыпучести $W_{\text{сып}}$ (см. § 4.3), коэффициент трения существенно не изменяется; дальнейшее увеличение влажности вызывает резкое возрастание μ . Углы естественного откоса с увеличением влажности

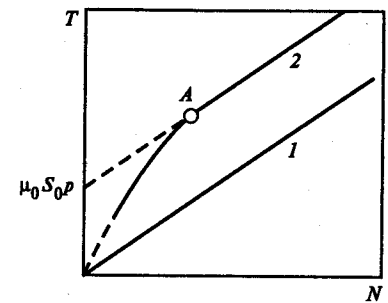


Рис. 5.4. Зависимость силы трения T от сжимающей нагрузки N для идеального сыпучего материала (1) и большинства видов топлива (2)

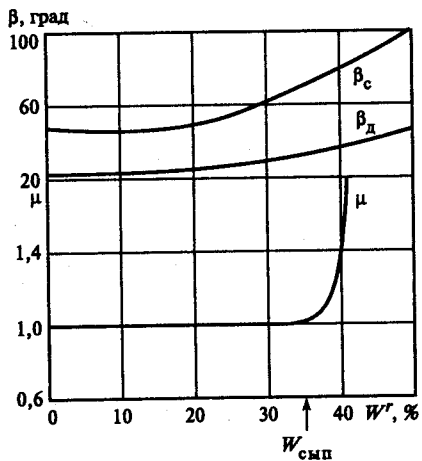


Рис. 5.5. Зависимость коэффициента внутреннего трения μ и углов естественного откоса β_c и β_d от влажности для подмосковного бурого угля

изменяются менее резко; при $W^r > W_{смп}$ статический угол становится больше 60° .

Можно выделить две основные причины, по которым увеличение влажности топлива приводит к ухудшению его сыпучести (рис. 5.6). Первая — это образование водяных «мостиков» в результате слияния пленок внешней влаги, покрывающих соседние частицы. На поверхности раздела вода — воздух действуют силы поверхностного натяжения, которые стремятся уменьшить площадь этой поверхности, т.е. стягивают «мостик». Дополнительная сила взаимного притяжения частиц возникает как следствие разрежения, которое создается в водяной прослойке из-за всасывания воды в капилляры (поры), пронизывающие частицы топлива.

Вторая причина проявляется у топлива с низкой степенью углефикации, обладающего свойствами гидрофильного геля, в частности пластичностью. Частицы твердых материалов (непластичные), находясь в слое, соприкасаются с соседними частицами только в отдельных точках. Из-за очень малой площади соприкосновения силы межмолекулярного притяжения в местах касания практически не влияют на свойства слоя. Если же частицы пластичны, они под действием внешней нагрузки деформируются, «вдавливается» друг в друга, так что площадь контакта становится значительной, и силы межмолекулярного притяжения проявляются вполне ощутимо. Пластич-

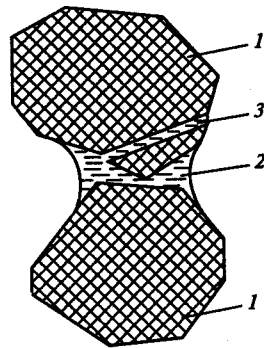


Рис. 5.6. Схема образования водяных «мостиков» между частицами топлива в слое:

1 — частицы; 2 — водяной «мостик»; 3 — капилляр

ность гидрофильных гелей, какими являются, например бурые угли, увеличивается с ростом влажности.

Пластичные тела обычно деформируются медленно. Этой особенностью обусловлена склонность слоя пластичных частиц к *слеживанию* — постепенному ухудшению сыпучести в процессе выдерживания этого слоя в неподвижном состоянии. Так, топливо, обладавшее при засыпке в бункер удовлетворительной сыпучестью, после нескольких часов или суток пребывания в бункере может от слеживания полностью потерять сыпучесть. Опорожнение бункера в таких случаях затруднено.

Пластичность топливных частиц и ее отрицательное воздействие на сыпучесть иногда обусловлены свойствами не только органической, но и минеральной части топлива, если последняя составляет в нем большую долю и представлена в основном глинистыми веществами.

Все сказанное выше о механизме возникновения сил когезии в местах соприкосновения частиц друг с другом справедливо и для сил адгезии, действующих между частицами и конструкционными материалами стенок топливного тракта. Адгезия топлива возможна только к гидрофильным материалам, поэтому покрытие стенок топливного тракта гидрофобными (водоотталкивающими) материалами (например, фторопластом) позволяет исключить налипание топлива на стенки.

5.3. Гранулометрический состав

Гранулометрический состав — это количественная характеристика топлива по размеру кусков (частиц), которую на электростанциях определяют главным образом рассевом проб на контрольных ситах (*ситовый анализ*).

В тех случаях, когда потребители нуждаются в топливе определенной крупности, топливо сортируют по размерам кусков с помощью специальных сит большого размера, приводимых в движение особыми механизмами — грохотами. Совокупность кусков (частиц), размеры которых определяются размерами отверстий в ситах, используемых для сортировки топлива, называют *классом крупности*¹. Выход определенного класса крупности — это отношение его массы к сумме масс всех классов, полученных при расеве данной партии или пробы топлива.

¹ Вместо термина «класс крупности» ранее нередко применяли термин «фракция». Сейчас это недопустимо, так как по действующему стандарту термин «фракция» употребляется для других объектов.

Классификация топлива по размеру кусков. Стандартом (ГОСТ 19242-73*) установлены следующие границы размеров кусков, названия и обозначения классов крупности топлива:

Класс крупности	Условное обозначение	Размеры кусков, мм
Плитный	П	100—200 (300)
Крупный	К	50—100
Орех	О	25—50
Мелкий	М	13—25
Семечко	С	6—13
Штыб	Ш	0—6
Рядовой	Р	0—200 (300)

Класс Р — это топливо, не подвергавшееся рассеву (грохочению). Максимальный размер кусков классов П и Р составляет 200 мм для углей шахтной добычи и 300 мм — для углей из карьеров.

Допускается объединение соседних классов, т.е. установление классов крупности с расширенными границами размеров кусков. Например, класс МС будет состоять из кусков размерами 6—25 мм, а класс МСШ — 0—25 мм.

Тепловые электростанции обычно получают либо рядовое топливо (класс Р), либо топливо наиболее мелких классов крупности (Ш, СШ, МСШ).

Ситовый анализ твердого топлива — это способ определения гранулометрического состава рассевом его пробы на грохотах или лабораторных ситах. Ниже излагаются основные понятия, используемые в ситовом анализе, и порядок его проведения в соответствии с ГОСТ 2093-82.

Минимальная масса точечной пробы m , кг, из которых составляется объединенная проба, подвергаемая рассеву, зависит от максимального размера кусков топлива D . При $D \leq 120$ мм $m = 0,06 D$; при $D > 120$ мм $m = 7,2 (D/120)^3$.

Если проба имеет высокую влажность и по этой причине куски топлива слипаются или прилипают к ситу, его перед рассевом подсушивают при 40 °С (каменные угли и антрациты можно сушить при 105 °С).

Рассев производят на ситах из металлического листа с круглыми или квадратными отверстиями или из плетеной проволочной сетки. Характеристикой сита в любом случае служит размер отверстий. Стандартом предусмотрены определенные ряды сит, различающихся размерами отверстий: от 0,063 до 300 мм. Рассев начинают на

сите с наибольшим размером отверстий и считают его законченным, когда в течение 1 мин через сито проходит менее 1 % массы топлива, поданного на сито.

Сита при рассеве совершают горизонтальные возвратно-поступательные движения, которые создаются с помощью специальных механизмов (допускается также ручной рассев). Частицы малых размеров у некоторых видов топлива плохо проходят через сита, замазывая их. Поэтому при размерах частиц 3 мм и менее рассев с применением механического встряхивателя может проводиться как сухим, так и мокрым способом. При мокрому рассеву на сита подают предварительно смоченное топливо и при включенном встряхивателе непрерывно поливают сито водой. Рассев заканчивают, когда вода, прошедшая через сито, перестает выносить частицы топлива. Продукты рассева (классы крупности) высушивают до постоянной массы и взвешивают.

Рассев обычно проводят на нескольких ситах с последовательно уменьшающимися размерами отверстий. По результатам рассева рассчитывают *выход классов крупности*, %, по формуле

$$\gamma_i = m_i \cdot 100 \left(\sum_1^n m_i \right), \quad (5.27)$$

где m_i — масса данного (i -го) класса; $\sum_1^n m_i$ — сумма масс всех n

классов крупности, включая надрешетный продукт первого сита и подрешетный продукт последнего.

Если топливо перед рассевом подвергали подсушке, то требуется учитывать, что потеря массы от удаления влаги у разных классов крупности может быть неодинаковой. Поэтому перед расчетом выходов по формуле (5.27) требуется предварительно скорректировать массы m_i , умножив каждую из них на соответствующий пересчетный коэффициент K_i :

$$K_i = (100 - W_{ii}^r) / (100 - W_i^r), \quad (5.28)$$

где W_{ii}^r — массовая доля общей влаги у данного класса крупности подсушенного топлива; W_i^r — массовая доля общей влаги в топливе в рабочем состоянии.

Правильность ситового анализа контролируют в первую очередь сравнением суммарной массы всех классов крупности $\sum_1^n m_i$ с мас-

сой пробы, взятой для отсева. Расхождение не должно превышать 2 %. Погрешность определения выхода классов крупности изменяется от 0,5 % (при выходе менее 5 %) до 3,5 % (при выходе 30—50 %).

На ТЭС ситовый анализ чаще всего проводят для определения гранулометрического состава топлива после подготовки его к сжиганию, которая заключается в размоле с одновременной частичной сушкой. В этом случае ситовый анализ служит средством контроля тонкости помола топливной пыли, позволяющим поддерживать ее в оптимальных пределах, чтобы обеспечить достаточно полное сгорание частиц топлива в топке при минимальном расходе энергии на размол.

В целом методика ситового анализа топливной пыли соответствует изложенному выше стандарту, но имеет некоторые особенности. Пробу пыли массой 25 г рассеивают одновременно на нескольких ситах, расположенных друг над другом (рис. 5.7). Сита встряхивают с помощью специальной отсеивочной машины. Применяют плетеные сита стандартного ряда с размерами отверстий от 0,04 до 2,5 мм. Выходы классов крупности, выраженные в процентах общей массы всех классов, называют *остатками на ситах*. При этом в виде индекса указывают размер x отверстий (ячеек) данного сита в микрометрах. Различают *полные* и *фракционные* остатки. Полный, или суммарный, остаток R_x — это выход класса крупности с размерами частиц свыше x . При отсеивании по схеме на рис. 5.7 полному остатку соответствует надрешетный продукт первого (верхнего) сита. Для других классов крупности, которые прошли через одно или несколько сит, остаток на очередном сите называется *фракционным* и обозначается F_{x_1/x_2} , где x_1 и x_2 — размеры отверстий в ситах, которыми определяются границы размеров частиц данного класса крупности. Иначе говоря, $F_{90/200}$ — это доля массы топливной пыли, приходящаяся на частицы с размерами от x_1 до x_2 . Например, $F_{90/200} = 20\%$ означает, что 20 % массы пробы пыли составляют частицы размерами 90—200 мкм.

При известных фракционных остатках легко рассчитать полный остаток на любом заданном сите, суммируя полный остаток на верхнем сите с фракционными остатками на последующих ситах, вклю-

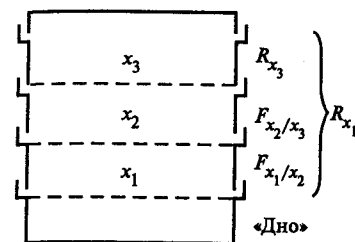


Рис. 5.7. Схема определения фракционных $F_{x_i/x_{i+1}}$ и полных R_{x_i} остатков на ситах с размерами отверстий $x_1 - x_3$

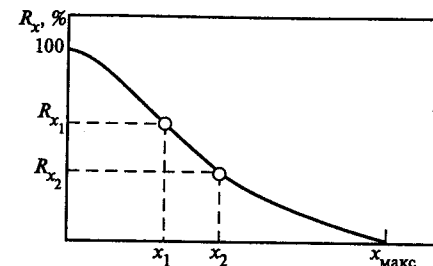


Рис. 5.8. Кривая полных остатков (зависимость выхода суммарного надрешетного продукта от размеров отверстий сита)

чая заданное. Так, для набора сит, показанного на рис. 5.7, полный остаток на сите с размером ячеек x_1 определяется суммой

$$R_{x_1} = R_{x_3} + F_{x_2/x_3} + F_{x_1/x_2}. \quad (5.29)$$

По полным остаткам на двух ситах (рис. 5.8) можно рассчитать фракционный остаток с интервалом размеров частиц, определяемым этими ситами:

$$F_{x_1/x_2} = R_{x_1} - R_{x_3}. \quad (5.30)$$

Частицы топлива менее 0,04—0,06 мм разделять на ситах не удается из-за отталкивающего действия электростатических сил, возникающих от наэлектризованности частиц, а также из-за замазывания ячеек топливом при его невысокой прочности. В условиях электростанций определять содержание классов крупности менее 0,06 мм целесообразно расчетными методами, приведенными в ГОСТ 2093-82, исходя из найденных ситовым анализом остатков R_{63} и R_{125} . Существуют также экспериментальные методы, основанные на измерении скорости падения частиц в жидкости (воде) или воздухе.

Ситовые характеристики. Результаты ситового анализа представляют в виде графиков, называемых ситовыми характеристиками. ГОСТ 2093-82 рекомендует построение графика зависимости суммарного выхода надрешетного продукта (полного остатка R_x) от размера отверстий сита x (см. рис. 5.8). *Кривая полных остатков* позволяет находить R_x при любом x (на графике показаны два значения, относящиеся к x_1 и x_2). С помощью такого графика удобно определять выходы любых классов крупности (т.е. фракционные остатки). Например, массовая доля частиц размерами от x_1 до x_2 будет

определяться как $F_{x_1/x_2} = R_{x_1} - R_{x_2}$. Наконец, по кривой полных остатков удобно определять максимальный размер частиц в пробе $x_{\text{макс}}$ (см. рис. 5.8).

В некоторых случаях помимо кривой полных остатков строят также *кривую фракционных остатков*, схематично показанную на рис. 5.9 вместе с соответствующей кривой полных остатков. Строить зависимость F_{x_1/x_2} от x не имеет смысла, так как на фракционный остаток существенно влияет произвольно задаваемый интервал размеров частиц $\Delta x = x_2 - x_1$. Поэтому, чтобы исключить влияние Δx , на график вместо $F_{x_1/x_2} + \Delta x$ наносят частное от деления фракционного остатка на Δx .

Кривая фракционных остатков удобна тем, что наглядно показывает наиболее характерный для данной пыли размер частиц x_m . Ему соответствует максимум на этой кривой. По форме графика судят о степени однородности пыли по размерам частиц: чем пыль однороднее, тем резче выражен максимум.

Обобщенные показатели гранулометрического состава топливной пыли. Ситовые характеристики дают полное представление о гранулометрическом составе топлива, но пользоваться ими не всегда удобно. Для практических целей вместо графиков предпочтительнее числовые показатели тонкости помола пыли, определяемые на основе полуэмпирического уравнения, описывающего кривую полных остатков:

$$R_x = 100 \exp(-bx^n). \quad (5.31)$$

В этом уравнении содержатся два параметра (b и n), которые рассчитывают по результатам ситового анализа. Параметр n , называемый *коэффициентом полидисперсности* топливной пыли, отражает степень неоднородности частиц по размерам: с повышением однородности он увеличивается. Значение n определяется в основном конструкцией мельницы и режимом размола, обычно оно составляет 0,6—1,3.

Параметр b характеризует общую степень измельченности топливной пыли и изменяется в диапазоне от 0,0025 для самого грубого помола до 0,1 для наиболее мелкого.

Чтобы рассчитать b и n , достаточно определить экспериментально остатки R_{x_1} и R_{x_2} на двух ситах с размерами отверстий x_1 и x_2 (чаще всего берут сита 90 и 200 мкм или 200 и 1000 мкм). Записав уравнение (5.31) дважды — для обоих сит, и дважды их прологариф-

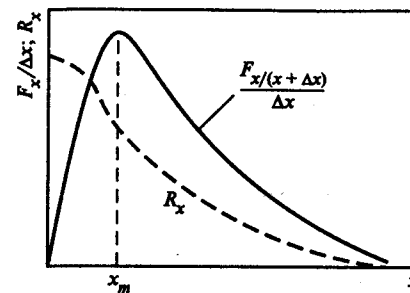


Рис. 5.9. Кривая фракционных остатков

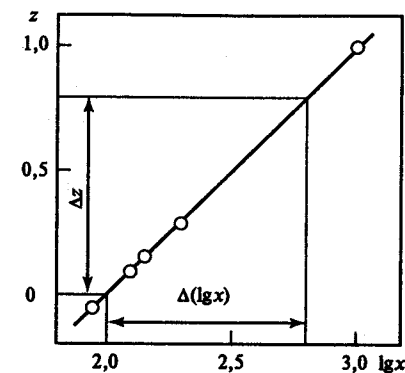


Рис. 5.10. Пример определения коэффициента полидисперсности топливной пыли графическим методом:

$$\Delta z = 0,78; \Delta(\lg x) = 0,80; n = 0,78/0,80 = 0,975$$

мировав, получим систему из двух уравнений с двумя неизвестными. Решение этой системы относительно n дает формулу

$$n = \frac{\lg[\ln(100/R_{x_1})] - \lg[\ln(100/R_{x_2})]}{\lg x_1 - \lg x_2}. \quad (5.32)$$

Если рассев проведен более чем на двух ситах, определять параметры n и b удобнее графическим методом. Такой метод основан на использовании уравнения (5.31) в логарифмической форме. Перенеся в (5.31) множитель 100 в левую часть равенства и дважды прологарифмировав, получим

$$\lg\left(-\ln \frac{R_x}{100}\right) = \lg b + n \lg x. \quad (5.33)$$

Если на графике по горизонтальной оси откладывать $\lg x$, а по вертикальной $z = \lg\left(-\ln \frac{R_x}{100}\right)$, уравнению (5.33) соответствует прямая линия. Таким образом, графический метод заключается в нанесении данных ситового анализа на график в указанных координатах (рис. 5.10) и проведении прямой по опытным точкам. Значение n находят как угловой коэффициент этой прямой:

$$n = \Delta z / \Delta(\lg x). \quad (5.34)$$

Вместо параметра b на электростанциях чаще используют более наглядный критерий степени измельченности топливной пыли —

полный остаток на каком-либо сите, обычно R_{90} или R_{200} . Такой подход не меняет существа дела, поскольку величины R_x , b и n связаны между собой уравнением (5.31), по которому можно рассчитать любую из них, если заданы остальные две.

5.4. Механическая прочность

Прочность является важной технологической характеристикой топлива, потому что от нее зависят самопроизвольное его измельчение при транспортировании; количество энергии, расходуемой на дробление и размол, а также интенсивность износа оборудования, соприкасающегося с топливом (рабочих органов дробилок, мельниц, топливопроводов и т.п.).

Прочность топлива определяется в первую очередь молекулярным строением его органической части, т.е. происхождением и степенью углекислотности. На нее влияют также петрографический состав, а в некоторых случаях и присутствующие в топливе минеральные примеси.

Определение прочности топлива. Существует несколько методов определения прочности топлива при отдельных видах механических воздействий: сжатии, ударе, истирании. Однако в процессах транспортирования, дробления, размола топливо одновременно подвергается воздействиям разного рода. Применительно к таким комплексным воздействиям прочность топлива испытывают комплексными методами, из которых чаще всего применяется метод барабанной пробы (по ГОСТ 15490-70*).

Сущность этого метода заключается в определении количества мелочи, которая образовалась из пробы топлива в результате механических воздействий, возникающих во время вращения этой пробы в стальном барабане при строго определенных условиях. Стандарт предусматривает два варианта таких условий. В одном из них используется барабан диаметром 1 м и длиной 0,59 м с тремя ребрами высотой 0,25 м, приваренными внутри барабана параллельно оси. В барабан загружают 25 кг топлива, предварительно рассеянного на грохоте с размерами отверстий 10, 20, 25 или 50 мм (мелочь отбрасывается). Барабан приводят во вращение с частотой 25 мин^{-1} , после 100 оборотов останавливают; топливо из него выгружают и просеивают через тот же грохот, что и при подготовке пробы. Показателем механической прочности топлива служит количество надрешетного продукта при втором отсеиве, выраженное в процентах исходной массы пробы:

$$\Pi = (m_1/m) \cdot 100,$$

где m_1 — масса надрешетного продукта, кг; m — масса помещенной в барабан пробы, кг.

Во втором варианте используют барабан меньшего размера (длина и диаметр по 180 мм, высота ребер 30 мм), другой режим вращения (частота 50 мин^{-1} , время вращения 20 мин) и значительно меньшую массу пробы (1 кг). Пробу рассеивают на сите с размером отверстий 25 мм; в остальном все остается, как в первом варианте.

Максимально допускаемое расхождение результатов параллельных определений показателя Π составляет 10 %.

Размолоспособность. Из различных показателей прочности топлива для ТЭС наибольший интерес представляет его размолоспособность — критерий, характеризующий энергозатраты при размоле данного топлива. Разумеется, такие энергозатраты зависят не только от прочности топлива, но и от достигаемой степени измельчения топливной пыли. Поэтому расход энергии на размол относят не к количеству полученной пыли, а к такой ее характеристике, которая однозначно связана с работой измельчения. Данной характеристикой является площадь S новой поверхности частиц, образующейся в процессе размола.

В России применяют так называемый *лабораторный относительный коэффициент размолоспособности* Gr_{VTI} , предложенный ВТИ (ГОСТ 5489-84*).

Коэффициент размолоспособности показывает, во сколько раз удельный расход энергии на образование единицы площади новой поверхности при размоле данного топлива \mathcal{E}/S меньше, чем для топлива, принятого за эталонное $\mathcal{E}_{эт}/S_{эт}$, т.е.

$$Gr_{VTI} = \frac{\mathcal{E}_{эт}/S_{эт}}{\mathcal{E}/S}. \quad (5.35)$$

Принятые стандартом условия размола топлива при его испытании обеспечивают практически одинаковый суммарный расход энергии независимо от вида топлива, поэтому в выражении (5.35) приравнивают $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{эт}$. Следовательно, коэффициент размолоспособности определяется отношением площадей

$$Gr_{VTI} = S/S_{эт}. \quad (5.36)$$

Для нахождения этих площадей используют их взаимосвязь с гранулометрическим составом размолотого топлива, выражаемую формулой

$$S = a[\lg(100/R_{90})]^{0,83}, \quad (5.37)$$

где a — константа; R_{90} — полный остаток на сите № 90.

В качестве эталонного принято топливо (близкое по свойствам к антрацитовому штыбу), которое при размоле в стандартных условиях дает $R_{90}^{эт} = 70\%$. Следовательно, $S_{эт} = a [\lg(100/70)]^{0,83} = a/2,32$.

Подставив это значение в исходное выражение (5.36) и сократив константу a , получим формулу, по которой определяют коэффициент размолоспособности:

$$Gr_{VTI} = 2,32 \left(\ln \frac{100}{R_{90}} \right)^{0,83} \quad (5.38)$$

Испытание топлива проводят в стандартной фарфоровой лабораторной шаровой барабанной мельнице. Топливо предварительно дробят, потом рассеивают, получая класс крупности 1,25—3,2 мм, и доводят его до воздушно-сухого состояния. В барабан помещают навеску 500 г такой пробы вместе с известным количеством шаров определенного размера. Далее барабан приводят во вращение с частотой $1,5 \text{ с}^{-1}$. После 540 оборотов его останавливают, содержимое выгружают, отделяют шары, а топливо подвергают ситовому анализу на ситах с размерами ячеек 200, 140, 125 и 90 мкм. Определив при этом остатки на ситах R_{200} , $F_{140/200}$, $F_{125/140}$ и $F_{90/125}$ и используя формулу (5.29), находят значение R_{90} , подставляемое далее в формулу (5.38):

$$R_{90} = R_{200} + F_{140/200} + F_{125/140} + F_{90/125}$$

Стандарт предусматривает тройную проверку правильности определения коэффициента размолоспособности. Во-первых, суммарные потери при рассеивании не должны превышать 2 % массы взятой навески. Во-вторых, обязателен контроль правильности ситового анализа. Этот контроль осуществляют расчетом значений R_{140} , R_{125} и R_{90} и нанесением их вместе с R_{200} на график зависимости $\lg R_x$ от $\lg x$. Правильно проведенному ситовому анализу в таких координатах соответствует прямая линия; значительное отклонение какой-либо точки от прямой свидетельствует о дефекте сита или некачественно проведенном рассеивании. В-третьих, как обычно, проводят не менее двух параллельных определений значения Gr_{VTI} для одной и той же пробы топлива. Расхождение между двумя результатами не должно превышать 4 %.

Абразивность топлива. Под абразивностью понимают способность топлива производить постепенное поверхностное разрушение (истирание) конструкционных материалов, с которыми соприкасается движущийся топливный слой. Такое свойство топлива приводит

к износу рабочих поверхностей дробилок и мельниц, повреждению топливопроводов и т.п.

В наибольшей степени от абразивности топлива страдают мельницы. В соответствии с этим для сравнительной количественной оценки абразивных свойств различных топлив чаще всего применяются методы, основанные на определении износа мелющих тел при пробном размоле испытуемых топлив в строго определенных условиях.

В России обычно используют метод, разработанный Центральным котлотурбинным институтом (ЦКТИ), который заключается в следующем. Топливо размалывают с помощью упрощенной лабораторной модели быстроходной мельницы. При определенном начальном состоянии топлива и фиксированном режиме работы мельницы определяют износ (потерю массы ΔG) мелющих элементов за некоторый промежуток времени. Отношение этой величины к работе A , затраченной на привод мельницы в тот же период, принимают за коэффициент износа, $г/(кВт \cdot ч)$:

$$K_3 = \Delta G/A \quad (5.39)$$

Значения относительного коэффициента абразивности для различных топлив изменяются в пределах от 0,17 (канско-ачинский бурый уголь) до 3 $г/(кВт \cdot ч)$ (донецкий АШ). Средними по абразивности считают топлива, для которых $K_3 = 0,8—1,5 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$.

Абразивные свойства топлива зависят от твердости и прочности его органических и минеральных компонентов, а также от размеров и формы топливных частиц. Абразивность топлив повышается, в частности, при увеличении содержания в нем пирита, минеральных примесей типа песка, при угловатой, с острыми гранями, форме частиц.

5.5. Выход летучих веществ и спекаемость

Термическое разложение топлива. Все органические вещества в той или иной мере являются термически нестойкими, т.е. при нагревании выше определенной температуры разлагаются. Совокупность реакций, вызываемых нагреванием веществ без участия каких-либо реагентов, в частности окислителей, носит название *термического разложения* (а также *деструкции*, *пиролиза*, *сухой перегонки*). В результате термического разложения некоторая часть исходного органического вещества превращается в газо- и парообразные продукты, остальная часть образует твердый остаток.

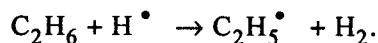
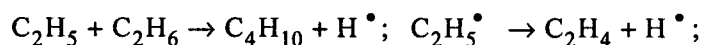
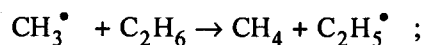
Процесс термического разложения органического вещества твердого топлива имеет важнейшее научное и практическое значение. С его помощью получают необходимую информацию о строении и составе топлива, он лежит в основе промышленного способа получе-

ния металлургического кокса, многих видов химического сырья, искусственного жидкого топлива и др.; наконец, термическое разложение является неотъемлемой составной частью процесса горения твердого топлива.

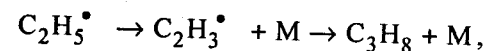
Газы и пары, выделяющиеся при термическом разложении топлива, называют *летучими веществами*. Компонентный состав летучих веществ сложен, что обусловлено *радикально-цепным механизмом* реакций пиролиза. Сущность такого механизма заключается в следующем.

Повышение температуры увеличивает энергию колебательного движения частей молекул, а это при некоторой температуре приводит к разрыву наиболее слабых химических связей в молекулах. В результате образуются «осколки» — атомы или группы атомов со свободной (незанятой) валентностью, получившие название *свободных радикалов*, обладающих высокой реакционной способностью. За короткое время они вступают в различные взаимодействия, причем среди образующихся продуктов, как правило, вновь получают свободные радикалы. Избыточная энергия исходного радикала переходит к новому. Последний, подобно предыдущему, быстро вступает во взаимодействие с какой-либо молекулой или с радикалом, и все повторяется многократно. Выстраивается целая цепь взаимодействий, которые могут приводить к параллельному образованию различных веществ, потому что радикалы сталкиваются не только с исходными, но и с только что полученными молекулами.

Например, при пиролизе одного из простейших органических веществ — этана C_2H_6 — распад исходных молекул приводит к образованию двух радикалов CH_3^\bullet из каждой его молекулы (точкой обозначают свободную валентность). Установлено, что за этим следует по меньшей мере несколько вариантов элементарных взаимодействий:



Цепи взаимодействий обрываются в основном при так называемых тройных соударениях, например:



где M — произвольная частица, забирающая избыточную энергию свободных радикалов.

Приведенный пример показывает, что даже в простейшем случае термическое разложение приводит к образованию сразу множества веществ. При разложении таких сложных соединений, к которым относится органическая часть топлива, «букет» образующихся продуктов включает сотни индивидуальных веществ.

При охлаждении летучих веществ до комнатной температуры они разделяются на:

смолу — сложную смесь высокомолекулярных органических веществ;

*пирогенетическую*¹ *воду* — продукт химических реакций разложения органического вещества топлива, представляющий собой водный раствор многих органических веществ, в том числе высокотоксичных;

газ термического разложения, состоящий из низкомолекулярных, не конденсирующихся при комнатной температуре компонентов.

Количество (выход) образующихся летучих веществ зависит в первую очередь от строения органической части топлива и температуры его нагревания. При разложении торфа и углей гумолитового типа летучие вещества формируются практически только из термически нестойкой периферийной части макромолекул топлива. С увеличением степени углефикации доля этой части уменьшается и соответственно уменьшается выход летучих веществ.

Изменение выхода летучих веществ в зависимости от температуры нагревания топлива показано на рис. 5.11 в форме диаграммы, на которой ширина полос пропорциональна выходу соответствующих продуктов, выраженному в процентах органической массы топлива.

Процесс разложения до 300 °С называют *бертини́рованием*, получаемый при этом твердый остаток — *бертинатом*. При бертини́ровании выделяется небольшое количество малоценного газа (в основном CO_2 , CO , немного H_2 и углеводородов) и пирогенетической воды.

¹ Название происходит от греческих слов «пирос» — огонь и «генезис» — происхождение.

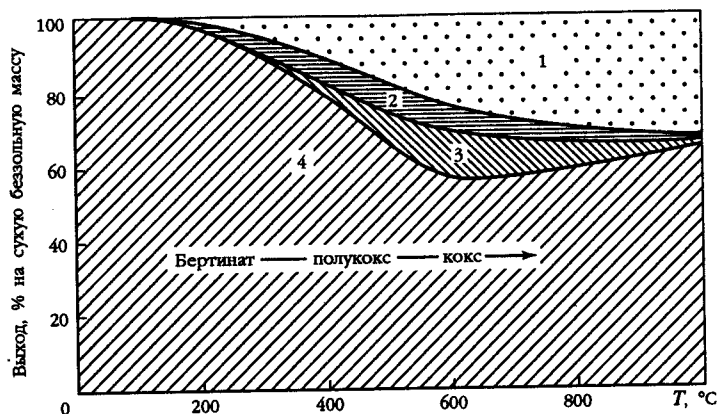


Рис. 5.11. Изменение выхода продуктов термического разложения в зависимости от температуры нагрева топлива:

1 — газ; 2 — пирогенетическая вода; 3 — смола; 4 — твердый остаток

Термическое разложение при 450—550 °C называют *полукоксованием*, твердый остаток — *полукоксом*. В этом процессе выделяются значительное количество горючего газа, богатого углеводородами и потому имеющего значительную ценность, смолпродукты, а также увеличивается количество пирогенетической воды.

Разложение при 700—1100 °C называют *коксованием*, твердый остаток — *коксом*. В этом температурном диапазоне выход смолы сокращается вследствие вторичных реакций ее термической деструкции с образованием дополнительного количества газа. С ростом температуры в газе нарастает содержание водорода.

Определение выхода летучих веществ. Удельный выход летучих веществ при температуре коксования, определяемый по стандартизированной методике (ГОСТ 6382-91), обозначают V (от английского названия летучих веществ — *the volatile matter*) и выражают в процентах одной из расчетных масс топлива, например V^a — аналитической массы.

Показатель выхода летучих веществ из органической или сухой беззольной массы V^{daf} , как упомянуто выше, связан со степенью углелификации топлива и потому является одним из важнейших классификационных параметров гумолитов. По выходу летучих веществ также оценивают реакционную способность топлива, проявляющуюся при его воспламенении и горении (см. § 6.4).

Стандартный метод определения удельного выхода летучих веществ заключается в прокаливании навески аналитической пробы топлива массой m (около 1 г) при 840—860 °C в течение 7 мин.

Навеску помещают в стандартный фарфоровый тигель, накрывают его свободно лежащей крышкой. Выход летучих веществ рассчитывают по убыли массы навески Δm с учетом того, что часть этой убыли вызвана испарением влаги, содержащейся в аналитической пробе:

$$V^a = \frac{\Delta m}{m} 100 - W^a. \quad (5.40)$$

Пересчет выхода летучих веществ с аналитической массы на другую массу топлива производится точно так же, как пересчет показателей состава (см. § 1.3). Например, выход летучих веществ в процентах рабочей массы топлива можно рассчитать по формуле

$$V^r = V^a \frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}. \quad (5.41)$$

Рассматривая методику определения показателя V^a , нельзя забывать, что при установленной температуре прокаливания навеска любого топлива способна интенсивно взаимодействовать с кислородом воздуха (т.е. гореть). Следовательно, правильный результат можно получить только в том случае, если на протяжении опыта отсутствует доступ воздуха к навеске. Однако тигель нельзя закрывать герметично, так как из-за выделения летучих веществ в нем будет развиваться значительное давление. Задача защиты навески от окисления решается проще: летучие вещества вытесняют из тигля воздух. Но когда термическое разложение заканчивается и летучие вещества перестают выходить из-под крышки тигля, появляется возможность проникновения в тигель воздуха. По этой причине и ограничивают продолжительность прокаливания навески топлива.

В тех случаях, когда топливо содержит в своей минеральной части значительное количество карбонатов (см. § 4.2), заметный вклад в потерю массы навески Δm вносит помимо процессов испарения влаги и разложения органической части топлива также разложение карбонатов, которое сопровождается выделением диоксида углерода. При содержании диоксида углерода карбонатов в аналитической пробе топлива более 2 % ГОСТ предписывает рассчитывать выход летучих веществ с учетом соответствующей поправки. Расчетная формула в этом случае имеет вид

$$V^a = \frac{\Delta m}{m} 100 - W^a - \left\{ [\text{CO}_2]_k^a - \frac{m - \Delta m}{m} [\text{CO}_2]_{NV} \right\}, \quad (5.42)$$

где $[\text{CO}_2]_k^a$ — массовая доля диоксида углерода карбонатов в аналитической пробе исходного топлива, %; $[\text{CO}_2]_{NV}$ — то же в оставшемся после опыта нелетучем остатке топлива, %; $(m - \Delta m)$ — масса нелетучего остатка, г.

Установлены допустимые расхождения результатов двух параллельных определений выхода летучих веществ в зависимости от размера этого показателя: $\Delta V = 0,3—1,5$ %, если анализ выполняется в одной лаборатории, и $\Delta V = 0,5—1,5$ %, если в разных лабораториях.

Спекаемость угля. В опыте по определению выхода летучих веществ кроме показателя V^a проявляется еще одна технологическая характеристика угля — *спекаемость*. Она характеризует способность угля образовывать при нагревании нелетучий остаток в виде кусков кокса, обладающих определенной прочностью.

В такой кокс могут превращаться только каменные угли средней степени углефикации, которые в интервале 350—450 °С образуют пластичную массу, в дальнейшем затвердевающую. В результате навеска измельченного угля превращается в одно целое («королек»).

Оценка спекаемости угля при определении выхода летучих веществ согласно ГОСТ 6382-91 производится по внешнему виду королька с отнесением его к одной из следующих категорий: *порошкообразный*; *слипшийся* — при легком нажиме пальцем рассыпается в порошок; *слабоспекающийся* — при нажиме рассыпается на кусочки; *спекающийся, расплавленный* — для раскалывания на отдельные кусочки необходимо приложить усилие; *сплавленный, невспученный* — плоская лепешка с серебристым металлическим блеском поверхности; *сплавленный, вспученный* — королек с серебристым блеском поверхности высотой более 15 мм.

Описанный метод оценки спекаемости углей является простейшим, сугубо ориентировочным. Существуют другие методы, позволяющие оценить данное свойство количественно. Их используют главным образом для контроля сырья при производстве металлургического кокса; два из этих методов играют важную роль в промышленной классификации углей. Энергетики не получают спекающихся углей, так как они остро дефицитны и полностью расходуются в металлургии. Однако, чтобы разбираться в классификации топлива, необходимо иметь представление о методах определения следующих характеристик спекаемости, используемых как классификационные признаки:

индекса Рога RI, характеризующего прочность кокса, получаемого из смеси испытуемого угля с неспекающейся добавкой (антрацитом). Определяют RI коксованием проб массой 6 г в тиглях, поме-

щаемых в муфельную печь, и испытанием прочности кокса методом барабанной пробы;

толщины пластического слоя у, характеризующей количество пластической массы, образующейся при термическом разложении данного угля. Для определения этого показателя используют специальный прибор — пластометр Л.М. Сапожникова, в котором слой топлива подвергают нагреванию снизу. В ходе постепенного прогрева слоя пластическая масса сначала появляется в нижней его части, причем ее верхняя граница непрерывно поднимается; через некоторое время появляется нижняя граница между пластической массой и затвердевшим коксом. Расстояние u , мм, между этими границами по вертикали принимают за характеристику спекаемости угля.

5.6. Способность к низкотемпературному окислению

Окисление органической части твердого топлива воздухом возможно не только при высоких температурах (в форме горения), но и при температурах, близких к комнатной. Последний вариант называется *самоокислением*, или низкотемпературным окислением. С этим процессом приходится сталкиваться при хранении топлива на складе, при эксплуатации систем пылеприготовления. Он может протекать также в угольном пласте, из-за чего уголь на ТЭС поступает в частично окисленном состоянии. Во всех случаях самоокисление причиняет значительный вред.

Механизм низкотемпературного окисления. Процесс низкотемпературного окисления твердого топлива состоит по меньшей мере из двух последовательных этапов.

На первом этапе происходит абсорбция кислорода топливом практически без выделения каких-либо газо- и парообразных продуктов окисления. Отмечается увеличение массы образца топлива, обусловленной присоединенным кислородом, который с течением времени образует на поверхности кусков (частиц) топлива химические соединения с периферийными радикалами макромолекул угля (см. § 4.1). Этот период называют *индукционным*, так как процесс в нем протекает без явных внешних признаков, в частности без заметного тепловыделения.

На втором этапе разрушаются поверхностные кислородные соединения. При этом выделяется значительное количество теплоты и образуются низкомолекулярные оксиды CO_2 , CO , H_2O (пар), а также небольшое количество водорода и неокисленных углеводородов, в основном метана. Наибольшую интенсивность указанные процессы имеют в начале второго этапа. По мере постепенного разрушения

периферийных радикалов в макромолекулах угля темп выделения парогазообразных продуктов и теплоты затухает.

На втором этапе наблюдается уменьшение массы твердого топлива вследствие превращения некоторой части его органического вещества в газообразные соединения, одновременно изменяется элементный состав твердого остатка. В нем растет содержание кислорода и уменьшается содержание водорода и углерода. Кроме того, увеличивается массовая доля гигроскопической влаги. Все это приводит к снижению удельной теплоты сгорания топлива. Например, в результате окисления донецких углей при хранении на топливном складе ТЭС в течение 0,5 года удельная теплота сгорания снижается на 1,6—4,9 %. Наибольшая потеря теплоценности происходит у топлива с низкой степенью углефикации; с ростом степени углефикации реакционная способность топлива уменьшается. Окисление спекающихся углей приводит к уменьшению спекаемости вплоть до полной ее потери.

По данным некоторых исследователей, в процессе низкотемпературного окисления помимо органической части топлива может принимать активное участие и такой минеральный компонент, как пирит FeS_2 .

В некоторых случаях электростанции получают уголь, подвергшийся окислению уже в угольном пласте, что отрицательно сказывается на его качестве. Согласно ГОСТ 8930-79* для определения степени окисленности угля могут применяться два метода: химический и петрографический. Химический метод основан на определении содержания в окисленном угле гидроксильных ($-\text{OH}$) и карбоксильных ($-\text{COOH}$) групп титрованием водной вытяжки угля раствором щелочи. В дополнение к этому определяют удельную теплоту сгорания и массовую долю гигроскопической влаги; полученные данные сравнивают с аналогичными показателями неокисленного угля. Петрографический метод заключается в подсчете под микроскопом доли площади угольного шлифа, приходящейся на окисленные («выветрелые») участки.

С увеличением степени окисленности углей понижается их теплота сгорания, растут влажность и зольность. Возрастает также и показатель V^{daf} , характеризующий выход летучих веществ из горючей части топлива, однако теплоценность летучих веществ уменьшается, так как в них увеличивается доля негорючих компонентов (CO_2 и H_2O).

Тепловой баланс низкотемпературного окисления топлива. Теплота, выделяющаяся в результате химических реакций окисления топлива, может вызывать повышение температуры последнего,

а это влечет за собой увеличение скорости реакций окисления, т.е. еще более интенсивное тепловыделение. Характер изменения температуры в данном процессе определяется соотношением интенсивностей тепловыделения в некотором объеме топлива $Q_{\text{выд}}$ и теплоотвода от него $Q_{\text{отв}}$.

Интенсивность тепловыделения при протекании химической реакции зависит от удельного теплового эффекта этой реакции и ее скорости, которая изменяется с температурой по закону Аррениуса:

$$w = k_0 \exp[-E/(RT)], \quad (5.43)$$

где k_0 — константа; E — энергия активации химической реакции, показывающая, какой избыток энергии должны иметь молекулы реагирующих веществ, чтобы вступить в данную реакцию, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); T — абсолютная температура, К.

Примем в первом приближении удельное тепловыделение в химических реакциях окисления топлива постоянным. Тогда интенсивность тепловыделения $Q_{\text{выд}}$ будет прямо пропорциональна скорости реакции w и зависимость ее от температуры может быть выражена на основе закона Аррениуса:

$$Q_{\text{выд}} = B \exp[-E/(RT)], \quad (5.44)$$

где B — коэффициент пропорциональности.

Интенсивность отвода теплоты от рассматриваемого объема топлива, ограниченного поверхностью S , зависит от температуры по закону теплоотдачи (закону Ньютона)

$$Q_{\text{отв}} = S\alpha(T - T_0), \quad (5.45)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); T_0 — температура среды, окружающей данный объем, К.

Характерный вид температурных зависимостей, построенных по (5.44) и (5.45), показан на рис. 5.12. В общем случае кривые тепловыделения и теплоотвода имеют в области умеренных температур (до 1000 °С) две точки пересечения: M и N . Только в этих точках соблюдается равенство тепловыделения и теплоотвода, т.е. температура топлива самопроизвольно не изменяется. В промежутке между точками M и N теплоотвод превышает тепловыделение ($Q_{\text{отв}} > Q_{\text{выд}}$), следовательно, температура топлива будет снижаться, пока в точке M не установится стационарное состояние. Левее точки M тепловыделение больше теплоотвода ($Q_{\text{выд}} > Q_{\text{отв}}$); избыточная теплота расходуется на нагревание топлива, температура которого

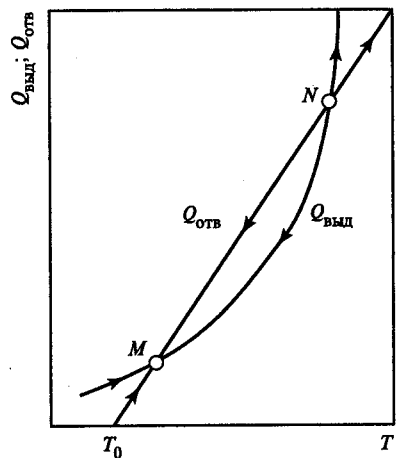


Рис. 5.12. Тепловой баланс процесса окисления топлива при различных температурах

будет самопроизвольно повышаться до точки M , но не выше. Таким образом, точка M соответствует низкотемпературному режиму окисления топлива.

Второй областью, в которой $Q_{\text{выд}} > Q_{\text{отв}}$, является участок правее точки N . Саморазогрев реакционной системы в этой области практически ограничен лишь количеством выделяющейся теплоты, что соответствует режиму обычного высокотемпературного горения.

Самовозгорание топлива при хранении. На рис. 5.12 показан только один из возможных вариантов взаимного расположения кривых тепловыделения и теплоотвода. Положение кривых зависит от кинетических характеристик химической реакции [параметров k_0 и E в (5.43)] или условий теплоотвода [температуры T_0 и коэффициента теплоотдачи α в (5.45)].

На рис. 5.13 показаны три варианта зависимости $Q_{\text{выд}}$ от температуры, различающиеся кинетическими характеристиками. Зависимость, обозначенная $Q_{\text{выд1}}$, соответствует рассмотренному выше случаю, при котором возможен стабильный режим низкотемпературного окисления. Для зависимости, обозначенной $Q_{\text{выд3}}$, картина иная: во всем температурном диапазоне тепловыделение превышает теплоотвод, т.е. налицо условие непрерывного саморазогрева топлива, ведущего к самопроизвольному переходу низкотемпературного окисления в обычное горение. Такой переход называется *самовозгоранием* топлива.

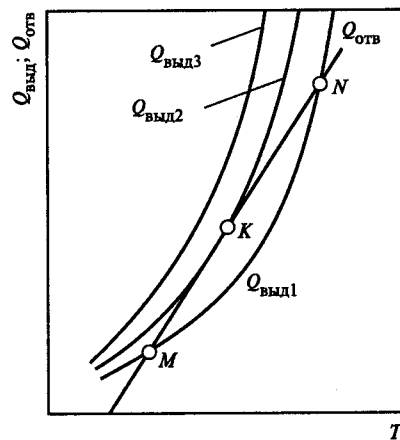


Рис. 5.13. Определение критических условий самовозгорания топлива

Зависимость, обозначенная $Q_{\text{выд2}}$, отражает критические условия самовозгорания — в этом случае имеется только одна точка K , в которой $Q_{\text{выд}} = Q_{\text{отв}}$, при всех других температурах $Q_{\text{выд}} > Q_{\text{отв}}$.

Проведенный анализ показывает, что возможность самовозгорания топлива на складе зависит, с одной стороны, от условий хранения топлива, а с другой — от его свойств и факторов, способных влиять на скорость химической реакции окисления, в частности от присутствия катализаторов, концентрации кислорода вблизи поверхности кусков (частиц) топлива и т.п.

Мероприятия по борьбе с самовозгоранием топлива на складе. Загорание на топливном складе ТЭС способно причинить большой ущерб из-за потерь топлива и возможного повреждения стационарных сооружений, поэтому на электростанциях проводят комплекс мероприятий, направленных на предотвращение такого ущерба. Борьба с самоокислением топлива преследует также цель свести к минимуму ухудшение его качества в процессе хранения.

В установленных правилах хранения учитывается, что склонность к самовозгоранию у разных видов твердого топлива может сильно различаться. В первую очередь она зависит от степени углекислотности: наиболее опасными являются торф и бурые угли, далее идут каменные угли таких марок, как Д и Г. Определенно влияют на интенсивность самоокисления минеральные примеси, среди которых могут быть катализаторы, и влага топлива, также каталитически действующая на реакции окисления. Имеет значение и гранулометрический состав топлива, от которого зависят воздухопроницаемость слоя и площадь поверхности кусков (частиц) топлива, взаимодействующей с кислородом.

При складировании твердого топлива приходится учитывать способность его к *сегрегации* — самопроизвольному разделению кусков различного размера в процессе перемещения. Сегрегация приводит к тому, что внутренние части слоя топлива бывают обогащены мелкими частицами, а в наружных частях преобладают крупные куски (рис. 5.14). Последнее облегчает доступ воздуха в глубь слоя, т.е. способствует самоокислению топлива.

По устойчивости к окислению все виды твердого топлива делят на четыре категории:

I — наиболее устойчивые, не самовозгорающиеся при хранении;

II — относительно устойчивые, самовозгорающиеся в редких случаях;

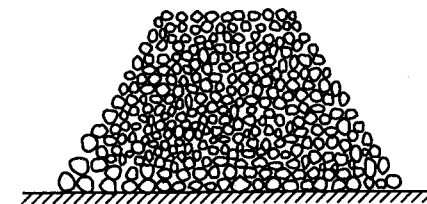


Рис. 5.14. Схема сегрегации топлива в штабеле

III — обладающие средней устойчивостью;

IV — неустойчивые, с повышенной склонностью к самовозгоранию.

Основные меры по защите топлива от самоокисления и самовозгорания при хранении сводятся к следующему.

Прежде всего ограничивают сроки хранения топлива на складе, чтобы не дать процессу низкотемпературного окисления перейти из первой во вторую стадию. Топливо IV категории разрешается хранить не более 6 мес (в отдельных случаях — до 8 мес), топливо I категории — до 2 или 3 лет.

На топливных складах ТЭС топливо хранят в виде специально спрофилированных куч — *штабелей*. При укладке штабеля принимают меры к его максимальному уплотнению, чтобы затруднить доступ кислорода внутрь слоя и таким путем ограничить интенсивность окисления. Достигается это послойной засыпкой топлива в штабель с укаткой каждого слоя катками или гусеницами бульдозера. Укатывают также и откосы штабеля.

При выборе места для топливного склада принимают меры к хорошему удалению атмосферных осадков, чтобы не происходило повышения влажности топлива.

Самовозгорание и взрывы топлива в системе пылеприготовления. В системах пылеприготовления, как уже отмечалось выше, размол твердого топлива осуществляют вместе с его подсушкой горячим воздухом. Повышенная температура топливной пыли (80—120 °С) способствует ее ускоренному окислению, однако при нормальном времени пребывания пыли в системе (несколько минут) этот процесс не заходит далеко. Вместе с тем в местах, где образуются скопления (отложения) пыли, ее самоокисление может приводить к самовозгоранию. Количество пыли в таких местах невелико, и ущерб от ее самовозгорания был бы незначителен, если бы оно не вызывало более серьезных последствий — взрывов пылевоздушной смеси.

В системах пылеприготовления применяют пневмотранспорт пыли, т.е. перемещение ее по трубам во взвешенном состоянии потоком воздуха. Взрывоопасность смесей топлива и воздуха зависит от свойств топлива, количества его в единице объема смеси и концентрации в ней кислорода.

Взрыв означает очень быстрое сгорание топлива. Обычный же процесс горения твердых частиц даже при достаточно высокой температуре протекает относительно медленно. Во взрывной реакции участвуют главным образом не твердая фаза, а быстро выделяющиеся из топлива летучие вещества. Поэтому взрывоопасность топлива

однозначно связана с показателем выхода летучих веществ из рабочей массы топлива.

Все виды топлива по взрывоопасности делят на три категории: особо опасные ($V^{daf} \geq 35\%$), опасные ($G \leq V^{daf} < 35\%$); невзрывоопасные ($V^{daf} < 6\%$).

Нижний предел концентраций топливной пыли в воздухе, при которых возможны взрывы (если топливо относится к I или II категории), колеблется в интервале 0,05—0,2 кг/м³; наиболее опасной областью концентраций является область 0,3—0,6 кг/м³. Обычные же концентрации пыли в пылесистемах лежат в пределах 0,4—1,5 кг/м³, т.е. по этому показателю вполне возможны взрывоопасные условия.

Что касается влияния концентрации кислорода, то пылевоздушная смесь становится невзрывоопасной, когда содержание кислорода в газовой фазе ниже 16 % для торфа, 18 % для бурых углей и 19 % для каменных углей.

Понижение концентрации кислорода в пылевоздушной смеси — наиболее эффективное средство борьбы со взрывами в пылесистемах. Добиваются этого добавлением к пылевоздушной смеси дымовых газов, а иногда повышением температуры в системе, чтобы ускорить расходование кислорода на низкотемпературное окисление топлива.

В литературе встречаются и обратные рекомендации — не повышать, а понижать температуру в системе пылеприготовления, чтобы ликвидировать очаги самовозгорания скоплений пыли, т.е. исключить возможность воспламенения пылевоздушной смеси. Однако достичь желаемого результата данным способом иногда не удается.

При работе ТЭС на взрывоопасном топливе в системах пылеприготовления предусматривают специальные взрывные клапаны, которые в случае взрыва пылевоздушной смеси ограничивают скачок давления в системе и тем самым защищают ее от разрушения. Проводят также контроль температуры в местах отложений пыли в пылепроводах и бункерах, где могут возникать очаги самовозгорания.

5.7. Теплофизические свойства

Теплофизические свойства топлива существенно зависят как от характера и содержания в топливе основных его составных частей (органического вещества, минеральных примесей, влаги), так и от условий подвода или отвода теплоты.

Теплоемкость твердого топлива с достаточной точностью можно считать аддитивной суммой теплоемкостей его составных частей: органической массы, минеральных примесей и влаги.

Теплоемкость органической массы зависит главным образом от ее химического строения и температуры. При этом следует учитывать, что строение органического вещества топлива в процессе нагревания изменяется; происходящие при этом химические

реакции сопровождаются тепловыми эффектами, которые приводят к ускорению или замедлению роста температуры, т.е. влияют на теплоемкость. Поэтому необходимо различать результаты определения теплоемкости для разных условий нагревания топлива:

а) при однократном нагревании до той или иной температуры; в этом случае находят так называемую *эффективную теплоемкость*, значение которой зависит от тепловых эффектов, связанных с термической деструкцией топлива;

б) при повторном нагревании топлива до заданной температуры. Так как изменения химической структуры топлива, отвечающей этой температуре, совершились при первом нагревании, такой подход позволяет исключить тепловые эффекты химических реакций и измерить так называемую *истинную теплоемкость*.

Изменение истинной теплоемкости c с ростом температуры (рис. 5.15, кривая 2) характеризуется плавным подъемом, свойственным всем твердым инертным материалам; эффективная теплоемкость (см рис. 5.15, кривая 1) проходит через максимумы и минимум. Расположение кривой 1 над кривой 2 свидетельствует, что в соответствующем температурном интервале в топливе происходят эндотермические реакции (Q_1); противоположное расположение кривых отражает наличие экзотермических реакций (Q_2).

Суммарный тепловой эффект эндотермических реакций Q_1 и экзотермических Q_2 выражается площадью, лежащей между соответствующими участками кривых 1 и 2 (см. рис. 5.15). Абсолютные значения Q_1 и Q_2 для большинства видов топлива близки друг к другу, т.е. результирующий тепловой эффект реакций, происходящих

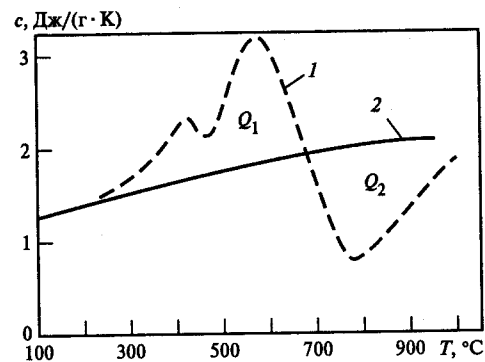


Рис. 5.15. Зависимость эффективной (1) и истинной (2) теплоемкости каменного угля марки Д от температуры

в интервале температур 100—1000 °С, обычно близок к нулю. Поэтому приблизительно расход теплоты на нагревание топлива до температуры 1000 °С и выше можно определять по истинной теплоемкости. Однако при расчетах в области более низких температур, особенно при 600—700 °С, необходимо учитывать тепловые эффекты реакций, т.е. пользоваться эффективной теплоемкостью.

Теплоемкость минеральных примесей твердого топлива, отнесенная к 1 г образующейся из них золы, варьирует в сравнительно узких пределах 0,75—0,85 Дж/(г·К), составляя в среднем 0,80 Дж/(г·К). Расчеты показывают, что при изменении зольности топлива в пределах 10—12 % изменение его теплоемкости не превышает 1—2 %. Поэтому учитывать зольность топлива при расчетах его теплоемкости необходимо лишь при $A^d > 10—15 \%$.

Теплоемкость воды, находящейся в топливе, по одним данным составляет около 1,5 Дж/(г·К), по другим — близка к теплоемкости чистой (свободной) воды, равной 4,19 Дж/(г·К). По-видимому, такие расхождения обусловлены тем, что исследовали топливо разного строения, причем в химически связанном и сорбированном состоянии находились неодинаковые части влаги. В практических расчетах, относящихся к топливу, влажность которого изменяется от W^a до W^r , обычно пренебрегают изменением теплоемкости воды, вызванной ее взаимодействием с топливом, т.е. принимают для топливной влаги $c = 4,19$ Дж/(г·К).

С учетом роли горючей B^r , минеральной A^r частей, влаги W^r рабочего топлива и выхода летучих V^d его теплоемкость (средняя в интервале 24—100 °С), Дж/(г·К), может быть найдена по формуле

$$c = 0,01[(1 + 0,008V^d)B^r + 0,80A^r + 4,19W^r]. \quad (5.46)$$

Теплопроводность. В дисперсных средах, к которым относится твердое топливо, перенос теплоты может осуществляться одновременно несколькими путями: вследствие теплопроводности твердой фазы, теплопроводности и конвекции в газовой фазе, лучистого теплообмена. Заметную роль в теплопередаче может также играть присутствующая в топливе влага.

Теплопроводность твердой фазы λ_T дает относительно небольшой вклад в распространение теплоты даже для отдельно взятого куска топлива, так как из-за трещиноватости и пористости топлива на пути теплового потока возникают значительные тепловые сопротивления в виде газовых прослоек. Для топливного слоя, в котором все частицы практически полностью отделены друг от друга газовыми прослойками, значение теплопроводности твердой фазы сводится почти к нулю.

Теплопроводность газовой фазы λ_r — определяющий фактор при распространении теплоты в слое топлива, так как в этом случае газовая фаза является непрерывной. Для процесса прогревания куска топлива относительное значение данного фактора несколько уменьшается.

Естественная конвекция в газовой фазе в принципе может увеличивать коэффициент теплоотдачи, однако при тех размерах газовых объемов (промежутков между частицами, пор), которые обычно имеются в прогреваемом топливе, роль конвекции пренебрежимо мала.

Теплообмен излучением может служить дополнительной составляющей теплопроводности газовых промежутков между частицами. Как показывают расчеты, лучистый теплообмен начинает давать заметный вклад в перенос теплоты при температуре топлива выше 700—800 °С.

Теплопроводность жидкой фазы — топливной влаги примерно в 20 раз выше теплопроводности воздуха; заполнение пор влагой и образование водяных мостиков между частицами топлива существенно уменьшают тепловые сопротивления на пути теплового потока. Однако для результирующей теплопроводности топлива гораздо большее значение имеет участие влаги в распространении теплоты по механизму термовлагопроводности.

Термовлагопроводность характеризует одновременный и взаимосвязанный перенос теплоты и влаги во влажных дисперсных средах, происходящий при создании в них температурного перепада. Движение влаги (массоперенос) может иметь характер как молекулярной диффузии, так и конвекции. Кроме того, по мере приближения температуры к 100 °С в нагреваемых зонах интенсифицируется испарение влаги, а следовательно, и поглощение теплоты. Образующийся пар переносит теплоту в холодные зоны топлива посредством вынужденной конвекции в этих зонах.

Итоговой характеристикой теплопроводности топлива служит его эффективная (или эквивалентная) теплопроводность λ_3 , определяемая на основе закона Фурье по результатам непосредственных измерений теплового потока q , возникающего на участке протяженностью l при создании на нем перепада температуры Δt :

$$\lambda_3 = \frac{ql}{\Delta t} \quad (5.47)$$

Таким образом, λ_3 можно представить в виде четырех основных слагаемых

$$\lambda_3 = \lambda_T + \lambda_r + \lambda_{л} + \lambda_{ВП} \quad (5.48)$$

В наибольшей степени λ_3 зависит от плотности, влажности и температуры топлива. Температура влияет на эффективную теплопроводность топлива двояким образом. Во-первых, с изменением температуры изменяются λ для всех составных частей топлива. Во-вторых, нагревание топлива вызывает изменение его состава и структуры: потерю влаги, перестройку органической массы и отчасти минеральных примесей (разложение кристаллогидратов и карбонатов). Общим итогом является возрастание эффективной теплопроводности приблизительно по линейной зависимости

$$\lambda_3 = \lambda_{t_0} [1 + \gamma(t - t_0)],$$

где γ — температурный коэффициент теплопроводности, K^{-1} , равный для слоя угля: в интервале 0—100 °С 0,002; в интервале 100—300 °С 0,0003; в интервале 300—1000 °С 0,001; t_0 — температура начала интервала. Как видно из приведенного выше, наиболее быстрый рост эффективной теплопроводности наблюдается в диапазоне 0—100° С, что обусловлено в основном термовлагопроводностью. После удаления влаги из топлива (при 100 °С) рост λ_3 резко замедляется. Выше 300 °С он вновь усиливается, уже в связи с изменением структуры топлива.

Контрольные вопросы

1. По какой причине для твердого топлива применяют не один, а три показателя плотности? Как определяют эти показатели? Как по показателям плотности рассчитывают пористость и порозность?
2. Какими показателями характеризуют сыпучесть твердого топлива? Какие факторы наиболее сильно влияют на сыпучесть?
3. Что характеризуют и как обозначаются классы крупности топлива?
4. Каким методом определяют содержание в топливе определенных классов крупности?
5. Как определяют и обозначают полный и фракционный остатки при ситовом анализе топливной пыли?
6. Какими способами можно охарактеризовать гранулометрический состав топливной пыли?
7. В чем заключается и на каких предпосылках основано определение коэффициента размолоспособности топлива по методу ВТИ?
8. В чем заключается и каким показателем характеризуется абразивность топлива?
9. Каков механизм протекания процесса термического разложения топлива, какие при этом образуются продукты?
10. В чем состоит методика определения выхода летучих веществ из твердого топлива? Для каких целей служит этот показатель?
11. Почему при хранении некоторых видов твердого топлива существует опасность их самовозгорания?
12. Какие причины приводят к взрывам пылевоздушной смеси в системах приготовления топливной пыли на ТЭС? Какие меры позволяют предотвратить взрывы угольной пыли?