УДК 621.311

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИФФУЗИОННОЙ И КИНЕТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕРОДА ВОЛЧАНСКОГО БУРОГО УГЛЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Чернявский Н.В.[1], Осипов П.В.[2], Дулиенко С.Г.[1], Рыжков А.Ф.[2]

[1]*Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина*
[2]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Обобщены результаты экспериментальных исследований динамики выгорания Волчанского бурого угля (Северный Урал) и его коксового остатка разной зольности в кипящем слое, полученные на безградиентной импульсной установке РСК-1 и на динамической лабораторной установке «Пиролиз-М». Для разделения диффузионной и гетерогенной (кинетической) составляющих скорости горения углерода применено диффузионно-кинетическое уравнение с поправкой на массовую долю углерода в частицах. Найдены значения перегрева горящих частиц и констант скоростей гетерогенного горения при разных температурах.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение энергетических ресурсов Приполярного Урала предполагает использование углей Северо-Сосьвинских месторождений по различным направлениям [1]. Одним из способов является сжигание и газификация в кипящем (КС) и циркулирующем кипящем слое (ЦКС). Для расчета рабочих процессов в энергоустановках необходимо знание особенностей горения планируемых для сжигания углей в КС [2], в том числе характерных времен пиролиза и горения коксового остатка, а также вклада внешнедиффузионного и гетерогенного (кинетического) механизмов горения в зависимости от зольности и размеров частиц угля.

Подробное изучение свойств углей Северо-Сосьвинских месторождений затруднено ввиду отсутствия промышленной добычи, поэтому на первом этапе было решено исследовать промышленный аналог по условиям образования, залегания и химическому составу - Волчанский бурый уголь, добываемый на севере Свердловской области, который отличается от Северо-Сосьвинских главным образом повышенной зольностью [1,3]. Экспериментальное исследование включало:

- подготовку образцов углей и их коксовых остатков различной зольности;
- исследование динамики выгорания углерода на безградиентной импульсной установке РСК-1 и на динамической установке «Пиролиз-М»;
- обработку и анализ результатов с вычленением диффузионной и гетерогенной (кинетической) составляющих скорости горения углерода.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ УГЛЕЙ И ИХ КОКСОВЫХ ОСТАТКОВ РАЗЛИЧНОЙ ЗОЛЬНОСТИ

Для получения образцов с различной зольностью использовался метод разделения исходного угля с размером частиц от 0,4-0,6 до 1,6-2,5 мм и зольностью $A^d = 40,5$ % в тяжелой жидкости - четыреххлористом углероде с плотностью 1600 кг/м^3 [4], основанный на том, что плотность минеральной компоненты угля больше, чем органической. Уголь оказался легко обогащаемым. Массовая доля всплывшей (малозольной) фракции составила 47%, утонувшей (высокозольной) – 53 %. Для получения коксового остатка образцы угля вводились в реактор КС в токе инертного газа при температуре 900˚С, выдерживались 7 минут (как в стандартных условиях определения выхода летучих) и охлаждались в инертной среде, после чего повторно рассевались на узкие фракции размера. Ситовой анализ показал, что при пиролизе размер большинства частиц сохраняется, спекания частиц не наблюдалось. Кажущаяся плотность угля и коксового остатка определялась по насыпной плотности с учетом средней порозности неподвижного слоя 0,4 [2]. Характеристики образцов углей и их коксовых остатков представлены в таблице.

Образцы	Уголь			Коксовый остаток		
	A^d, %	V^d, %	ρ, кг/м^3	A^d, %	V^d, %	ρ, кг/м^3
Малозольный	10,8	40,0	1300	15,0	8,3	700
Исходный	40,5	31,9	1450	48,1	8,9	900
Высокозольный	68,0	26,7	1750	79,0	1,6	1250

ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кинетические эксперименты проводились по импульсной методике сжигания в КС на установке РСК–1 («реакционная способность коксов») [4, 5], разработанной под руководством академика НАН Украины А.Майстренко для исследования кинетики гетерогенного горения и газификации углей и коксов (рис.1). Прямоточный реактор 1 высотой 0,8 м и диаметром 0,02 м установлен в трубчатую электропечь с регулятором напряжения 2. Нижняя часть реактора заполнена инертной засыпкой 3. Навеску кокса 4 массой 0,05-1,0 г засыпают на решетку 5, при исследовании горения высокореакционных топлив ее смешивают с инертным материалом для выравнивания температуры. Температуру контролируют ХА-термопарами 6 и преобразователем 7. Сетка 8 предотвращает унос мелких частиц. Газ-инерт (аргон) подают в реактор из баллона 9, воздух - компрессором 10. Импульсную подачу воздуха в реактор осуществляют устройством дозирования и ввода 11 из шестиходового крана с дозировочной петлей объема 0,3 $м^3$. При расходе газа через реактор 1,2 л/мин. скорость потока в реакторе составляет 0,16-0,18 м/с, что примерно вдвое больше скорости начала псевдоожижения для частиц инертного материала (золы) размером 0,2-0,63 мм, в КС которого частицы коксового остатка участвуют в процессах горения и тепломассообмена. Состав продуктов определяют с помощью газоанализатора 12.

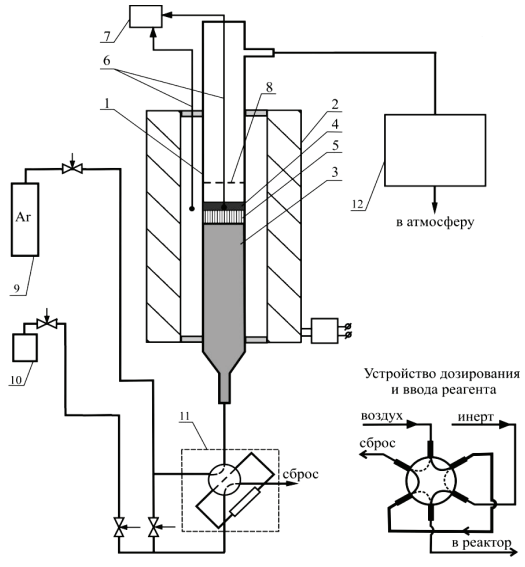

Рис.1 Установка РСК–1 для исследования горения коксов угля в КС в изотермических условиях

Эксперимент проводят таким образом. Навеску засыпают в реактор, разогретый до 350-650 °С. Псевдоожижение обеспечивает поток инертного газа. После стабилизации температуры в реактор, не нарушая непрерывности потока, с помощью шестиходового крана вводят порцию (импульс) воздуха, который прогревается, проходя сквозь засыпку. За время прохождения импульса через КС кислород воздуха взаимодействует с углеродом с незначительным (из-за краткости импульса и наличия инертного материала) повышением температуры в слое. Затем в общем потоке воздух сменяется на инертный газ. После стабилизации температуры в реактор вводят следующую порцию воздуха. Эксперимент сводится к многократному вводу импульсов воздуха и измерению состава образующихся продуктов. Когда концентрация CO и CO_2 становится меньше порога чувствительности газоанализатора, регистрируют максимальную для данной температуры степень конверсии углерода X_{max}, после чего температуру слоя повышают до 800-900°С и подают контрольный импульс воздуха. Если на выходе продукты горения не появляются, опыт считают законченным.

Основными преимуществами импульсного эксперимента в КС являются близкие к изотермическим (из-за интенсивного теплообмена в слое и малого разогрева слоя в течение импульса) условия реагирования кокса и возможность использования менее быстродействующих, но более точных газоанализаторов. Методика позволяет, отбирая пробу газа в средней части импульса на выходе реактора, анализировать его за достаточно большое время между импульсами. В данном случае использовался газоанализатор Siemens Ultramat 23, в котором CO и CO_2 измеряются в оптических ячейках (быстродействие определяется скоростью заполнения ячейки), кислород – в электролитической ячейке (быстродействие определяется скоростью отклика). Текущие показания газоанализатора фиксируются ЭВМ посекундно, что позволяет регистрировать кривые выхода продуктов. Произведения расхода газа-реагента на площади кривых равны объемам продуктов, а на максимальные значения – пропорциональны их концентрациям.

Для каждого из n импульсов газа-реагента в опытах определяют: скорость горения углерода W_C, г/с (по максимумам концентрации CO, CO_2 и расходу газа), убыль массы углерода в навеске, г (по площади выходных импульсов CO, CO_2 и расходу газа), массу прореагировавшего углерода, г (как сумму убылей массы в течение предыдущих импульсов), степень конверсии углерода X (как отношение прореагировавшей массы к начальной). Затем рассчитывают удельную скорость реакции W_m, 1/с (скорость горения углерода, отнесенная к средней для данного импульса массе непрореагировавшего углерода). По зависимости $W_m = f(X)$ (кривая конверсии) судят о характере конверсии при данной температуре.

Исследования характера горения образцов волчанского угля различной зольности и размера

частиц при температурах 780-910 ˚С, характерных для энергоустановок с КС и ЦКС, выполнялись на установке «Пиролиз-М» Института угольных энерготехнологий [6]. Принципиальная схема установки (рис.2) сходна с установкой РСК–1, однако она предназначена для непрерывной организации процесса. В силу этого ее основные отличия заключаются в следующем:

- в реактор подаются навески не коксового остатка, а угля, что позволяет исследовать стадии пиролиза и горения коксового остатка без промежуточной остановки процесса;
- система подачи газа-реагента включает воздушный компрессор и регулирующий вентиль с перепадом давления значительно большим, чем перепад давления на реакторе, системе газоочистки, расходомере и газоанализаторе;
- в качестве газоанализатора применен менее чувствительный, но более быстродействующий многоканальный магнитостатический масс-спектрометр МХ-1215, способный в непрерывном режиме определять объемные доли водорода, кислорода, CO и CO_2, метана, аргона и азота с постоянной времени измерения не более 0,5-1,0 с;
- для согласования скорости конверсии углерода с чувствительностью масс-спектрометра масса навески увеличена до 0,5-1,5 г, для выравнивания температуры в течение эксперимента ее массовое отношение к инертному материалу слоя составляет 1:30 – 1:100.

При исследовании быстротекущих процессов важное значение имеет учет искажений газотранспортного запаздывания, происходящего в основном в линии очистки и транспорта газа, и размытия, происходящего преимущественно за счет перемешивания в реакторе. Для их определения перед началом экспериментов в нагретый реактор с установившимся расходом воздуха подавался короткий меточный импульс CO_2. По разнице между моментами подачи и максимума регистрируемого импульса определяли характерное время запаздывания (~ 4 с), по полуширине импульса отклика – время размытия (~ 2 с). В дальнейшем время запаздывания учитывали при синхронизации регистрируемых компьютером АЦП-сигналов температуры слоя и газового анализа, время размытия – при определении характерного времени наиболее короткой стадии окислительного пиролиза угля.

Первичная обработка результатов выполняется так же, как на установке РСК-1, с тем отличием, что расчет скорости горения углерода W_m производится по текущим сигналам регистрации (каждые 1,0-1,5 с) CO_2, CO и CH_4. Шагом убыли массы считается шаг между сигналами, а степень конверсии углерода определяется по начальному содержанию углерода в навеске с учетом зольности, влаги и элементного состава угля.

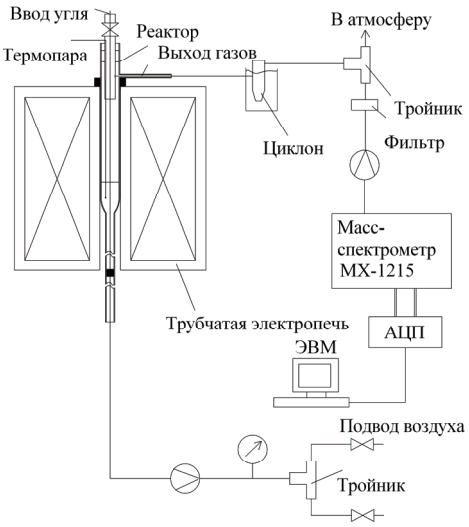

Рис.2 Установка «Пиролиз-М» для исследования пиролиза угля и горения коксов в КС в динамических условиях

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные в экспериментах на установке РСК-1 зависимости $W_m = f(X)$ при 430-490˚С [4] представлены на рис.3. Они показывают, что в диапазоне температур 430-490 ˚С удельная скорость горения кокса Волчанского бурого угля на порядок и более превосходит установленную в работах [5, 6] для кокса Днепровского бурого угля с исходной зольностью около 40 %. Кроме того, форма кривых конверсии в [5] характеризовалась квазистационарными участками в диапазоне X_C = 0,1-0,4. Здесь же подобный характер конверсии наблюдается только для кокса исходного угля; удельная скорость горения углерода малозольных образцов возрастает, высокозольных – убывает по ходу конверсии. Для объяснения этих тенденций следует количественно учесть влияние таких побочных факторов, как перегрев горящих частиц по сравнению с измеряемой температурой слоя и внешнедиффузионное торможение. Попытка учесть перегрев по методике расчета, рекомендованной в [2] для более высоких температур, привела к нереалистичным значениям – более 100 К, причем по ходу конверсии расчетный перегрев возрастал до 150-180 К.

Поэтому было принято решение провести исследования на установке «Пиролиз-М» в области

температур 800-950 °С, где, как установлено в [6], горение бурых углей в КС происходит в переходной области реагирования, близкой к внешнедиффузионной.

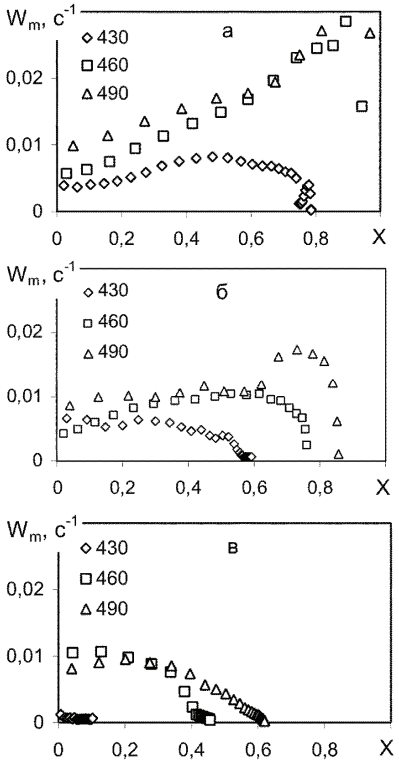

Рис.3 Зависимость удельной скорости горения на текущую массу углерода от степени конверсии. Фракции: а – малозольная, б - исходная, в – высокозольная

На рис.4 показана характерная динамика изменения состава газа по ходу эксперимента при начальной температуре слоя 820 ˚С. Хорошо видны пики водорода, CO и CH_4, соответствующие стадии окислительного пиролиза. С учетом времени

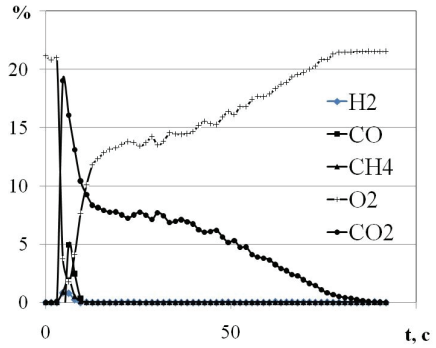

Рис.4 Динамика изменения состава газа при выгорании малозольного Волчанского угля с размером частиц 1-1,6 мм

газотранспортного размытия, характерное время этой стадии в опытах определено в диапазоне 4-6 с, что хорошо согласуется с данными [6], полученными при сжигании в КС дискретных навесок Днепровского бурого угля. Характерное время стадии выгорания коксового остатка оказалось близким к полученному в КС для газовых углей [7], что говорит о лимитирующей роли внешнедиффузионных ограничений скорости горения, общих для высокореакционных углей.

На рис.5 показана динамика скорости горения

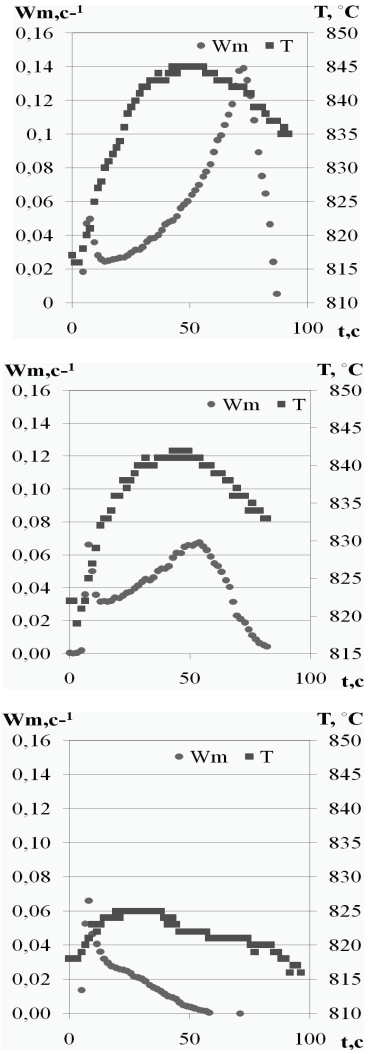

Рис.5 Динамика удельной скорости горения и температуры КС при выгорании навесок Волчанского бурого угля. Сверху вниз: малозольный, исходный, высокозольный

углерода W_m и температуры КС (Т) при начальной температуре слоя 820 ˚С, расходе воздуха $110 \cdot 10^{-6}$ $нм^3/с$, массах навесок 0,5 г для образцов различной зольности с размером частиц 1,0-1,6 мм. На рис.6 те же данные приведены в виде кривых конверсии углерода $W_m = f(X)$. Видна тенденция увеличения

W_m по ходу конверсии, которая не совпадает с динамикой температуры слоя. Причина этого явления также сводится к лимитирующему влиянию внешнедиффузионных ограничений.

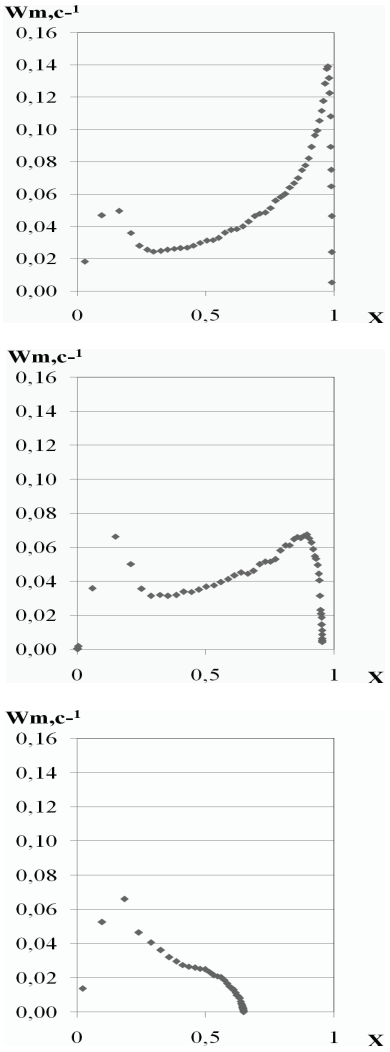

Рис.6 Кривые конверсии при выгорании в КС с начальной температурой 820 ˚С навесок Волчанского угля. Сверху вниз: малозольный, исходный, высокозольный

Для оценки вклада внешнедиффузионной и кинетической составляющих скорости горения было использовано известное выражение [8]

$$K_S^{O2} = C_0/(1/k + 1/\alpha_Д), \qquad (1)$$

полученное путем решения системы уравнений:

$$K_S^{O2} = k \cdot C_S,$$
$$K_S^{O2} = \alpha_Д \cdot (C_0 - C_S), \qquad (2)$$

где C_0, C_S – концентрация кислорода в объеме и у поверхности частицы, кг/м^3, $\alpha_Д$ – коэффициент диффузионного газообмена, м/с; k – константа скорости гетерогенной реакции, м/с. С использованием определяемых в эксперименте величин, уравнение (1) можно записать в виде:

$$W_m /(\beta \cdot S_{уд}) = C_0/(1/k + 1/\alpha_Д), \qquad (3)$$

где β – стехиометрический коэффициент, $S_{уд}$ – удельная контурная поверхность частицы, м^2/кг.

Однако следует учесть, что система уравнений (2) справедлива для чисто углеродной частицы. Для частицы с реальной зольностью, на поверхность которой выходит не только углерод, но и зола, значение C_S по внешней поверхности частицы будет меняться в зависимости от контакта газа-реагента с углеродной или золовой поверхностью. Целесообразно считать C_S средней поверхностной концентрацией кислорода, и к средней же поверхности частицы отнести величину k.

Тогда нужно учесть и то, что в выражении, вытекающем из (1, 3)

$$W_m = K_S^{O2} \cdot \beta \cdot S_{уд}, \qquad (4)$$

размерность левой части – (кг углерода / с) на кг углерода, а правой - (кг углерода / с) на кг частицы (так определяется удельная поверхность частиц из выражения $S_{уд} = 6/(\rho \cdot d)$, где ρ - плотность частицы, кг/м^3, d – диаметр частицы, м [5]). Для совпадения размерностей и физического смысла обеих частей выражения (3, 4) их левую часть следует домножить на величину C_C, кг углерода на кг частицы, т.е. на массовую долю углерода в частице:

$$W_m \cdot C_C/(\beta \cdot S_{уд}) = C_0/(1/k + 1/\alpha_Д) \qquad (5)$$

Аналогичную поправку следует внести и в уравнение стационарного перегрева горящей частицы по сравнению с температурой КС [2]:

$$\Delta t \cdot (\alpha_{con} + \alpha_{rad}) = Q \cdot W_m \cdot C_C/S_{уд}, \qquad (6)$$

где Δt – перегрев частицы угля относительно слоя инертных частиц, К, α_{con}, α_{rad} – коэффициенты кондуктивно-конвективного и лучистого теплообмена, Вт/(м^2·К), Q – тепловой эффект реакции, Дж/кг. После таких преобразований значения C_C и $S_{уд}$ можно использовать как начальные, так и текущие (по ходу конверсии).

При дальнейшей обработке данных, с целью разделения составляющих скорости горения, расчет внешнедиффузионной $W_{диф}$ и гетерогенной $W_{кин}$ составляющих выполнялся по выражениям:

$$1/W_{кин} = 1/W_m - 1/W_{диф},$$
$$W_{диф} = \beta \cdot (S_{уд}/C_C) \cdot C_0 \cdot Sh \cdot D/d, \qquad (7)$$

где Sh – критерий Шервуда для КС, рассчитанный по [9, 10], D – коэффициент диффузии, м^2/с, рассчитанный по [2], температура принималась средней между измеренной температурой КС и рассчитанной температурой горящих частиц.

Кроме того, учитывалось, что малозольные частицы преимущественно реагируют с сохранением плотности и уменьшением диаметра:

$$d = d_0 \cdot (1 - X \cdot (1 - A^d))^{1/3}, \quad (8)$$

а средне- и высокозольные, с развитым золовым каркасом, - преимущественно с сохранением размера и уменьшением плотности [6]:

$$\rho_{к.о.}(X) = \rho_{0к.о.} \cdot (1 - X \cdot (1 - A^d)). \quad (9)$$

На рис.7 показаны зависимости W_m и $W_{диф}$ от степени конверсии для малозольных частиц размером 1,6-2,5 мм при стартовой температуре КС 910 ˚С. Их совпадение в широком диапазоне конверсии показывает корректность расчета диффузионной составляющей и ее лимитирующее влияние на скорость горения. Оказывается, что для малозольных частиц рост W_m по ходу конверсии связан с увеличением внешней поверхности за счет уменьшения диаметра частиц (для высокозольных – за счет уменьшения их плотности).

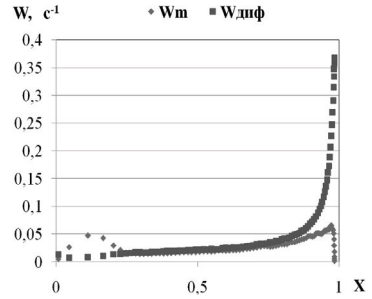

Рис.7 Зависимости удельной скорости W_m и ее внутридиффузионной составляющей $W_{диф}$ от степени конверсии

На рис.8 показаны зависимости $W_m = f(X)$, $W_{диф} = f(X)$ и рассчитанной по выражению (7) величины $W_{кин} = f(X)$ для частиц Волчанского угля различной зольности размером 1,0-1,6 мм при стартовой температуре КС 820 ˚С. Здесь скорость реагирования меньше внешнедиффузионной составляющей, что позволяет достоверно оценить величину $W_{кин}$. Совокупность полученных данных показывает уменьшение лимитирующего влияния внешней диффузии с уменьшением размера частиц, снижением температуры горения, увеличением зольности.

Анализ рис.8 снимает противоречие между полученными результатами и данными [5] по форме кривых конверсии. Действительно, расчетная зависимость $W_{кин} = f(X)$ также носит квазистационарный характер в широком диапазоне конверсии для исходного угля с зольностью 40,5 %.

Дело в том, что в [5] принято представление удельной скорости горения при пренебрежимом влиянии внешней диффузии в виде

$$W_{кин} = C_0 \cdot \beta \cdot S_{уд} \cdot k, \quad (10)$$

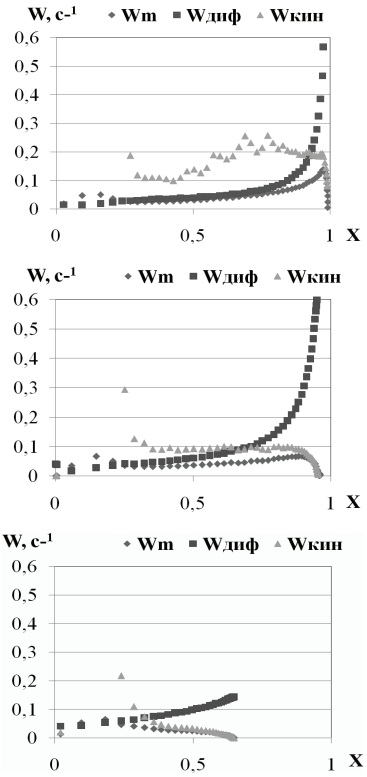

Рис.8 Зависимость составляющих удельной скорости реагирования от степени конверсии при $T_{0кс}$ = 820 ˚С. Сверху вниз: образцы малозольный, исходный, высокозольный

где величина $S_{уд}$ рассчитывается по начальным параметрам коксовой частицы и считается по ходу конверсии постоянной. Но из предыдущих выкладок следует, что

$$W_{кин} = C_0 \cdot \beta \cdot S_{уд} \cdot k / C_C, \quad (11)$$

причем по ходу конверсии величина $S_{уд}$ растет, а C_C снижается, что должно бы привести к росту кривой $W_{кин} = f(X)$, если k = const. Так и происходит для малозольного Волчанского угля в широком диапазоне конверсии. Однако в [11] на основании экспериментальных исследований обосновано, что углерод в угле находится в различных видах – чистого угольного вещества, углеминеральных и минералоугольных сростков, причем в перечисленном ряду его реакционная способность снижается. Если скорость реагирования чистого угольного вещества, дающего основной вклад в наблюдаемую скорость горения, относить ко всему углероду, то по ходу конверсии, когда доля непрореагировавшего чистого угольного вещества снижается и становится соизмеримой с менее реакционным угольным веществом сростков, величина k начинает уменьшаться, что уменьшает и $W_{кин}$ при больших степенях конверсии. Доля же сростков с

ростом зольности увеличивается, а доля чистого угольного вещества уменьшается. Поэтому с ростом зольности снижаются начальные (после завершения стадии пиролиза) уровни k и $W_{кин}$ и предельно достигаемая в опытах степень конверсии углерода, а темп снижения k по ходу конверсии увеличивается. При некоторой средней зольности темп снижения k в средней области конверсии становится равным темпу роста величины $S_{уд}/C_C$, что приводит к квазистационарному характеру

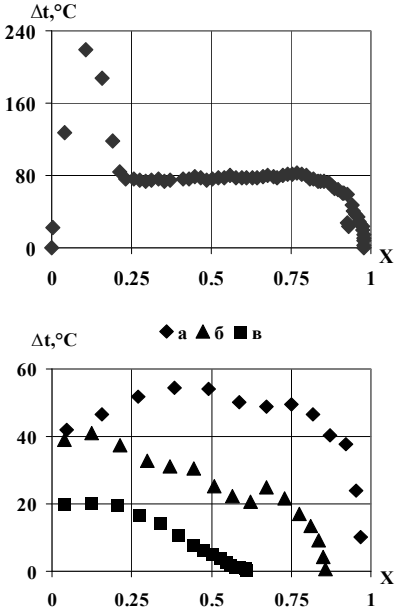

Рис.9 Динамика перегрева горящих частиц: вверху – $T_{0кс}$ = 910 °С, малозольный уголь 1,6-2,5 мм; внизу - $T_{0кс}$ = 910 °С, кокс 1,0-1,6 мм, а - малозольный, б – исходный, в - высокозольный

кривых конверсии, наблюдавшемуся в [5].

Интересно сопоставить рассчитанный по выражению (6) перегрев горящих частиц при высоких и низких температурах КС. На рис.9 видно, что кроме стадии окислительного пиролиза, его величина для малозольных частиц соизмерима, она совпадает с приведенными в [2] экспериментальными данными, а с повышением зольности и величины X перегрев снижается.

Применение выражений (7-9, 11) для обработки результатов, полученных на установке РСК-1, показывает, что при температурах КС 430-490 °С скорость горения углерода лимитируется скоростью гетерогенного реагирования, т.е. режим реагирования близок к кинетическому (внутридиффузионному [5]). На рис.10 видно, что зависимость k = f(X) для малозольных коксов носит колоколообразный характер, а для высокозольных – спадающий, причем характер кривых k = f(X)

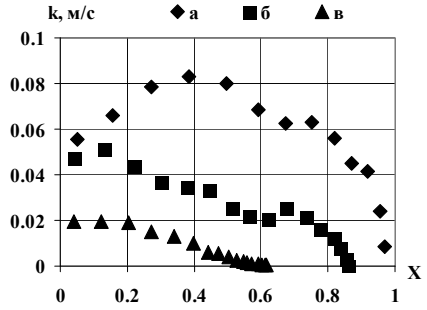

Рис.10 Зависимость k = f(X) при температуре КС 490 °С, кокс 1,0-1,6 мм: а - малозольный, б – исходный, в - высокозольный

повторяет характер кривых перегрева.

Таким образом, введение поправки C_C и учет снижения величины k по ходу конверсии позволили согласовать между собой данные известных исследований динамики и кинетики реагирования углей и их коксов в широком диапазоне температур КС и степени конверсии.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов подтверждают корректность предложенного учета доли углерода в частице Сс для расчета диффузионной и кинетической составляющих скорости горения в широком диапазоне зольности угля, температур КС и степени конверсии.. Учет той же величины при расчете перегрева горящих частиц приводит к реалистичным, близким к данным известных экспериментов значениям в десятки градусов.

Установленные закономерности и полученные численные значения кинетической и диффузионной составляющих скорости горения углерода Волчанского бурого угля целесообразно учесть при расчете энергоустановок с КС и ЦКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетик. – 2009 - №8 – С. 16-19.
2. Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справ. – Л. : Химия, 1986 – 352 с.
3. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / В.С.Вдовченко, М.И.Мартынова, Н.В.Новицкий, Г.Д.Юшина.– М.: Энергоатомиздат, 1991 .- 184 с.
4. Осипов П.В., Чернявский Н.В. Наблюдаемая

кинетика горения бурых углей Северного Урала различной зольности // Современная наука: Сб. научн. статей. – 2010. – №1(3). – С. 39–43.

5. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. – Київ, 1999. – 35 с.
6. Дулиенко С.Г., Косячков А.В., Чернявский Н.В. Динамика конверсии днепровского бурого угля в кипящем слое // Экотехнологии и ресурсосбережение. – №5. – 2005. – С.3-12.
7. Топал О.І. Кінетика і динаміка вигоряння високозольного енергетичного вугілля в киплячому шарі під тиском: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Київ, 2000. – 19 с.
8. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М.:Энергия, 1976.– 488 с.
9. Бородуля В.А., Пальченок Г.И., Васильев Г.Г. Проблемы тепло- и массобмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива // Мат. Междунар. школы-семинара. – Минск, 1988, ч.2. - С.3-33.
10. Мунц В.А. Закономерности горения топлив и образования оксидов азота в топках кипящего и циркуляционного кипящего слоя: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. - Екатеринбург, 1999. - 47 с.
11. Чернявский Н.В., Майстренко А.Ю., Голенко И.Л. Характер выгорания коксов энергетических углей различной зольности в кипящем слое // Энерготехнологии и ресурсосбережение. - 2009. - №3. - С.4-11.