УДК 621.311

ДИНАМИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТЕРМОУДАРЕ

Чернявский Н.В., Бондзик Д.Л.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина

АННОТАЦИЯ

На основании анализа ранее полученных экспериментальных данных по газификации пылевидного каменного угля и антрацита в потоке с высокотемпературным термоударом показано, что наблюдавшийся эффект «быстрой конверсии» (более 90% за время менее 0,1 с) углерода не может быть обеспечен реагированием углерода с CO_2 и H_2O и более вероятно связан с особенностями термической деструкции угольного вещества. На основании представления о Гауссовом распределе-нии энергии разрыва связей угольных макромоле-кул относительно среднего значения, близкого к энергии разрыва С-С связи в ароматических соединениях разработан метод инженерного расчета динамики термической деструкции углерода и получены расчетные результаты, коррелирующие с экспериментальными. Показано, что использование данного эффекта может существенно снизить габариты газогенераторов поточного типа.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с удорожанием углеводородных энергоносителей газификация угля все чаще рассматривается не только как основа парогазовых энергоустановок на твердом топливе, но и как средство получения синтез-газа для последующей переработки в синтетические жидкие и газообразные топлива. Среди технологий газификации наибольшее развитие получили реакторы ЦКСД и поточного типа [1]. Преимуществом парокислородной газификации в потоке под давлением считают то, что она позволяет использовать угли разной степени метаморфизма, включая низко-реакционные антрациты, и обеспечивает наиболее высокую калорийность продуктов газификации. В традиционных технологиях топливо и окислитель подают в одну зону реактора, при этом часть топлива сгорает, а остальная газифицируется в продуктах сгорания по реакциям $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ и $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$. Недостатком такой организации процесса есть то, что сгорает наиболее реакционноспособная часть угля, включая летучие, а газифицируется менее реакционноспособный коксовый остаток, что требует времени реагирования более 10 с при температуре 1500-1700°С. Известны также двухстадийные схемы процесса, где первичный уголь подается в зону горения в стехиометрии с окислителем, а уголь газификации вводится в бескислородный поток продуктов сгорания, что позволяет более эффективно использовать летучие вещества угля газификации [2]. Однако даже при этом лимитирующей стадией, определяющей необходимое время реагирования частиц, является газификация коксового остатка, что вынуждает увеличивать габариты реактора либо применять сложные схемы дожигания твердого остатка.

Исследования двухстадийной газификации пылевидного угля в потоке при $P_{атм}$ в ИУЭ НАН Украины [2, 3] выполнялись на укрупненном лабораторном стенде ВГП-100В производительностью по углю до 150 кг/ч с длиной футерованного оксидом циркония диагностического участка 2,4 м, диаметром канала 0,28 м (рис.1).

В экспериментах варьировались степень обогащения окислителя (от воздуха до 95%-ного кислорода), топливо стадии горения (природный газ, уголь), способ подачи угля газификации (в первую секцию - по оси факела и в его периферийную зону, и во вторую секцию

© Чернявский Н.В., Бондзик Д.Л.

- в бескислородный поток продуктов сгорания первичного топлива), относительный расход пара, коэффициент расхода газифицирующего агента, крупность пыли и другие параметры.

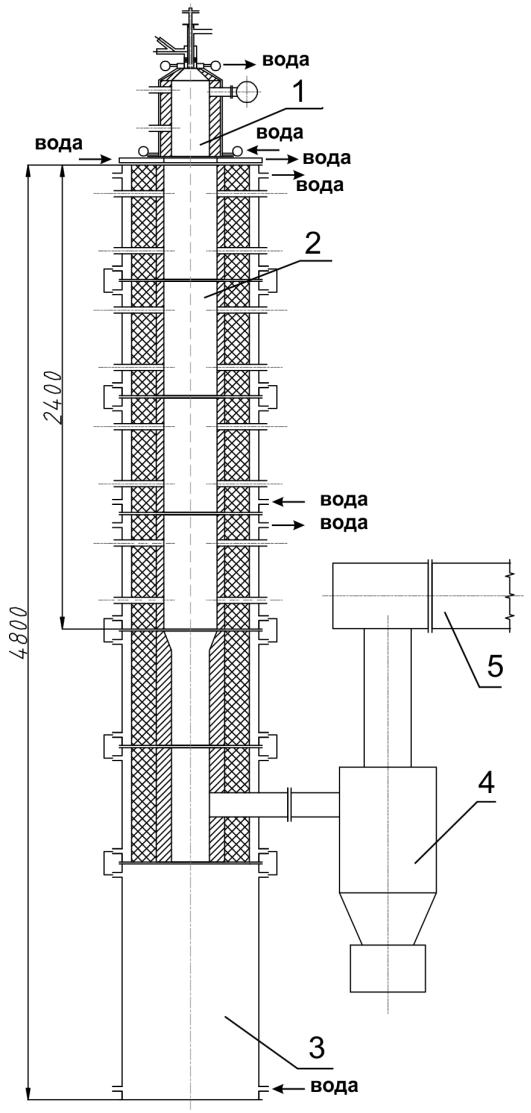

Рис.1 Экспериментальная установка ВГП-100В: 1 – горелочное устройство первичного топлива, 2 – диагностический участок реактора, 3 – шлакосборник, 4 – пылеуловитель, 5 – охладитель синтез-газа.

Было установлено, что в условиях термоудара (высококонцентрированная пылеподача угля газификации инертным газом в бескислородный поток продуктов сгорания) начиная с 1300-1500°С характер конверсии угля существенно изменялся: за время менее 0,1 с из угля не только выходили летучие вещества, но и происходила конверсия основной части фиксированного углерода. До 90% конверсии углерода достигалось при коэффициенте расхода газифицирующего агента $\beta \geq 1{,}7$: для донецких длиннопламенных углей – при дутье с объемной долей кислорода g_{O2} = 0,3-0,4, для донецкого антрацита – при кислородном дутье и подаче угля инертным газом (g_{O2} = 0,7-0,9). Этот эффект был назван «быстрой конверсией углерода при высокотемпературном термоударе». В [3] путем сведения материально-теплового баланса была рассчитана температура потока в зоне газификации с учетом диссоциации трехатомных молекул при разных β (рис.2), и построены экспериментальные зависимости степени конверсии углерода углей марок А и Д от температуры потока (рис.3, точки 1, 2).

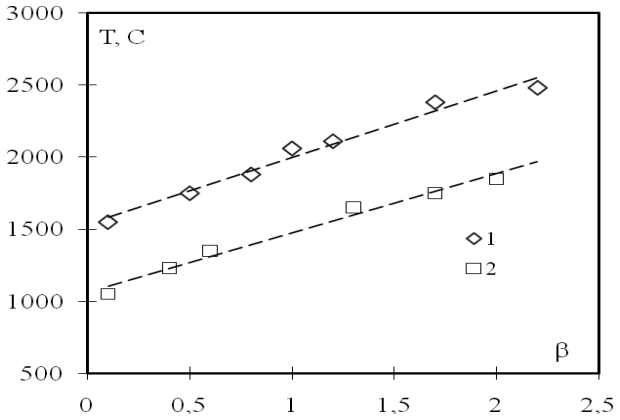

Рис.2 Зависимость температуры потока от β при газификации углей А (1) и Д (2).

Расчет с использованием полученных А.Майстренко с сотрудниками кинетических характеристик реагирования коксовых остатков углей разной степени метаморфизма с CO_2 (антрацит E_a = 229 кДж/моль, $k_0^{/}$ = 2,98·10^5 м^3/(кг·с), уголь Д E_a = 200 кДж/моль, $k_0^{/}$ = 6,37·10^5 м^3/(кг·с) [4]) показал, что, даже в пренебрежении временем разогрева частиц до температуры потока, диффузионным торможением и снижением концентрации газифицирующего агента за счет его исчерпания по мере реагирования, за время пребывания 0,1 с степень конверсии антрацита при 2200°С и длиннопламенного угля при 1700°С не превышает 40%. Если же учесть указанные факторы, а также установленное в [4] снижение удельной скорости реагирования углерода при X_C > 0,4 за счет исчерпания его

более высокореакционных компонентов, то достижение за время пребывания менее 0,1 с установленных в опытах уровней X_C за счет реакций газификации надо признать нереальным.

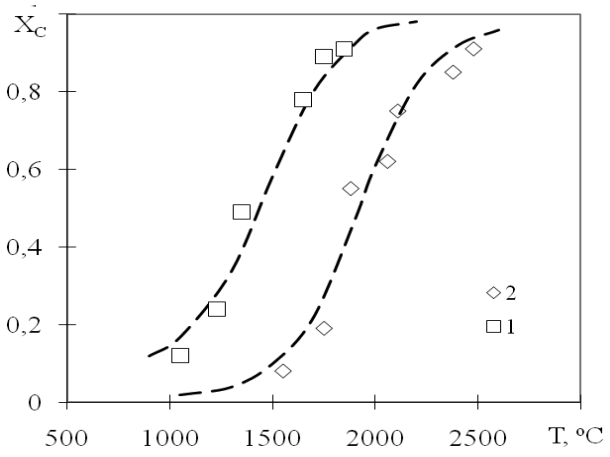

Рис.3 Степень конверсии углерода при различной температуре: точки 1, 2 – угли А и Д (эксперимент), пунктир - расчет.

В [3, 5] эффект «быстрой конверсии» был качественно объяснен следующим образом. Как обосновывалось в [6], в условиях высокотемпературного термоудара термическая деструкция, сопровождающая стадию пиролиза, затрагивает не только слабо связанные присоединенные группы, которые при медленном пиролизе выходят из угля в виде летучих веществ, но и ту часть угольного вещества, которая при медленном пиролизе переходит в твердый углеродный остаток. С ростом скорости и температуры нагрева исходные угольные макромолекулы распадаются на все большее количество мелких фрагментов, их подвижность становится все более высокой, а вероятность выхода из угольных частиц с последующим дореагированием в газовой фазе до CO, CO_2, H_2, H_2O – большей, чем вероятность конденсации в твердую углеродную структуру. Однако поскольку до настоящего времени методы расчета динамики термического разложения угольного вещества при высокотемпературном термоударе не были развиты, это объяснение оставалось лишь качественным.

В настоящей работе ставится задача проверки данной гипотезы с помощью количественных оценок.

S- И G-МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ УГЛЯ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ G-МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ СКОРОСТНОМ ПИРОЛИЗЕ

При термической деструкции индивидуального вещества (источника) скорость образования продукта в каждый момент времени пропорциональна количеству оставшегося источника. При пиролизе угля такими источниками считаются главным образом присоединенные группы, содержащие C, H, O, с энергиями активации разрыва связи 200-350 кДж/моль [7, 8].

Простейшим и наиболее распространенным [6, 7] является представление о том, что каждый i-й продукт пиролиза образуется при деструкции i-го источника с энергией разрыва одного определенного вида связи (S-модель, от single – единственный). В этом случае скорость образования i-го продукта из i-го источника:

$$dW_i/d\tau = k_i\cdot(W_{0i} - W_i), \quad (1)$$

$$k_i = k_{0i} \cdot \exp(-E_i/(R\cdot T)), \quad (2)$$

где W_{0i}, W_i – полное и вышедшее к моменту τ количество i-го продукта; k_i – константа скорости деструкции i-го источника; k_{0i} – предэкспоненциальный множитель, E_i – энергия активации; R = 8,315 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Недостатки такого представления, прежде всего в том, что кинетические константы k_{0i} и E_i, полученные в экспериментах с быстрым и медленным нагревом, существенно отличаются. Наблюдаемые в экспериментах значения энергий активации недостаточно обоснованы физическим смыслом: найденные в экспериментах [6, 7] для H_2, CO, CH_4, CO_2 значения E_i = 60-90 кДж/моль значительно ниже, чем указанные выше энергии активации разрыва связей. Кроме того, в экспериментах при росте конечной температуры наблюдается рост W_{0i}, чего S-модельное представление никак не учитывает.

Более совершенным является так называемое G-модельное представление (от Gauss) [6]. Поскольку источники каждого i-го продукта являются не индивидуальными веществами, а входят в состав сложной молекулярной структуры и подвержены влиянию окружающих связей, в нем принимают Гауссово распределение энергией активации источников i-го компонента

относительно среднего значения E_{0i} (без учета отрицательных значений E_i):

$$\frac{dW_{0i}}{dE_i} = \frac{W_{0i}}{\sigma_i\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{\left(E_i - E_{0i}\right)^2}{2\sigma_i^2}\right), \qquad (3)$$

где $\frac{dW_{0i}}{dE_i}$ – плотность вероятности образования i-го продукта из источника с энергией активации $E_i > 0$;

σ_i^2 – дисперсия функции распределения.

G-модель более достоверно, чем S-модель, описывает динамику выхода продуктов пиролиза в диапазоне скоростей нагрева от 0,5 до $2\cdot10^5$ К/с. Поскольку значения E_{0i} и σ_i определяют по температурам максимумов скорости выхода i-го продукта при трех различных скоростях нагрева (метод Дойля) [6, 7], температурная зависимость максимумов скорости газовыделения при различных скоростях нагрева всегда совпадает с экспериментальной. Расчетные значения центров распределения энергий активации E_{0i} по G-модели оказываются выше, чем по S-модели, и близки к известным энергиям разрыва соответствующих связей [6]. Константы k_{0i}, E_{0i}, σ_i зависят только от энергии химической связи в каждом источнике и не должны зависеть от степени метаморфизма углей. Для разных типов и марок углей отличаются только удельные выходы W_{0i}.

Динамика выхода летучих веществ в G-модельном представлении может быть рассчитана путем подстановки (3) в (1) с последующим интегрированием по времени и по энергии активации. Однако аналитическое решение этой задачи возможно лишь при условии нагрева с постоянной скоростью, то есть линейной связи между температурой частицы T и временем τ. Для расчета динамики выхода летучих в широком диапазоне скоростей и температур нагрева в [9] была разработана методика инженерного расчета, основанная на прямоугольном разбиении Гауссова распределения источников по энергиям активации, независимом подсчете темпа нагрева с учетом тепловых эффектов испарения влаги и термического разложения угольного вещества, пошаговом подсчете выхода одного продукта из одного источника при небольшом изменении температуры на каждом шаге, и с последующим суммированием выхода за все время и по всем источникам. Для численного интегрирования Гауссово распределение разбивают на прямоугольники с участками источников ΔE, а выход продукта (i) из источника (j) записывают следующим образом:

$$W_{0ji} = dW_{0i}/dE_i|_{Eji}\cdot\Delta E, \qquad (4)$$

Тогда выход продукта из всей совокупности источников (рис.4):

$$W_{0i} = \sum_j W_{0ji}. \qquad (5)$$

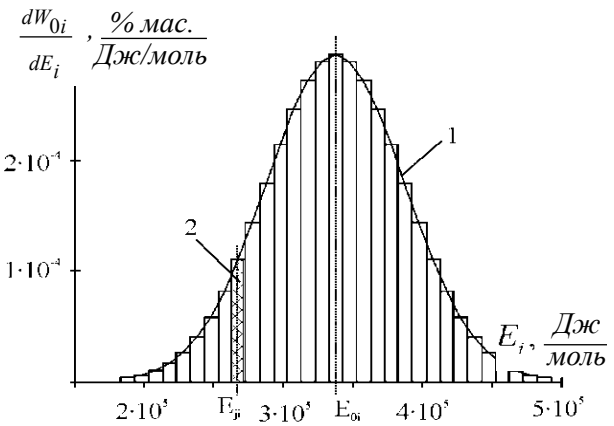

Рис.4 Расчет Гауссова распределения плотности вероятности образования водорода по энергиям активации: 1 - Гауссово распределение; 2 - выход водорода из элементарного источника W_{0ji}.

Значение предэкспоненциального множителя k0i едино для всех элементарных источников данного распределения, а каждый j-й элементарный источник характеризуется соответствующим значением E_{ji}. Тогда скорость выхода продукта (i) из элементарного источника (j):

$$dW_{ji}/d\tau = k_{0i}\cdot\exp(-E_{ji}/R\cdot T)\cdot(W_{0ji} - W_{ji}), \qquad (6)$$

где W_{ji} - количество i-го продукта из j-го элементарного источника, вышедшее к моменту τ. С учетом того, что T = T(τ) и начальных условий $W_{ji|t=0} = 0$, выражение для динамики выхода продуктов принимает вид:

$$W_{ji}(\tau) = W_{0ji}\left(1 - \exp\left(-k_{0i}\cdot\int_0^{\tau}\exp(-E_{ji}/R\cdot T(\tau))d\tau\right.\right. \qquad (7)$$

Поскольку интеграл в правой части выражения (7) не берется в явном виде, в расчете его заменяют суммой от 0 до τ по элементарным шагам Δτ таким, что изменение температуры в пределах шага невелико. Для каждого элемен-

тарного источника получают дискретную зависимость $W_{ji} = f(\tau)$. Сумма этих зависимостей по всем источникам дает общую временную зависимость $W_i = \sum_j W_{ji}$.

Для расчета темпа нагрева частиц $T(\tau)$ используют выражение

$$d\tau = \frac{m_ч\left(c_ч \cdot dT_ч \cdot \left(1 + \frac{\alpha\, d_{сл}}{10\lambda_ч}\right) + q^-\right)}{\alpha\left(T_{сл} - T_ч\right)F_ч}, \qquad (8)$$

позволяющее выполнить пошаговый расчет времени нагрева τ при малом шаге температур частиц $\Delta T_ч$. В нем учитывают эндотермический эффект сушки при T = 0…200°C q- по влажности угля и теплоте парообразования, эндотермический

эффект термической деструкции учитывают как поправку для теплоемкости угля [10], при этом экзотермический эффект образования молекул из радикальных фрагментов не учитывают, поскольку этот процесс в газовой фазе удален от частиц в пространстве, а в твердой фазе - во времени.

Применение данной методики для расчета динамики газовыделения при скоростном пиролизе в кипящем слое (темп нагрева частиц около 10^3 К/с, температура 750-950°C) и при термохимической обработке угольной пыли в газовом микрофакеле (темп нагрева частиц около 10^5 К/с, температура 900-1200°C) дал результаты, хорошо коррелирующие с экспериментальными [9, 11]. Выяснилось, что физический смысл увеличения удельных выходов продуктов с ростом температуры пиролиза и более низких, чем энергии разрыва связей, наблюдаемых значений энергий активации газовыделения заключается в вовлечении в процесс термической деструкции элементарных источников с тем большими значениями энергии активации, чем больше конечная температура нагрева. Придти к этому простому, физически обоснованному выводу стало возможным только с применением G-модельного представления о распределении элементарных источников по спектру энергий активации, что свидетельствует о его адекватности. Это дало основания применить данную методику и к расчету динамики термической деструкции угольного вещества при высокотемпературном термоударе.

ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ УГОЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТЕРМОУДАРЕ

Применительно к расчету динамики термической деструкции угольного вещества при высокотемпературном термоударе следует проанализировать влияние параметров k_{0i}, E_{0i}, σ_i на получаемые результаты и обосновать их выбор.

Основная часть углерода в исходных макромолекулах антрацита содержится в виде ароматических соединений, соединенных С-С связями дифенильного (энергия разрыва около 500 кДж/моль) или ароматического типа (энергия разрыва около 600 кДж/моль) [8]. Поэтому для термической деструкции углерода антрацита целесообразно принять среднее значение E_a = 550 кДж/моль. В исходных макромолекулах длиннопламенного угля наличествуют, кроме того, алифатические мостики между ароматическими фрагментами, с энергией разрыва до 400 кДж/моль. Это дает основание принять для угля Д более низкое значение E_a = 450 кДж/моль.

В [6] показано, что значение σ влияет главным образом на ширину температурного интервала выхода продукта термической деструкции. При σ=0 температурная зависимость выхода продукта приобретает скачкообразный характер (резкий рост при достижении температуры, соответствующей энергии активации). В [9, 11] приемлемые результаты были получены при рекомендованных в [6] значениях $\sigma = (0{,}10\ldots0{,}15)E_a$. Для антрацита и газового угля с ощутимо широким температурным диапазоном роста степени конверсии в первом приближении было принято значение σ = 70 кДж/моль.

Расчет темпа нагрева частиц по выражению (8) для случая потока с сопоставимыми расходами угля газификации и газифицирующего агента-теплоносителя дает увеличенное время нагрева по сравнению с фактическим. Здесь, строго говоря, следовало бы учесть более высокую начальную температуру теплоносителя и ее снижение по ходу выравнивания общей температуры потока, как это сделано в [11], что увеличило бы расчетный темп нагрева. С другой стороны, в (8) следовало бы ввести эндотермический тепловой эффект термического разложения ароматических соединений, что снизило бы расчетный темп нагрева. Но поскольку в литературе данные по его величине отсутствуют, а по влиянию на темп нагрева указанные эффекты

противоположны, в первом приближении можно принять, что они компенсируют друг друга, и приближенно рассчитывать динамику нагрева частиц по выражению (8). Для расчета темпа нагрева было принято два диапазона температур. В первом (конечная температура потока минус 200 К) использовался шаг 10 К, во втором – 1 К. В общей сложности расчетные зависимости $\tau(T)$ состояли примерно из 400 точек, зависимости $T(\tau)$ для последующего расчета динамики термической деструкции были построены из них путем линейного соединения точек.

У антрацита с небольшим выходом летучих веществ практически весь углерод содержится в виде, который стандартно определяется как «нелетучий остаток», поэтому выражения (3)-(7) следует относить ко всему углероду, а степень конверсии углерода X_C (в долях) определять как W/W_0, считая $W_0 \approx 1$. У длиннопламенного угля значительная часть углерода входит в состав летучих и отщепляется от исходных макромолекул при более низких энергиях активации, а, следовательно, при более низких температурах. Поэтому в первом приближении целесообразно считать, что при температурах более 1200°С углерод летучих уже вышел из частиц, и относить выражения (3)-(7) только к тому углероду, который стандартно определяется как «нелетучий остаток». В анализируемом угле марки Д доля углерода составляла 80%, выход летучих веществ 38% на сухую беззольную массу, откуда доля «нелетучего» углерода – 62%, «летучего» - 18%. Отсюда общая степень конверсии углерода (в долях):

$$X_C \approx (0{,}62X_{C(нл)} + 0{,}18)/0{,}8. \qquad (9)$$

Значение k_0 можно оценить из двух соображений. Первое – эмпирическое: оно должно быть таким, чтобы удовлетворять экспериментальному факту о завершении активной стадии термической деструкции за 0,1 с. Второе, полуэмпирическое, соображение исходит из того, что температура скачкообразного роста X_C при $\sigma = 0$ должна совпадать с серединой экспериментально установленного диапазона роста степени конверсии [6], или с температурой достижения $X_C = 0{,}5$ для антрацита, $X_{C(нл)} = 0{,}36$ для угля марки Д. Температуру $X_C = 0{,}5$ при $\sigma = 0$ можно оценить из условия

$$\tau \cdot k_0 \cdot \exp(-E_a/(R \cdot T)) = 0{,}5. \qquad (10)$$

При температурах середин экспериментально установленного диапазона роста степени конверсии 1900°С для антрацита и 1500°С для угля марки Д расчет по формуле (10) с использованием принятых величин $\sigma = 70$ кДж/моль, $E_a = 550$; 450 кДж/моль, соответственно, дает примерно одинаковые значения

$k_0 = 1 \cdot 10^{14}$. Проверка по первому критерию показала, что при $\sigma = 70$ кДж/моль действительно после 0,1 с скорость термической деструкции снижается в 10-100 раз, что позволяет рассматривать 0,1 с как длительность ее активной стадии.

Основные результаты расчета по методике, основанной на Гауссовом распределении энергии разрыва связей угольных макромолекул относительно среднего значения, близкого к энергии разрыва С-С связи в ароматических соединениях, заключаются в следующем. Температура пылевидных частиц размером до 100 мкм на уровне 98% от температуры потока после смешения и газификации достигается за 0,01-0,02 с, за остальные 0,08-0,09 с стадия активной термической деструкции углерода в основном завершается. До 1000°С для угля Д и до 1200°С для антрацита степень конверсии углерода примерно равна доле углерода, входящего в состав стандартно определяемых летучих веществ, с ростом температуры она увеличивается. Темп увеличения X_C с ростом температуры (пунктирные кривые на рис.2) для обоих углей близок к экспериментально установленным зависимостям $X_C(T)$. При 1900°С для угля Д и до 2300°С для антрацита величина X_C достигает 90%.

Данные оценки носят приближенный характер, для их уточнения следует ввести в (8) начальную температуру теплоносителя и ее снижение по ходу выравнивания температуры потока, а также тепловой эффект термического разложения ароматических структур. Но в первом приближении можно считать, что с помощью представления о термической деструкции угольных макромолекул с Гауссовым распределением энергии разрыва связи относительно средних значений, близких к энергиям разрыва С-С связи в ароматических соединениях, удалось количественно описать эффект «быстрой конверсии» углерода в условиях высокотемпературного термоудара и получить расчетные кривые $X_C(T)$, коррелирующие с экспериментальными значениями для угля марки Д и антрацита. В отличие от газификации, процесс термической деструкции не требует повышения давления для его интенсификации, не лимитируется диффузионным торможением и снижением концентрации газифицирующего

агента по мере реагирования, а увеличение X_C с ростом T связано с вовлечением в процесс термической деструкции фрагментов исходных угольных макромолекул с тем большими значениями энергии разрыва связи, чем больше конечная температура нагрева.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА «БЫСТРОЙ КОНВЕРСИИ»

По сравнению с газификацией процесс получения синтез-газа путем термической деструкции угольного вещества при высокотемпературном термоударе имеет 2 главных преимущества: его скорость не зависит от давления в реакторе, а характерное время достижения глубокой конверсии углерода меньше в десятки раз. Отсюда следует, что применение данного эффекта при создании газогенераторов позволит существенно сократить их металлоемкость, как за счет сокращения габаритов, так и за счет снижения требований к механической прочности стенок.

Обеспечение условий высокотемпературного термоудара требует «сухой» пылеподачи и сопряжено с высокими температурами отходящих продуктов. В [2] показано, что «сухая» пылеподача при атмосферном давлении не требует усложнения пылесистем, а погашать температуру потока продуктов можно, пропуская его над водяным шлакосборником. Испаренная вода будет участвовать в реакции водяного сдвига $CO+H_2O \leftrightarrow CO_2+H_2$, что даст возможность регулирования соотношения между CO и водородом в продуктах в зависимости от цели их использования.

В ИУЭ НАН Украины совместно с ГКБ «Южное» разработан технический проект газогенератора на 1-2 т антрацита в час на основе эффекта «быстрой конверсии», реализация которого станет актуальной с дальнейшим ограничением импорта в Украину углеводородных энергоносителей.

ВЫВОДЫ

Установленный в экспериментах ИУЭ НАН Украины эффект «быстрой конверсии» углерода при газификации углей разной степени метаморфизма в потоке в условиях высокотемпературного термоудара (более 90% конверсии углерода за время менее 0,1 с) не описывается с точки зрения кинетики газификации. Гипотеза о связи его природы с термической деструкцией угольных макромолекул смогла быть проверена лишь с разработкой инженерного метода расчета динамики скоростного пиролиза с помощью представления о термической деструкции угольных макромолекул с Гауссовым распределением энергии разрыва связи. Применение данного метода к составляющим основу нелетучего угольного вещества ароматическим соединениям (энергии активации разрыва связей E_a = 450-550 кДж/моль, σ = 70 кДж/моль) позволило количественно описать эффект «быстрой конверсии» и получить расчетные кривые $X_C(T)$, коррелирующие с экспериментальными значениями для угля марки Д и антрацита.

В отличие от процесса газификации, процесс термической деструкции не требует повышения давления для его интенсификации, не лимитируется диффузионным торможением и снижением концентрации газифицирующего агента за счет его исчерпания по мере реагирования, а увеличение X_C с ростом T связано только с вовлечением в процесс фрагментов исходных угольных макромолекул с тем большими значениями энергии активации разрыва связи, чем больше конечная температура нагрева. Поэтому применение эффекта «быстрой конверсии» углерода при создании газогенераторов позволит сократить их металлоемкость, как за счет сокращения габаритов, так и за счет снижения требований к механической прочности стенок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. – К.: Наукова думка, 2004. – 185 с.
2. Чернявский Н.В., Дулиенко С.Г., Кульчицкий И.В. Двухстадийная газификация пылевидного угля в потоке: результаты экспериментальных исследований // Экотехнологии и ресурсо-сбережение. - 1996. - № 5-6. - С.3-12.
3. Росколупа А.И., Чернявский Н.В. Газификация каменного угля и антрацита в высокотемпературном потоке // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2003. - №3. - С. 8-14.
4. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.04 – К.: Інститут газу НАНУ, 1999. – 35 с.
5. Chernyavskiy N. The main natural laws of high-rate coal pyrolysis // Thermal Science. - 2003. - Vol.7. - № 2. – P. 77-87.
6. Solomon P.R., Serio M.A., Suuberg E.M. Coal pyrolysis: experiments, kinetic rates and mechanisms // Prog.En.Comb.Sci. - 1992. - V.18. - P.133-220.
7. Грязнов Н.С. Пиролиз углей в процессе коксования. — М.: Металлургия, 1983. – 184 с.
8. Камнева А. И., Платонов В. В. Теоретические основы химической технологии твердых горючих ископаемых. – М.: Химия, 1990. – 288 с.
9. Бондзик Д.Л., Дулиенко С.Г., Чернявский Н.В. Метод и результаты расчета динамики газовыделения при скоростном пиролизе угля // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005. - №6. – С.3-14.
10. Merrick D. The thermal decomposition of coal: Mathematical models of the chemical and physical changes // Coal Science and Chemistry. – Elsevier: Amsterdam, 1987. – P.307-342.
11. Бондзик Д.Л., Кукота Ю.П., Чернявский Н.В. Оценка интенсивности выхода летучих в процессах ТХП антрацитовой пыли // Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития: 3 научн.-практ. конф., 14-18.09. 2006, Алушта: тез.докл. – Алушта: НПВК «ТРИАКОН», 2006. – С.5–6.