

волны горения и в попутном потоке окислителя, однако предельное значение концентрации окислителя C_{∞} при этом ниже, чем при распространении волны навстречу потоку окислителя.

Обратим внимание на то обстоятельство, что вследствие существования кромки зоны химической реакции значительная часть продуктов газификации материала может проникать под ней, не сгорая. Теория предсказывает увеличение доли несгоревших продуктов газификации по мере приближения к пределам распространения волны горения. Если слой материала находится на теплопоглощающей подложке или в результате горения образуется коксовый остаток, то вследствие их охлаждающего действия в факеле пламени может возникнуть вторая кромка зоны химической реакции, что приведет к еще большему увеличению доли несгоревших продуктов газификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. de Ris. 12-th Symposium on Combustion. Pittsburgh: Combustion Inst., 1969.
2. С. С. Рыбанин. Докл. АН СССР, 1977, 235, 5, 1110.
3. A. E. Frey, J. S. T'ien. Comb. Flame, 1979, 36, 263.
4. С. С. Рыбанин, С. Л. Соболев, Л. Н. Стесик.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1980.
5. Б. Нобл. Метод Винера — Хопфа. М.: ИЛ, 1962.
6. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 10, 1199.

УДК 662.611 : 662.66.001.5

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Г. Н. Делягин

(Москва)

Уголь — это многокомпонентная природная горная порода, составляющие которой по свойствам существенно отличаются как друг от друга, так и от осредненной ее массы.

Горение частиц натурального угля является многофазным, многостадийным процессом, в котором наряду с высокотемпературными реакциями горения протекают процессы экзо- и эндотермического разложения угольного вещества, сопровождающиеся выделением летучих, изменением объема частицы и ее структуры, а также процессами тепло- и массообмена, интенсивность которых существенно зависит от температуры среды и частицы.

В начальный период горения происходит разрыв связей в макромолекуле органической массы топлива, которая идет по радикально-цепному механизму в результате ряда последовательно-параллельных реакций с разными кинетическими характеристиками; скорость этих реакций имеет неодинаковую зависимость от температуры, что предопределяет известную неопределенность влияния отдельных реакций на суммарный процесс. В то же время в этот период происходят столь существенные процессы перестройки угольного вещества, что независимо от относительной его продолжительности, они оказывают, как правило, решающее влияние на характеристики всего процесса горения в целом.

Для инженерных расчетов принято условно делить суммарный процесс горения угольной частицы на 4 стадии: 1) прогрев частицы до воспламенения летучих, 2) горение летучих в газовом объеме, 3) прогрев коксового остатка до его воспламенения, 4) выгорание коксового остатка [1]. Такое деление процесса горения на стадии и полученные для расчета эмпирические формулы, полезные в практической работе, не позволяют вскрыть действительные закономерности развития процесса горения

частицы натурального угля. Современные методы экспериментальных исследований быстротекущих процессов позволили разработать методику изучения и анализа процесса горения частицы натурального топлива на основе данных по динамике изменения ее массы и температуры поверхности во времени.

Сопоставление этих данных дало возможность предложить новую модель горения частицы угля, общую как для натуральных углей всех стадий метаморфизма, так и твердых продуктов термической переработки угля, а также композиционных топлив на основе угля, например, топливных суспензий, в том числе водоугольных.

Экспериментальные исследования выполнены на установке, основным элементом которой являются автоматические быстродействующие термовесы, предназначенные для регистрации во времени изменения массы исследуемого вещества с одновременной регистрацией изменения его температуры; допустимая начальная масса образца — от 0,001 до 0,1 г, время установления переходного процесса — 0,04 с, температура среды в зоне измерения — от 20 до 1200°C, максимальная температура образца 1600°C. Одновременно установка позволяет регистрировать также изменение формы и сечения образца методом скоростной киносъемки. В основу весов положена статическая следящая система, в которой чувствительный элемент — подвижная рамка магнитоэлектрических весов — включен в цепь отрицательной обратной связи, используемой для быстрого уравнивания весов по производной [2].

Эксперименты выполнены при температурах среды: 300, 310, 410, 500, 625, 700, 810, 890, 1000°C на частицах с начальной массой 0,0012—0,0013 г углей каменных: газовых (Г), слабоспекающихся (СС), отощенноспекающихся (ОС), полуантрацитов (ПА), бурых: марок Б1, Б2, Б3, термоугля, а также капель водоугольных суспензий, при изменении зольности углей A^d от 6,9 до 60%, рабочей влажности W_t^r от 3,2 до 65% и выходе летучих V^{daf} от 7,8 до 66,2%.

Результаты выполненных экспериментов, представленные для частиц угля в виде зависимости изменения массы частицы b (в %) и температуры на ее поверхности T (в °C) от времени (рис. 1), показали полную идентичность закономерностей горения частиц углей всех марок с естественным сдвигом кривых в сторону сокращения периода термоподготовки с возрастанием температуры среды.

Установлено, что горение частицы угля от момента ее ввода в окислительную среду до полного выгорания является непрерывным процессом физико-химического взаимодействия массы частицы с окислителем, во время которого происходят изменения структуры частицы и активности ее поверхности.

В целом процесс горения частицы характеризуется резкими изменениями характера его протекания на отдельных временных этапах, что позволяет условно выделить 10, а для высоковлажного топлива и водоугольных суспензий 11 характерных, последовательно протекающих стадий, каждая из которых отличается вполне определенным характером изменения массы b частицы и температуры T ее поверхности, а также их скоростями $b' = \Delta b / \Delta \tau$ и $t' = \Delta T / \Delta \tau$, где $\Delta \tau$ — время протекания стадии.

Первая стадия, подготовительная (см. рис. 1, I) является стадией прогрева частицы, сопровождаемого в ряде случаев некоторой потерей массы за счет испарения влаги частицы (в случае водоугольной суспензии и иногда высоковлажного топлива выделяется отдельно стадия поверхностного испарения влаги); прогрев частицы происходит при определяющем влиянии тепло- и массопереноса, при непрерывном возрастании параметра b' и постоянном или возрастающем значении t' во времени.

Собственно процесс горения частицы начинается со стадии II — дальнейшего прогрева частицы и начала низкотемпературных экзотермических реакций внутри объема частицы, что приводит к достаточно рез-

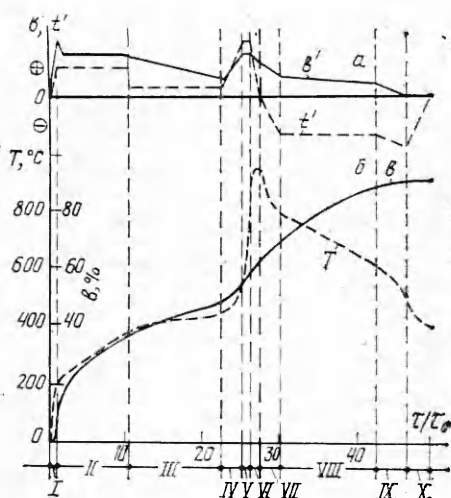


Рис. 1. Зависимость степени изменения массы частицы b и температуры ее поверхности T в процессе горения. a — схема изменения параметров b' и t' во времени; b — экспериментальные зависимости b и T во времени; τ/τ_0 — относительное время горения частицы. Уголь марки Г (Кузбасс): $A^d = 9,4\%$, $W_t^d = 11,5\%$. Начальная масса частицы $0,0015$ г, температура среды 400°C .

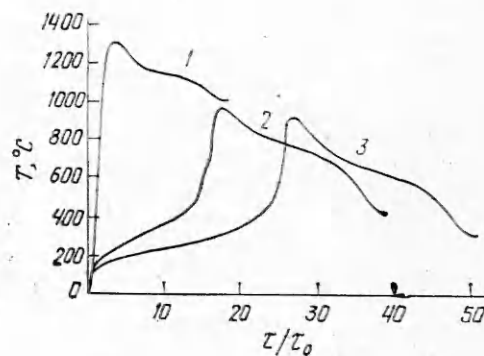


Рис. 2. Влияние температуры среды на изменение температуры T поверхности частицы при ее выгорании.

Температура среды, $^\circ\text{C}$: 1 — 1000, 2 — 400, 3 — 300. Уголь марки Б2 Назаровского месторождения, $A^d = 11,2\%$, $W_t^d = 39\%$.

К началу стадии III (см. рис. 1) в объеме частицы начинают развиваться эндотермические реакции, связанные с деструкцией угольного вещества и выходом летучих; скорость нарастания t' резко падает при непрерывном росте параметра b' . Стадия завершается, как правило, воспламенением летучих (для каменных и бурых углей) или активных участков угольной поверхности (для антрацитов и капель водоугольной суспензии). Стадия протекает в кинетическом режиме с кажущейся энергией активации $\sim 90\text{--}95$ кДж/моль.

Стадия IV — это горение летучих вокруг объема частицы; она характеризуется резким возрастанием t' при одновременном уменьшении параметра b' и протекает при определяющем влиянии процессов тепло-массообмена.

Стадия V характеризуется параллельно протекающими реакциями горения летучих вокруг объема частицы и начала поверхностного гетерогенного горения коксового остатка, о чем свидетельствует скачкообразное увеличение t' в начальный момент времени этой стадии при монотонном снижении параметра b' . Стадия протекает в условиях промежуточного режима реагирования и характеризуется достаточно высокими значениями кажущейся энергии активации, равной $\sim 55\text{--}60$ кДж/моль.

Стадия VI — активное горение коксового остатка частицы с догоранием вокруг ее поверхности еще выделяющихся летучих, которое характеризуется меньшей, чем в стадии V, скоростью t' , падением параметра b' и течением процесса в кинетической области с кажущейся энергией активации до $150\text{--}180$ кДж/моль. По-видимому, это — чисто кинетическая область реагирования, обеспечивающая интенсивную разработку внутренних пор частицы и приводящая к диффузионному режиму горения на последующих стадиях. Стадия заканчивается достижением максимальной температуры поверхности частицы.

Стадия VII — горение коксового остатка частицы с догоранием еще выделяющихся летучих на ее поверхности, характеризующееся резким падением температуры поверхности T при непрерывном падении параметра b' ; процесс протекает в диффузионном режиме.

кому увеличению T частицы при непрерывном возрастании b' и t' , причем в ряде случаев конечное значение t' на этой стадии может приближаться к максимальному значению t'_{max} , характерному для стадии IV. Процесс протекает при определяющей роли тепло-массообмена.

Стадия VIII — горение коксового остатка, как правило, это самая продолжительная стадия, время течения которой в меньшей степени меняется при изменении температуры среды, чем у других стадий. Она протекает при определяющей роли массопереноса при плавном падающей температуре T и непрерывно уменьшающемся значении параметра b' .

Стадия IX — догорание коксового остатка, которое протекает также при определяющем влиянии массопереноса с более резким, чем в стадии VIII, падением температуры T во времени. Процесс горения завершается стадией X — охлаждением и стабилизацией формы зольного остатка; заканчивается она при охлаждении поверхности частицы до температуры среды; активных химических реакций не происходит.

Анализ развития процесса горения частицы угля во времени показывает, что основные, самые продолжительные стадии его развиваются в диффузионном режиме даже при низких температурах, а потому и в целом (при правильной организации процесса, обеспечивающей нормальное его развитие, особенно на стадиях IV и VI, протекающих в кинетическом режиме) процесс горения частицы натурального угля, даже очень мелкой, протекает при определяющем влиянии диффузионных составляющих.

Рассмотренные стадии выгорания частицы особенно четко выражены при температурах среды до 700°C . Повышение температуры в основном приводит к относительному сокращению протяженности стадий: I, II, III, IV (рис. 2) и, как следствие этого, уменьшению степени изменения массы частицы на этих стадиях. Так, увеличение температуры среды с 300 до 1000°C сокращает продолжительность первых шести стадий (до $T = T_{\text{max}}$) в 10—15 раз при общем снижении времени горения частицы всего в 4 раза.

Рассмотренная модель горения частицы натурального угля сохраняется при изменении начальных условий (температуры среды, начальной массы частицы и др.); особенности состава исходного угля могут существенно изменить относительную роль отдельных стадий в суммарном процессе. Предложенная физическая модель закономерностей развития процесса горения частицы натурального твердого топлива и топливных систем позволяет более детально проанализировать особенности горения твердых топлив различного состава и степени углефикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Бабий, И. Ф. Попова. ИФЖ, 1971, 21, 3, 411.
2. А. И. Кулинич, Г. Н. Делягин. Автоматические быстродействующие термовесы. Межотраслевой информационный листок № 0018—79. М.: ЦНИИЭУголь, 1979.

УДК 662.215.12

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ФРОНТЕ ДЕТОНАЦИИ

*В. Н. Минеев, А. А. Викторов, В. Е. Клаповский, А. П. Волков,
Т. И. Желтова, В. П. Горбунов*
(Москва)

При проведении измерений с ударными волнами, генерированными продуктами взрыва (ПВ), возникает необходимость учета неоднородности параметров заряда ВВ, например плотности и распределения компонентов. Эти неоднородности приводят к возмущениям фронта детонационной волны (ДВ) и параметров ПВ за фронтом.

В работах [1—4] приводятся данные об условиях возникновения волн Маха при взаимодействии плоских ДВ и продемонстрирована возможность расчетных методов оценки параметров ПВ за фронтом волны.

Цель настоящей работы — изучение закона развития возмущений на фронте ДВ.