

Л. Т. Кулюян

Экспериментальное исследование скорости горения молодых видов многозольного топлива различной плотности

1.

Эффективное сжигание топлива вообще и многозольного в особенности требует детального изучения сложного механизма горения. С точки зрения разработки и осуществления необходимых мероприятий для рационализации и интенсификации процессов сжигания топлива в печных и топочных устройствах, несомненно, имеет большое значение исследование скорости горения.

Для наиболее ценных видов твердого топлива углерод является основным компонентом горючей части и обуславливает процесс горения в целом.

Поэтому и в современной диффузионно-кинетической теории горения, созданной и развитой советскими учеными, основные закономерности установлены для процесса горения углерода.

Известно, что большинство местных видов топлива СССР относятся к менее теплоценным, характеризуются сравнительно небольшим содержанием углерода и высокой зольностью. Основная доля теплотворной способности горючей части этих топлив относится не к коксовому остатку, а к летучим. Так называемый „коксовый остаток“ зачастую наполовину состоит из негорючей минеральной части, что делает нецелесообразным его использование в качестве кокса. Горение таких видов топлива в целом и их коксового остатка в значительной мере зависит от процесса выхода и горения летучих. Таким образом, объектом исследования горения местного топлива с большим содержанием летучих и минеральных примесей должно являться само натуральное топливо, а не его коксовый остаток.

Известно, что горение топлива, богатого летучими, имеет явно выраженный стадийный характер [1, 2, 3,], особенно в условиях невысокого пирометрического уровня слоевого процесса. Поэтому и возможно достаточно удовлетворительно исследовать процесс горения коксового остатка как завершающую стадию реального процесса горения натурального топлива.

С практической точки зрения исследование процессов горения твердого натурального топлива должно осуществляться в реальных

условиях, т. е. в топочных устройствах или же в таких лабораторных установках, которые более или менее точно воспроизводят реальные топочные процессы — слоевые или камерные.

Непосредственным исследованием горения сложного комплекса частиц топлива в действительных условиях устанавливаются усредненные характеристики процесса, отражающие, кроме всего прочего, и специфические особенности самого слоя или пылеугольного факела.

В результате оказывается трудным установить влияние отдельных физических параметров топлива, например его плотности, на процесс горения. С этой точки зрения может оказаться целесообразным на первом этапе в качестве объекта исследования принять отдельную частицу топлива. Обычно элементарное горение осуществляется на частицах углерода размерами $0,5 \div 2$ см. Небольшие размеры обеспечивают равнодоступность поверхности частицы к диффузионным потокам, изотермичность поверхности горения, а также небольшое влияние внутреннего реагирования. Все это создает благоприятные условия для аналитического изучения процесса. Однако частицы молодых видов натурального топлива, обладающие пористой структурой, должны иметь более значительные размеры, во избежание достижения соизмеримости наиболее крупных пор с размерами самих частиц.

2.

Большинство допущений, которые принимаются для облегчения аналитического исследования горения углеродной частицы, оказывается не совсем приемлемым для изучения горения сравнительно крупной частицы молодых видов натурального топлива. В силу этого весьма трудно использовать те количественные закономерности (хотя бы для коксового остатка исследуемой частицы), которые были получены для углеродной частицы в работах А. С. Предводителя, Л. Н. Хитрина и других. Прямое использование этих зависимостей связано с трудностями определения некоторых важных физических констант, как, например, коэффициентов внешней и внутренней диффузии, величины внутренней поверхности пор и т. д. Наличие значительного количества минеральных примесей еще больше осложняет экспериментальное и теоретическое исследование процесса горения коксового остатка.

Несмотря на нестационарный характер горения многозольного коксового остатка, общую картину процесса можно представить пользуясь методом Блинова [4] системой уравнений (1, 2 и 3), основанных на использовании аналогии между диффузией и теплоотдачей и на некоторых допущениях, главные из которых — постоянство поверхностной концентрации кислорода (т. е. равнодоступность поверхности частицы к диффузионным потокам) и первый порядок химического реагирования по кислороду:

$$K_s^{O_2} = K C_F \quad (1)$$

$$K_s^{O_2} = h(C_o - C_F') \quad (2)$$

$$K_s^{O_2} = h'(C_F' - C_F) \quad (3)$$

где $K_s^{O_2} \left(\frac{2}{\text{см}^2/\text{сек}} \right)$ — удельная поверхностная скорость горения, определяемая по израсходованному кислороду, C_o , C_F и C_F' — весовая концентрация кислорода соответственно в воздушной среде, на поверхности коксового остатка и на поверхности частицы, т. е. на зольной оболочке (фиг. 1), h и h' — коэффициенты диффузионного массообмена (аналогии коэффициента теплоотдачи) для диффузии кислорода к поверхности зольной оболочки и через эту оболочку.

Из (1, 2 и 3) получаем:

$$K_s^{O_2} = \frac{C_o}{\frac{1}{K} + \frac{1}{h} + \frac{1}{h'}} \quad (4)$$

Величина $\frac{1}{K} = Z_x$ характеризует сопротивление химическому реагированию (K — константа скорости реакции, зависящая от температуры).

Величина $\frac{1}{h'} = Z_x$ характеризует сопротивление диффузии к внешней поверхности, а величина $\frac{1}{h} = Z_x$ — сопротивление диффузии через зольную оболочку.

Горение пористого коксового остатка происходит и внутри частицы (особенно при низкотемпературном режиме), т. е. кислород проникает и внутрь коксового остатка путем той же диффузии.

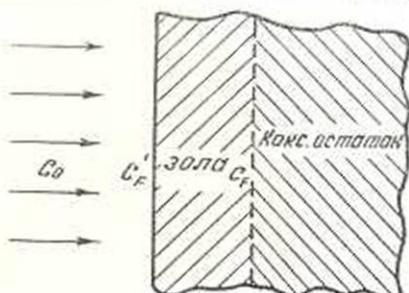
Если обозначить сопротивление диффузии через коксовый остаток Z_{ak} , то получим наиболее общее выражение, характеризующее горение зольного топлива.

$$K_s^{O_2} = \frac{C_o}{Z_x + Z_z + Z_{ak} + Z_{ak}} \quad (5)$$

или

$$K_s^{O_2} = \frac{C_o}{Z_x + Z_z + Z_{ak} + Z_{ak}} \quad (6)$$

где β — стехиометрический коэффициент, количественно характеризующий потребление кислорода углеродом, $K_s^C \left(\frac{2}{\text{см}^2/\text{сек}} \right)$ — удельная поверхностная скорость горения углерода.



Фиг. 1. Схема горения многозольного топлива.

Таким образом, скорость горения зольного топлива (вернее коксового остатка) зависит от значительного числа сопротивлений, причем последние три диффузионные сопротивления взаимно связаны и непрерывно изменяются со временем, т. е. по мере нарастания зольной оболочки. Количественное определение последних представляет большие трудности и требует очень обстоятельных экспериментальных исследований.

Определение удельной поверхностной скорости горения по выражениям 5 и 6 является весьма сложной задачей даже для крайних, наиболее характерных областей горения.

На начальном этапе познания сложного механизма горения зольного топлива должен быть использован такой метод обработки опытных данных, который не связан с непосредственным количественным определением диффузионных сопротивлений. С этой точки зрения может оказаться достаточно удовлетворительным метод, основанный на всесторонней обработке кривых выгорания.

3.

Экспериментальное исследование горения частицы натурального топлива было осуществлено методом непрерывного взвешивания. Метод газового анализа в данном случае оказался бы малоэффективным из-за чрезвычайной трудности быстрого отбора сравнительно небольшого количества продуктов горения.

В качестве реакционной печи была использована вертикальная электрическая печь с максимально допустимой температурой нагрева, 1000°C , и отверстием на днище для подвода воздуха.

Размещение горячего спая термопары внутри частицы натурального топлива, обладающего пористой структурой, технически оказалось неосуществимым.

Кроме этого, принятое большинством исследователей предварительное прессование всех исследуемых частиц для крепления их на термопару нарушает естественную физическую структуру топлива и исключает возможность изучить влияние последней (пористость топлива) на интенсивность процесса горения.

В наших опытах частицы топлива вводились в печь двумя способами — непосредственно подвешивались на жароупорной нити или на специальной решетке, свободно опирающиеся на внутренние стенки конической фарфоровой насадки. Первым способом сжигались частицы топлива, обладающего значительной плотностью — торфяные и бурогольные брикеты. На решетке сжигались частицы топлива низкой плотности (машинноформовочный торф и т. д.), прямое подвешивание которых на нити оказалось затруднительным.

Была поставлена серия опытов для определения подпирającego влияния воздушного потока на частицу топлива и особенно на решетку, для установления необходимой весовой поправки в зависимости от размеров частицы и скорости воздушного потока.

Критерием правильности всех последовательных взвешиваний служило равенство:

$$G_0 = \sum_0^n G_u + G_{\text{ост.}} \quad (7)$$

где G_0 — начальный вес частицы,

$\sum_0^n G_u$ — сумма всех отдельных оценок выгорания частицы,

$G_{\text{ост.}}$ — несгоревший остаток.

Расхождение допускалось в пределах (1,0 ÷ 1,5 %) от начального веса.

Полное озоление частицы фиксировалось при наличии равенства $G_{\text{ост.}} = A^2 G_0$, где A^2 — заранее известная лабораторная поправка.

В опытах с насадкой измерялась также температура вблизи частицы (т. е. над „слоем“). Специальными измерениями скорости потока в различных участках надрешеточного и подрешеточного пространства была установлена связь между показаниями газометра и действительным расходом воздуха.

Ввиду того, что объектами исследования являлись более реакционноспособные молодые виды топлива, опыты проводились при температуре среды $t_c = 350-800^\circ\text{C}$. Скорость подачи воздуха колебалась в пределах 15–50 см/сек. Определенная часть опытов осуществлялась в условиях естественной диффузии.

Учитывая, что частицы, начальная пористость которых $p_0 < 0,8$, после частичного или полного озоления полностью сохраняют свою геометрическую форму, значительное количество опытов было выполнено с целью выявления закономерности изменения основных размеров как частицы в целом, так и ее коксового остатка в функции от времени или от изменяющегося веса в процессе выгорания.

Для этого было приготовлено значительное количество испытываемых партий из предельно сходных по весу и размерам частиц топлива.

Все частицы данной партии сжигались по возможности в одинаковых заданных условиях, но в течение различных интервалов времени, достаточных для выгорания от 10 до 100% горючей части топлива. Вес и все размеры фиксировались после каждого интервала времени.

Сравнивая результаты опытов по каждой данной партии, можно было установить интересующие нас зависимости.

Сходимость опытов для каждой данной серии проверялась путем сравнения соответствующих кривых выгорания.

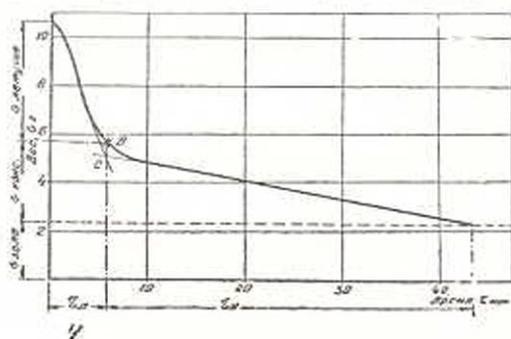
Частицы из натурального кускового топлива имели форму параллелепипеда объемом $V_0 = 12-30 \text{ см}^3$ и весом $G_0 = 8-14 \text{ г}$. Частицы из прессованного брикетного топлива имели цилиндрическую форму с диаметром $d_0 = 2,5$ и 5 см и весом $G_0 = 12 \div 35 \text{ г}$.

В описываемых опытах было использовано: 1) торф Гилийского и Кадининского месторождения Армянской ССР, характеризуемый: степенью разложения — в среднем 30—40% и зольностью $A^c = 17 \div 23\%$. 2. Бурый уголь Джаджурского месторождения Армянской ССР с зольностью $A^c = 35,6\%$.

4.

Горение всех, и особенно торфяных, частиц имело ярко выраженный стадийный характер, что давало возможность визуально фиксировать конец видимого выхода летучих.

На фиг. 2 представлена одна из кривых выгорания торфяной частицы. Касательные, проведенные к начальным и конечным участкам кривой выгорания в точках, близлежащих к промежуточному резко криволинейному участку (где тесно переплетаются обе стадии), пересекаются в точке С. Продолжение ординаты этой точки пересекает кривую в точке В и приблизительно определяет границы стадии выхода летучих и горения коксового остатка. Для торфяных частиц данные, полученные таким методом, дали хорошее совпадение с результатами технического анализа торфа и визуальных наблюдений.



Фиг. 2. Кривая выгорания частицы торфа.

Учитывая, что начальный вес частиц в различных сериях опытов несколько отличался между собою, кривые выгорания были видоизменены и представлены согласно зависимости $\frac{G_n}{G_0} \% = \varphi(\tau)$, где $\frac{G_n}{G_0}$ —

количество сгоревшего топлива за время τ в процентах от начального веса. На таких „обобщенных“ кривых выгорания можно предварительно изучить влияние внешних фактов (температурные и диффузионные условия) и начальной физической структуры частицы (пористость) на интенсивность горения.

На фиг. 3 приведена одна из таких кривых для торфяных частиц различной плотности при температуре среды $t_c = 600^\circ\text{C}$ и скорости подвода воздуха $w = 30 \text{ см/сек}$.

В результате анализа „обобщенных“ кривых выгорания было установлено, кроме всего прочего, что влияние плотности топлива на интенсивность горения проявляется в различной степени на различных стадиях процесса и в различных температурных условиях горения. Оно оказывается более заметным в области низких температур, и менее заметным в области высоких температур, особенно в стадии горения коксового остатка.

5.

Соответствующая обработка данных, охватывающих результаты большого числа опытов с торфяными частицами одинакового или почти одинакового веса, показывают, что средняя интенсивность выхода летучих, характеризуемая величиной τ_a (продолжительность выхода летучих в сек), может быть выражена следующей формулой

$$\tau_a = \frac{10^3}{a(2 - \gamma_0)} \quad (8)$$

где γ_0 — начальный удельный вес частицы, значение которого колебалось в пределах $0,3 - 1,2 \text{ г/см}^3$;

a — коэффициент, зависящий от температуры среды.

По данным опытов значение температурного коэффициента можно принять:

$$t^\circ \text{C} = 400 \quad 500 \quad 600 \quad 700$$

$$a \quad 1,1 \quad 1,6 \quad 2,2 \quad 3,0$$

Истинные значения абсолютной скорости выхода летучих

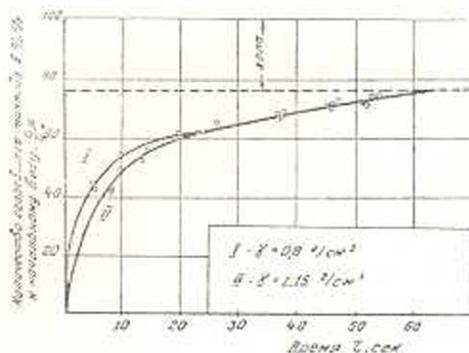
$K_a^* \text{ г/сек}$ были получены графическим дифференцированием кривых выгорания. В большинстве случаев кривые K_a^* , как функции времени τ (или убывающие веса G),

характеризуются двумя восходящими и нисходящими ветвями (фиг. 4), причем величина и время достижения этой скорости своего максимального значения определенным образом зависит от температурных условий и плотности частицы.

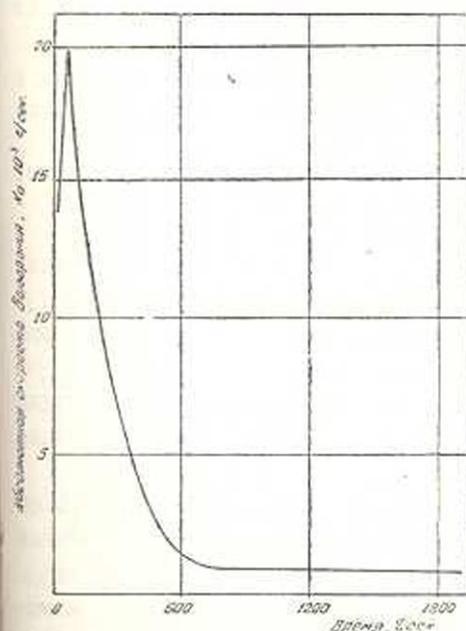
Учитывая, что выход летучих происходит по всей массе частицы, была определена удельная массовая скорость K_m^A согласно выражению:

$$K_m^A = \frac{dG}{dt} \cdot \frac{1 \text{ г летучих}}{G \text{ г топлива сек}} \quad (9)$$

т. е. путем деления ординат кривых абсолютной скорости $K_a^* = f(\tau)$ на соответствующие



Фиг. 3. Кривые выгорания частицы торфа различной плотности, $t_{\text{гор}} = 600^\circ \text{C}$, $w = 30 \text{ см/сек}$.



Фиг. 4. Абсолютная скорость выгорания частицы торфа.

ординаты кривых выгорания $G_i = f(\tau)$, где G_i — текущий вес горячей частицы в момент времени (τ). Величина K_i^a имеет условный характер, так как по мере выгорания частицы ее летучая часть уменьшается, т. е. процентное содержание летучих непрерывно падает. На основании всех полученных данных, характеризующих интенсивность выхода летучих, можно заключить, что:

а) при прочих равных условиях, в том числе при одинаковых начальных весах, чем меньше плотность топлива, тем интенсивнее происходит выделение летучих;

б) максимальная скорость выделения летучих достигается тем раньше, чем выше температура среды и ниже плотность частицы;

в) для менее плотных частиц торфа, сжигаемых на „решетке“, максимальная температура у частицы („температура слоя“) совпадает во времени с максимальной скоростью выхода летучих. При этом до температуры среды $t_c < 550^\circ\text{C}$ максимальная температура у частицы $t_{ca} < t_c$, а при $t_c \geq 600^\circ\text{C}$, $t_{ca} \geq t_c$;

г) влияние скорости воздушного потока проявляется в той мере, в какой она связана с условиями воспламенения летучих и общим температурным режимом процесса.

6.

В результате сравнительного анализа значительного количества кривых выгорания можно сделать следующие общие выводы о горении коксового остатка:

1. Низкотемпературная область горения характеризуется слабой зависимостью интенсивности горения от скорости воздушного потока и устойчивой температурой возле частицы.

Выгорание коксового остатка изображается прямой линией с постоянным углом наклона к оси абсцисс. Таким образом, абсолютная скорость выгорания $K_a^c = -\frac{dG}{d\tau}$ не зависит от времени и при данных

внешних условиях горения является постоянной величиной.

2. При более высоких температурах среды и небольших значениях скорости потока наблюдается значительное падение температуры возле частицы в конце горения. На кривых выгорания более или менее четко обнаруживаются два участка прямых с различными углами наклона. Первый участок изображает горение коксового остатка при еще небольшом слое золы, а второй — при значительной толщине этого слоя.

3. Наконец, при высокой температуре среды и значительной скорости воздушного потока линия выгорания имеет криволинейный характер и абсолютная скорость оказывается зависящей от времени. Температурные и диффузионные условия горения значительно изменяются в процессе горения коксового остатка и нарастания золыной оболочки.

Интенсивность выгорания коксового остатка в низкотемпературной области можно приближенно оценить величиной удельной массовой скорости (скорость горения, отнесенная к весу частицы) K_m^c , пользуясь кривыми выгорания и абсолютных скоростей K_a^c , или непосредственно по опытным данным. В последнем случае среднее значение K_m^c в интервале времени $\tau_2 - \tau_1 = \Delta \tau$ находится из выражения

$$K_m^c = \frac{\Delta G}{\Delta \tau \left(G_{10} + \frac{\Delta G}{2} \right)} \quad (10)$$

где ΔG — количество выгоревшего углерода за время $\Delta \tau$,

G_{10} — начальный вес частицы для данного интервала времени.

Среднее значение K_m^c можно определить и таким путем: согласно определению $K_m^c = -\frac{dG}{d\tau} \cdot \frac{1}{G}$. Если допустить, что в интервале времени $\tau_2 - \tau_1 = \Delta \tau$ значение $K_m^c = \text{const.}$, то получим:

$$K_m^c(\tau_2 - \tau_1) = - \int_{G_{10}}^{G_1} \frac{dG}{G} = 2.3 \lg \frac{G_{10}}{G_1},$$

откуда

$$K_m^c = \frac{2.3 \lg \frac{G_{10}}{G_1}}{\tau_2 - \tau_1} \quad (11)$$

Формула (11) дает несколько более точные результаты, чем предыдущая. Если скорость горения отнести только к горючей массе частицы, что возможно более справедливо, то получим

$$K_m^c = \frac{2.3 \lg \frac{G_{10} - A}{G_1 - A}}{\tau_2 - \tau_1} \quad (11^a)$$

где A — вес золы в частице.

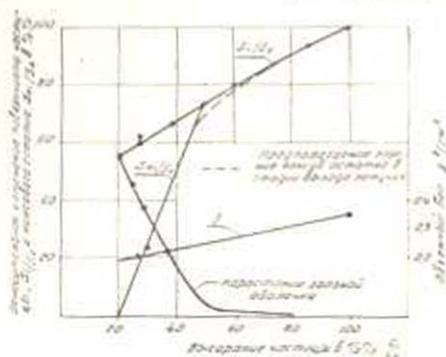
В связи с тем, что в выражениях (10) и (11) скорость горения отнесена не к горючей массе, а к общему весу частицы, в которой по мере выгорания увеличивается доля инертной массы (золы), полученные значения K_m^c имеют условный характер. Пользуясь ими, можно количественно сравнить интенсивность горения коксового остатка в различных внешних условиях у частиц одного и того же топлива с одинаковой физической структурой.

Для определения удельных скоростей горения, отнесенные к поверхности частицы K_s^c , или поверхности его коксового остатка K_s^c , были использованы данные тех опытов, которые сопровождалась перио-

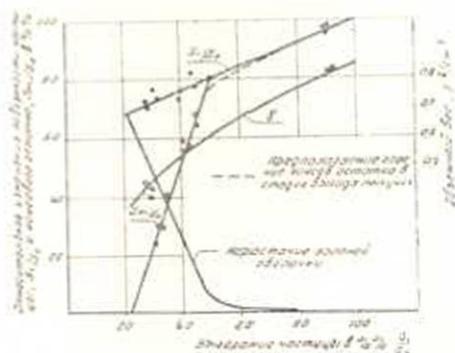
лическими измерениями размеров частицы в целом и ее коксового остатка. В этих опытах частицы сжигались в условиях, обеспечивающих более или менее равномерное выгорание.

Данные одновременных измерений основных размеров частицы и ее коксового остатка были обработаны таким образом, чтобы можно было относительное изменение диаметра, внешней поверхности, объема, объемного веса и т. д. выразить в функции от относительного изменения веса частицы.

Так, например, кривые $\frac{S_1}{S_0} = f_1\left(\frac{G_1}{G_0}\right)$ и $\frac{S_{к1}}{S_0} = f_2\left(\frac{G_1}{G_0}\right)$ на фигурах 5 и 6 выражают относительное изменение суммарной внешней поверхности частицы и ее коксового остатка в зависимости от процентного изменения веса частицы.



Фиг. 5. Определение поверхности частицы торфа и ее коксового остатка в процессе горения. Плотность частицы $\gamma_0 = 0,4 \text{ г/см}^3$.



Фиг. 6. Определение поверхности частицы торфа и ее коксового остатка в процессе горения. Плотность частицы $\gamma_0 = 0,85 \text{ г/см}^3$.

Зная начальную поверхность частицы S_0 и пользуясь кривыми выгорания, можно в любой момент процесса горения определить суммарную внешнюю поверхность частицы S_1 и ее коксового остатка $S_{к1}$.

Как видно из приведенных фигур, зависимость $\frac{S_1}{S_0} = f_1\left(\frac{G_1}{G_0}\right)$ изображается почти прямой линией, пересекающей ось относительного изменения веса частицы $\frac{G_1}{G_0}$ в точке, абсцисса которой соответствует зольности сжигаемого топлива.

Несколько неопределенно поведение этой кривой в начальный момент горения коксового остатка. Если продолжить ее до пересечения с кривой $\frac{S_1}{S_0}$, то абсцисса точки пересечения с достаточной точностью будет соответствовать уже известному процентному содержанию летучих. Так как горение коксового остатка, хотя и в слабой форме, может протекать и в конце выхода летучих, пунктирной ли-

нией показано предполагаемое поведение кривой $\frac{S_{ki}}{S_0}$ в стадии выхода летучих.

Здесь же нанесены кривые, изображающие нарастание зольной оболочки по мере выгорания топлива. Ординаты последних кривых получены как разности соответствующих ординат кривых $\frac{S_i}{S_0}$ и $\frac{S_{ki}}{S_0}$.

Кривые на фигурах 5 и 6 показывают, что чем меньше начальная плотность частицы, тем быстрее происходит уменьшение ее размеров, т. е. тем круче идут кривые $\frac{S_i}{S_0}$, $\frac{V_i}{V_0}$ и т. д.

В результате математической обработки кривых $\frac{S_i}{S_0} = f_1\left(\frac{G_i}{G_0}\right)$ и $\frac{S_{ki}}{S_0} = f_2\left(\frac{G_i}{G_0}\right)$ получаем выражения для определения внешней поверхности частицы торфа S_i и ее коксового остатка S_{ki} для любого момента горения:

$$S_i = S_0 \left[(0,63 - 0,29 \gamma_0) \frac{G_i}{G_0} + (0,35 + 0,28 \gamma_0) \right] \text{ см}^2, \quad (12)$$

$$S_{ki} = S_0 a_1 \left(\frac{G_i}{G_0} - \frac{\Lambda^2}{100} \right) \text{ см}^2, \quad (13)$$

где S_0 — начальная величина внешней поверхности частицы;

a_1 — коэффициент, зависящий от начальной плотности частицы.

Для горфяных частиц он колеблется в пределах 2,3 — 3,25 при изменении величины γ_0 соответственно от 0,3 до 1,25.

Характер изменения плотности частицы зависит как от внешних условий горения, так и от начального значения объемного веса γ_0 . Так, для значения $\gamma_0 = 0,3 \div 0,4$ величина γ убывает почти по линейному закону и может быть выражена уравнением:

$$\gamma_i = 0,002 \frac{G_i}{G_0} + 0,15. \quad (14)$$

для значения $\gamma_0 > 0,8 \div 0,9$ изменение плотности происходит интенсивнее и следует криволинейному закону. В уравнениях (12 — 14) влияние внешних факторов горения выражается величиной G_i — текущий вес горящей частицы в момент времени τ . Последней обработкой „обобщенных“ кривых выгорания получаем следующее выражение

$$G_i = \frac{BG_0}{\tau^n}. \quad (15)$$

Здесь B и n — эмпирические коэффициенты, зависящие от температурных и диффузионных условий горения.

Пользуясь формулой (15) можно определить S_i и S_{ki} для любого момента времени τ по заранее известным величинам G_0 , S_0 и γ_0 . Удельная поверхностная скорость горения коксового остатка, отнесенная к горячей поверхности кокса, по определению должна быть равна:

$$K_s^c = -\frac{dG}{d\tau} \cdot \frac{1}{S_{ki}}, \quad (16)$$

где,

$$S_{ki} = I(\tau).$$

пользуясь (13) и (15), получим

$$K_s^c = \frac{D}{D^2 \tau^{n+1} \left(\frac{1}{\tau^n} - 1 \right)}, \quad (17)$$

где

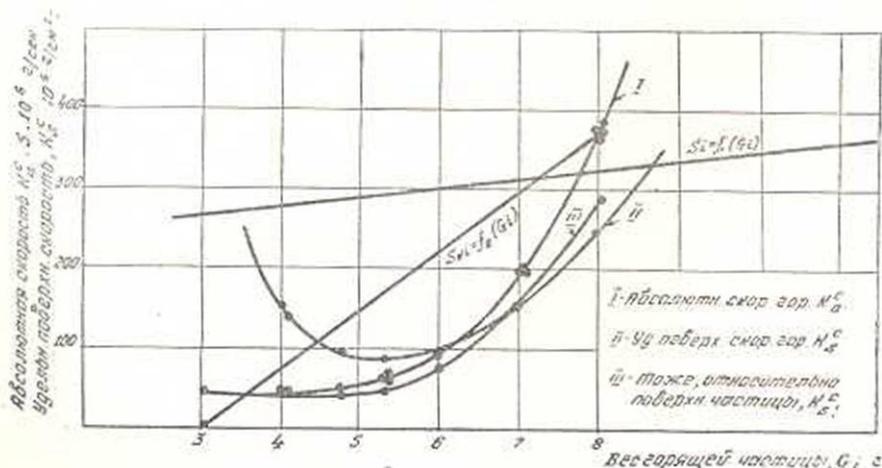
$$D = \frac{nBG_0}{a_1 S_0 \frac{A^n}{100}}, \quad D^1 = \frac{B}{A^2}$$

Таким образом, в конечном счете фигурируют те же эмпирические коэффициенты B и n , определяемые по кривым выгорания для различных значений температуры и скорости подвода воздуха.

Значение удельных скоростей горения можно определить и непосредственно, графическим методом, пользуясь кривыми, выражающими зависимости:

- $K_s^c = \gamma_1(G_i)$ — их легко получить по кривым выгорания,
- $K_s^c = \gamma_2(\tau)$ и
- изменения поверхности (или объема) горячей частицы в функции от относительного изменения убывающего веса, как показано, например, на фиг. 5 и 6.

Фигура 7 иллюстрирует графический метод определения удельных скоростей горения.



Фиг. 7. Графический метод определения удельной поверхностной скорости горения. $\gamma_0 = 0,9$, $t_{op} = 450-550^\circ\text{C}$. $w = 36$ см/сек.

Линии $S_1 = f_1(G_1)$ и $S_{k1} = f_2(G_1)$ соответственно изображают изменение поверхности частиц и ее коксового остатка от изменяющегося веса в процессе горения.

Они построены согласно (12) и (13) и кривых типа фиг. 5 и 6. Кривые K_2^c построены графическим дифференцированием обобщенных кривых выгорания. Кривые удельных скоростей горения получены путем деления значения K_2^c на соответствующие ординаты линий $S_{k1} = f_2(G_1)$ и $S_1 = f_1(G_1)$. Полученные кривые удельных скоростей горения легко могут быть преобразованы в кривые, выражающие изменение величин K_2^c , K_1^c и т. д., в зависимости от времени горения.

Поведение кривой K_2^c (на фиг. 7 и другие) легко объяснить, если учесть, как это было отмечено выше, что в области сравнительно низких температур абсолютная скорость горения K_2^c не зависит от времени, в то время как суммарная внешняя поверхность коксового остатка является монотонно убывающей величиной. Следует также учесть, что с уменьшением веса частицы удельная поверхность ее увеличивается.

Для цилиндрических частиц оказалось возможным установить приближенные количественные связи, отражающие изменение линейных размеров частицы и ее коксового остатка в процессе горения. На фиг. 8 представлены обобщенные кривые изменения линейных размеров для цилиндрических частиц, обладающих значительной плотностью ($\gamma_0 = 1,1 \div 1,2$).

Смысл представленных кривых станет ясным, если изобразить чисто геометрическую схему выгорания многозольной цилиндрической частицы с обозначениями, данными на фиг. 9.

Здесь: $d_1, h_1; d_2$ и h_2 — диаметр и высота частицы в момент времени τ_1 и τ_2 , когда вес частицы убывает от значения G_1 до G_2 ;

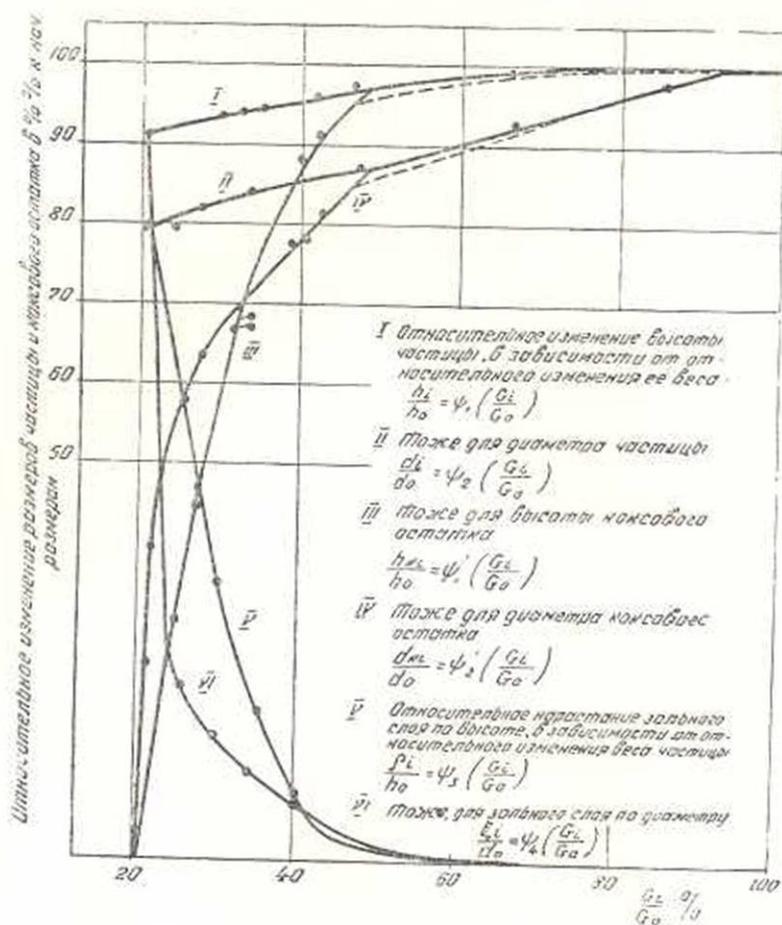
$d_{k1}, h_{k1}; d_{k2}$ и h_{k2} — то же самое для коксового остатка (т. е. без зольной оболочки);

$\xi_1 = \frac{d_1 - d_{k1}}{2}$, $\xi_2 = \frac{d_2 - d_{k2}}{2}$ — глубина зольной оболочки по диаметру в момент времени τ_1 и τ_2 ;

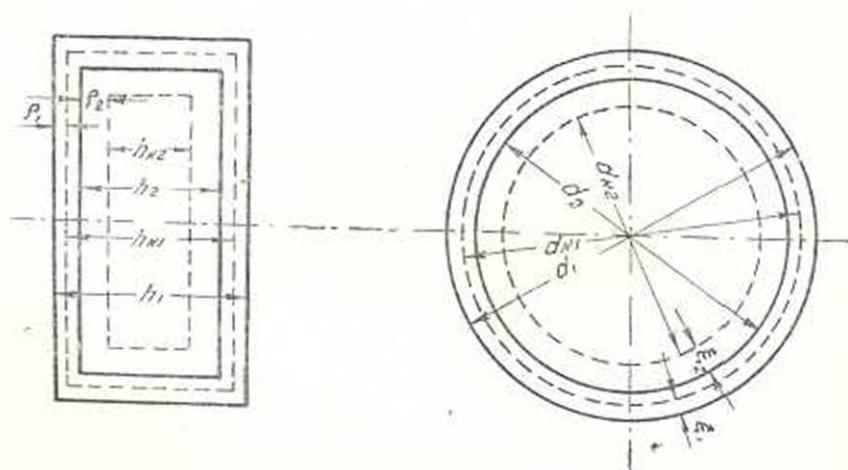
$\rho_1 = h_1 - h_{k1}$, $\rho_2 = h_2 - h_{k2}$ — глубина зольной оболочки по высоте в момент времени τ_1 и τ_2 .

Путем математической обработки кривых, подобно изображенных на фиг. 8, нетрудно получить выражения, характеризующие интенсивность выгорания частицы и ее коксового остатка через скорости убывания линейных размеров (диаметра и высоты).

Пользуясь этими выражениями, получены формулы (18) и (19) для определения скорости горения через скорость нарастания зольной оболочки по диаметру и по высоте.



Фиг. 8. Зависимости размеров цилиндрической частицы торфа и ее коксового остатка от относительного изменения веса частицы.
 $\gamma = 1,1 - 1,2 \text{ г/см}^3$.



Фиг. 9. Геометрическая схема горения частицы зольного топлива.

$$\dot{z}' = \frac{d_0}{2} \left[\frac{E_2 \beta}{\tau^l + a} \left(\frac{\theta}{\tau^2} - A^2 \right) - \frac{E_1}{\tau^a} \right], \quad (18)$$

$$\rho' = \frac{h_0}{2} \left[\frac{E_4 \beta_1}{\tau^l + a} \left(\frac{\theta_1}{\tau^u} - A^2 \right) - \frac{E_3}{\tau^m} \right], \quad (19)$$

где E, α, β, θ и θ_1 — с соответствующими индексами — опытные коэффициенты, зависящие от внешних условий горения. Они в свою очередь могут быть выражены в функции тех же величин B и ρ , определяемые по кривым выгорания.

Путем анализа кривых удельных скоростей горения и эмпирических зависимостей можно сделать следующие **выводы** об интенсивности горения коксового остатка исследуемых частиц топлива.

1. Роль плотности частицы, как некоторой характеристики физической структуры топлива, проявляется заметно в области низких температур (фиг. 10).

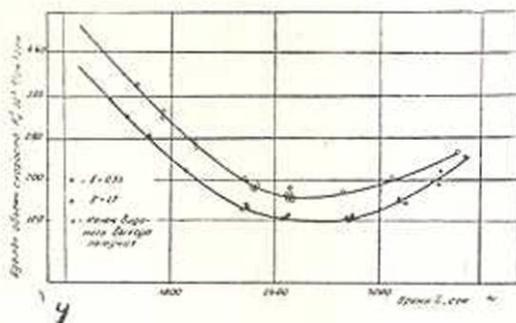
С повышением общего температурного уровня влияние плотности на скорость горения менее заметно и обнаруживается только в начале процесса. Во всех случаях с нарастанием зольной оболочки влияние начальной плотности оказывается менее заметным.

2. „Температурные“ кривые, построенные по усредненным данным для частиц различной плотности, приближенно правильно описывают поведение величины K_s^c (фиг. 11) при более высоких температурах; кривые для различных значений γ_0 сходятся, а при более низких температурах, наоборот, расходятся.

3. Вследствие неустановившегося характера диффузионных условий горения, неизотермичности поверхности крупной частицы и трудности опытного определения истинной температуры горячей поверхности, точное определение границ крайних областей горения связано с большими трудностями (так же, как и определение величин кинетического характера, в том числе и энергии активации).

По данным опытов приближенно можно считать, что влияние скорости воздушного потока оказывается заметным, когда температура частицы достигает величины порядка 500°C для торфа, а 550°C для бурого угля.

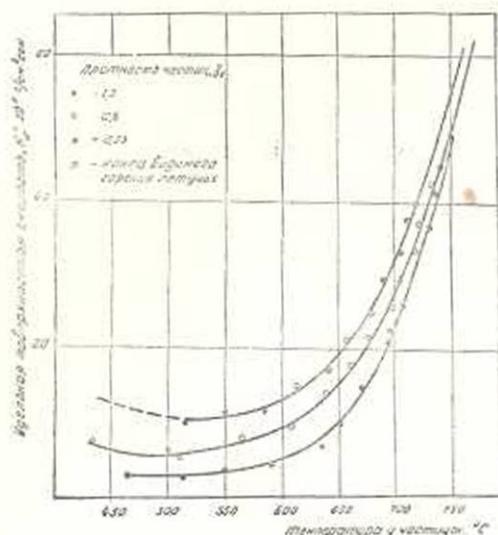
4. В области низких температур и при значительной толщине зольного слоя абсолютная скорость горения коксового остатка K_s^c



Фиг. 10. Скорость горения коксового остатка частицы торфа. $t_c = 450^\circ\text{C}$. $w = 15$ см/сек.

оказывается слабо зависящим от времени ($n \approx 1$), а удельная поверхностная скорость горения K_s^c растет с нарастанием зольного слоя.

5. В области высоких температур по мере нарастания зольной оболочки абсолютная скорость падает, причем на характер зависи-



Фиг. 11. Скорость горения коксового остатка частицы торфа в зависимости от температурных условий. $w = 15$ см/сек.

мости величины K_s^c от времени в значительной степени влияет скорость потока (для коксового остатка частиц торфа $0 < n < 1$).

Следует отметить, что все вышеприведенные эмпирические связи и формулы, кроме всего прочего, отражают также специфические условия наших опытов.

Влияние основных физико-химических факторов процесса характеризуется эмпирическими коэффициентами. При наличии большого количества опытных данных можно путем сравнительной оценки коэффициентов B и n найти значение тех основ-

ных физических констант, непосредственное определение которых связано с большими трудностями и тем самым получить обобщенные формулы для определения удельных скоростей горения в зависимости от температурных и дутьевых условий.

Практическим результатом настоящей работы явилось установление влияния механической переработки, т. е. брикетирования сравнительно зольных молодых видов топлива (торф и бурый уголь) на интенсивность их горения как в условиях высокого пирометрического уровня (топки и печи местных предприятий), так и низкого пирометрического уровня (домашнее отопление).

Ереванский политехнический институт им. К. Маркса

Поступило 23 I 1954

ЛИТЕРАТУРА

1. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. Госэнергоиздат, 1951.
2. Кнорре Г. Ф. (редактор). Исследование процессов горения натурального топлива. Сборник статей, Госэнергоиздат, 1948.
3. Прядко П. А., Хайрия Л. Н. и др. Горение углерода. Издание АН СССР, 1949.
4. Башков С. И. Труды ВГУ, том XI, вып. 1, 7 и 55, 1939.

Է. Տ. Ղուլոյան

ՏԱՐԲԵՐ ԽՏՈՒՔՅՈՒՆ ՈՒՆԵՑՈՂ ՄՈՒՐԱՌԱՏ ՎԱՌԵԼԻՔԻ ԵՐԻՏԱՍԱՐԴ ՏԵՍԱԿՆԵՐԻ ԱՅՐՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒՔՅԱՆ ԷՔՍՊԵՐԻՄԵՆՏԱԼ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՅՈՒՆԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգւածում ցույց է տրված, որ մեծ քանակութեամբ ցնդող նյութեր և հանքային խառնուրդներ պարունակող վառելիքի այրման բարձր մեխանիզմի ուսումնասիրութեան առաջին փուլում, հետազոտութեան օրյակապետք է ծառայի ընտանի վառելիքի (և ոչ թե նրա կոքսային մնացորդի) զգալի չափեր ունեցող մասնիկը, իսկ որպես մեթոդ՝ այրման քրնդանրացված կորերի բազմակողմանի մշակումը:

Հետազոտութեանը հնարավորութեան է ավել սրուշելու վառելիքի ներքին ֆիզիկական ստրուկտուրայի ազդեցութեանը ցնդող նյութերի կլեքի ինտենսիվութեան վրա ջերմային տարբեր պայմաններում և ստանալու փորձնական ասնջութեաններ՝ ցնդող նյութերի միջին արագութեանը գրանելու համար:

Այրման քրնդանրացված կորերի մշակման ճանապարհով ստացվել են քանակական ասնջութեաններ՝ կոքսային մնացորդի այրման բացարձակ և տեսակարար արագութեանները սրուշելու համար: Այդ կորերի և ասնջութեանների վերլուծութեանը ցույց է տալիս, որ վառելիքի խտութեան զգալի ազդեցութեան է գործում այրման պրոցեսի վրա մեայն ցածր ջերմաստիճանների տիրույթում և որ, ջերմային պայմաններից անկախ, մոխրաթաղանթի աճման զուգընթաց, վառելիքի խտութեան գերը հետզհետե թուլանում է: Գածր ջերմաստիճանների տիրույթում և մոխրաթաղանթի զգալի հաստութեան պայմաններում կոքսային մնացորդի այրման բացարձակ արագութեանը նվազ կախում ունի ժամանակից, իսկ այրման տեսակարար մակերևութային արագութեանն աճում է մոխրի շերտի աճման հետ միասին: Բարձր ջերմաստիճանների տիրույթում, մոխրաթաղանթի աճման զուգընթաց, բացարձակ արագութեանն ընկնում է, ընդ որում վերջինիս կախումը ժամանակից զգալի չափով պայմանավորվում է օդի հոսանքի արագութեամբ:

Հետազոտութեան գործնական արդյունքը հանդիսացավ այն, որ սրուշվեց մոխրաճառ վառելիքի երկտասարդ տեսակների մեխանիկական վերամշակման (բրիկետացման) ազդեցութեանը նրանց այրման ինտենսիվութեան վրա տարբեր ջերմային պայմաններում: