УДК 621.311

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Чернявский Н.В.[1], Голенко И.Л.[1], Осипов П.В.[2]

[1] *Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев, Украина*
[2] *Кафедра тепловых электрических станций УрФУ, Екатеринбург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Известные выражения для расчета удельной скорости горения частиц коксовых остатков углей хорошо описывают горение углеродных частиц, однако приводят к существенным неточностям в случае горения коксозольных частиц. В данной работе сделана попытка учесть в этих расчетах влияние как исходной зольности, так и ее возрастания по ходу конверсии углерода.

ВВЕДЕНИЕ

Для расчета процессов термической переработки твердого топлива в энергоустановках важное значение имеет достоверное описание скорости горения коксового остатка. Принято считать, что при различной температуре характер горения пористых частиц коксового остатка зависит от соотношения между скоростями диффузии окислителя из объема к внешней поверхности частиц, или свободной диффузии, диффузии окислителя в порах, или кнудсеновской (возрастают с температурой по степенному закону), и скорости гетерогенного реагирования единицы поверхности углерода (возрастает с температурой по экспоненциальному закону). В зависимости от того, какая из этих скоростей является лимитирующей для процесса горения частицы в целом, различают области реагирования внутрикинетическую (реагирование происходит на всей поверхности частиц, включая внутреннюю), внутридиффузионную (с ростом температуры увеличение скорости гетерогенного реагирования опережает увеличение скорости диффузии в порах, и реагирование вытесняется к внешней поверхности), и внешнедиффузионную (скорость горения определяется скоростью свободной диффузии кислорода к внешней поверхности частицы) [1, 2]. Горение коксового остатка низкореакционного антрацита в потоке и кипящем слое происходит в области реагирования переходной между внутри- и внешнедиффузионной [3].

УЧЕТ ЗОЛЬНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВНЕШНЕДИФФУЗИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ КОКСОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Для переходной области гетерогенное реагирование часто считают происходящим с внешней поверхности частиц, а для оценки вклада внешнедиффузионной и гетерогенной составляющих скорости горения углеродных частиц используют известное выражение для скорости реагирования кислорода K_S^{O2}, кг/(м^2·с) [3]

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

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 гетерогенного горения, м/с.

В экспериментальных исследованиях, как правило, измеряют удельную на текущую массу углерода скорость горения (скорость конверсии, убыли массы углерода) W_m, кг/(кг·с) или с$^{-1}$. С использованием W_m уравнение (1) можно записать в виде:

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

где β – стехиометрический коэффициент пересчета убыли массы кислорода в убыль массы углерода, $S_{уд} = 6/(\rho_ч \cdot d_ч)$ – удельная внешняя, или контурная, поверхность частицы, м^2/кг, $\rho_ч$ - плотность частицы, $d_ч$ – ее диаметр.

Если внешнедиффузионные ограничения пренебрежимы, то (3) приобретает вид

$$W_{кин} = \beta \cdot S_{уд} \cdot C_0 \cdot k, \qquad (4)$$

а константа скорости внешнего гетерогенного горения подчиняется аррениусовской зависимости

$$k = k_0 \cdot \exp(-E_a/(RT)), \qquad (5)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, E_a – энергия активации, Дж/моль, R = 8,315 Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная, T – температура, К.

Наоборот, если внешнедиффузионная составляющая является лимитирующей (при высокой температуре и/или большом размере частиц), то (3) приобретает вид

$$W_{диф} = \beta \cdot S_{уд} \cdot C_0 \cdot \alpha_Д, \qquad (6)$$

где $\alpha_Д$ = Sh·D/d, Sh – критерий Шервуда, D – коэффициент диффузии, $м^2/с$, d – диаметр частицы (эквивалентного шара), м.

Для кипящего слоя (КС) выражение (6), а также полученное на его основе выражение для стационарного перегрева горящих частиц относительно слоя инертных частиц

$$\Delta t \cdot (\alpha_{con} + \alpha_{rad}) = Q \cdot W_m / S_{уд}, \qquad (7)$$

где α_{con}, α_{rad} – коэффициенты кондуктивно-конвективного и лучистого теплообмена, $Вт/(м^2 \cdot К)$, Q – тепловой эффект реакции, Дж/кг, хорошо описывают горение углеродных шариков в узком диапазоне степени конверсии углерода [4]. Однако в случае высокозольных частиц и/или высокой степени конверсии углерода наблюдаются существенные расхождения между расчетными и экспериментальными значениями. В частности, расчет дает перегрев горящих частиц в сотни градусов, чего в эксперименте не наблюдается.

В [5, 6] обосновано, что система уравнений (2) справедлива только 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. Поэтому целесообразно считать C_S средней поверхностной концентрацией кислорода, и к средней же поверхности частицы относить величину k.

Тогда нужно учесть и то, что в выражениях (5, 6) размерность левой части – (кг углерода / с) на кг углерода, а правой - (кг углерода / с) на кг частицы. Для совпадения размерностей и физического смысла обеих частей выражений (5, 6) их правые части следует разделить на величину C_C, кг углерода на кг частицы, т.е. на массовую долю углерода в частице:

$$W_{кин} = \beta \cdot S_{уд} \cdot C_0 \cdot k / C_C, \qquad (8)$$

$$W_{диф} = \beta \cdot S_{уд} \cdot C_0 \cdot \alpha_Д / C_C. \qquad (9)$$

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

$$\Delta t \cdot (\alpha_{con} + \alpha_{rad}) = Q \cdot W_m \cdot C_C / S_{уд}. \qquad (10)$$

После таких преобразований значения C_C и $S_{уд}$ можно использовать как начальные, так и текущие (по ходу конверсии).

Экспериментальная проверка справедливости данных выкладок для внешнедиффузионной области была выполнена на лабораторной установке «Пиролиз-М» (рис.1), подробно описанной в [5, 6], с Волчанским бурым углем (Северный Урал), разделенных в тяжелой жидкости на образцы с зольностью 11, 41 и 68%, в переходной области реагирования. В частности, глубоко внешнедиффузионный режим горения был реализован для малозольных частиц размером 1,6-2,5 мм при стартовой температуре КС инертного материала 910 ˚С.

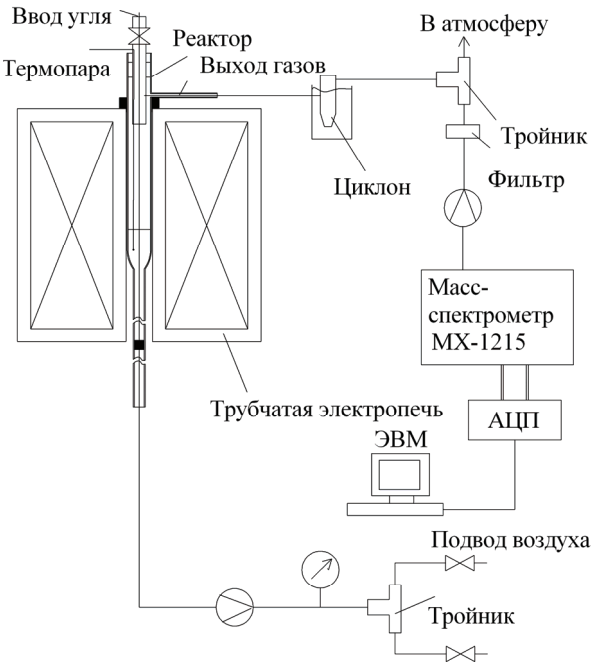

Рис.1 Установка «Пиролиз-М» для исследования пиролиза угля и горения коксов в КС в динамических условиях

В эксперименте скорость и степень конверсии углерода определялись по данным масс-спектрометрического газового анализа (по расходу углеродсодержащих газов на выходе реактора). При обработке данных использовалось выражение для критерия Шервуда из [7, 8]:

$$Sh = \frac{\delta}{\delta_i}\left[2{,}78 \cdot Re_k^{0{,}33} \cdot \left(\frac{\delta_i}{\delta}\right)^{0{,}67} + 0{,}45 \cdot Re_k^{0{,}56} \cdot \left\{1 - \left(\frac{\delta_i}{\delta}\right)^{0{,}67}\right\}\right] \cdot Sc^{0{,}33}$$

Температура принималась средней между измеренной температурой КС и рассчитанной температурой горящих частиц. Кроме того, учитывалось, что малозольные частицы с ростом степени конверсии X преимущественно реагируют с сохранением плотности и уменьшением диаметра:

$$d = d_0 \cdot (1 - X \cdot (1 - A^d_0))^{1/3}, \qquad (11)$$

а средне- и высокозольные, с развитым золовым каркасом, - преимущественно с сохранением размера и уменьшением плотности [9]:

$$\rho_{к.о.}(X) = \rho_{0к.о.} \cdot (1 - X \cdot (1 - A^d_0)). \qquad (12)$$

На рис.2 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

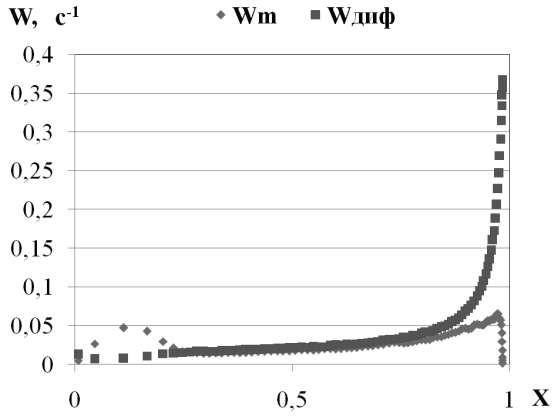

Рис.2 Зависимости удельной скорости W_m и ее внутридиффузионной составляющей $W_{диф}$ от степени конверсии: $T_{0кс}$ = 910 °С, малозольный уголь 1,6-2,5 мм

диффузионной составляющей и ее лимитирующее влияние на скорость горения. Оказывается, что для малозольных частиц темп роста $W_{диф}$ по ходу конверсии является большим, чем темп увеличения внешней поверхности за счет уменьшения диаметра частиц (для высокозольных – за счет уменьшения их плотности), из-за снижения величины C_C по ходу конверсии. На рис.3 видно, что, кроме стадии окислительного пиролиза, величина перегрева для малозольных частиц составляет 70-90 К, что совпадает с приведенными в [4] экспериментальными данными, а с повышением зольности и величины X перегрев снижается.

При одинаковых температуре и размере частиц выражение (9) приводит к росту величины $W_{диф}$ с ростом зольности, однако фактически при этом величина W_m не возрастала; это означает снижение внешнедиффузионных ограничений. При более низких температурах и меньших размерах частиц, когда внешнедиффузионные ограничения еще

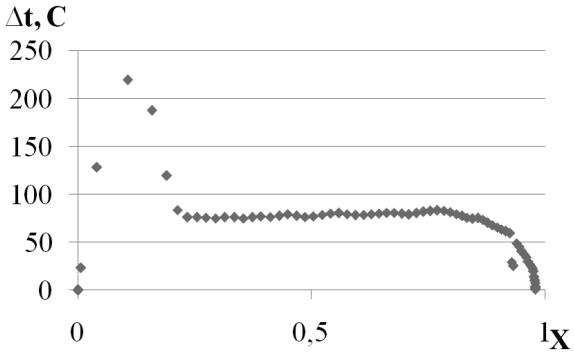

Рис.3 Динамика перегрева горящих частиц: $T_{0кс}$ = 910 °С, малозольный уголь 1,6-2,5 мм

менее выражены, из выражения (3) рассчитывалась внутридиффузионная составляющая скорости горения $W_{кин}$. Для образцов с малой и средней зольностью ее спад по ходу конверсии начинался после X = 0,8-0,9, для высокозольных – сразу после завершения стадии пиролиза.

УЧЕТ ЗОЛЬНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВНУТРИДИФФУЗИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ КОКСОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

Характер горения коксов украинских энергетических углей в кипящем слое во внутрикинетической и внутридиффузионной областях реагирования подробно исследовал А.Майстренко [10]. Он установил, в частности, что во внутридиффузионной области зависимость W_m от степени конверсии дискретной порции углерода кокса X носит квазистационарный характер в диапазоне X от 0,1 до 0,4-0,5. Измеряя на этих участках величину $W_{кин}$ для различных температур, используя выражения вида (4, 5) и принимая $S_{уд}$ для начального состояния коксовых частиц, он нашел для коксов высокозольного антрацита значения k_0 = 8900 м/с, E_a=122 кДж/моль (для сравнения: во внутрикинетической области E_a=229 кДж/моль).

Пригодность выражений (4, 5) и установленных в [10] значений k_0 и E_a для расчета скорости горения антрацита во внутридиффузионной области подтверждена во многих независимых исследованиях. Тем не менее, ряд вопросов до сих пор оставался открытым. Во-первых, из вида этих выражений не следует зависимость удельной скорости горения углерода от зольности угля, на самом же деле она снижается с ростом зольности. Во-вторых, для коксов антрацита в [11] подтверждена обратно пропорциональная зависимость W_m от размера частиц, которая следует из (4) и выражения для $S_{уд}$. Однако применение выражения для $S_{уд}$ к одному и тому же образцу

должно привести к росту W_m по ходу конверсии за счет уменьшения либо $\rho_ч$ (высокозольные антрациты с прочным минеральным каркасом), либо $d_ч$ (малозольные антрациты), чего не происходит, по крайней мере, на квазистационарных участках конверсии.

Иной подход к описанию внутридиффузионного реагирования пористых частиц развит в работах Д.Франк-Каменецкого, Г.Борескова, А.Розовского и других исследователей гетерогенно-каталитических реакций. В [12] приведено стационарное решение так называемой внутренней задачи диффузионной кинетики (убыль газообразного реагента по глубине поры за счет диффузионного торможения и химического реагирования) в виде

$$W_m = \beta \cdot S_\Sigma \cdot C_0 \cdot (k \cdot D_{кн} \cdot r_п)^{1/2} / (1{,}4 \cdot L_п), \qquad (13)$$

где S_Σ – полная, включая внутреннюю, удельная поверхность частицы, $м^2/кг$, k – константа скорости гетерогенной реакции во внутрикинетической области, м/с, $D_{кн} = 0{,}67 \cdot r_п \cdot (8 \cdot RT/(\pi M))^{1/2}$ – коэффициент кнудсеновской диффузии, $м^2/с$, M – молекулярная масса газообразного реагента, $r_п$ – средний радиус пор, $L_п$ – средняя длина пор, м. Под кнудсеновской здесь понимают диффузию в капилляре с диаметром меньшим, чем длина свободного пробега молекул газа.

С учетом того, что температурная зависимость коэффициента диффузии значительно слабее, чем константы скорости, выражение (13) хорошо объясняет причину снижения эффективного значения E_a почти вдвое при переходе из внутрикинетической во внутридиффузионную область реагирования. С учетом того, что в [12] длина модельной поры принимается равной половине диаметра частицы, из (13) следует простое объяснение установленной в [11] обратно пропорциональной зависимости W_m от исходного размера частиц. В [13] теоретически решена нестационарная задача и показано, что для коксов микропористых углей, к которым относится и антрацит, разработка пор должна происходить преимущественно в устьях вблизи внешней поверхности частиц. Однако применение выражения (13) для описания изменения скорости реагирования по ходу конверсии до сих пор было затруднено отсутствием результатов прямых измерений изменения величины S_Σ по ходу конверсии углерода и соотношения поверхностей углеродных и минеральных пор в реальных коксовых частицах с различной начальной зольностью.

Такое исследование было проведено в работе [14]. В частности, для антрацита, разделенного в тяжелой жидкости на образцы с разной зольностью, были измерены поверхность и объем пор по адсорбции водяного пара. На рис.4 видно, что обе эти величины снижаются с ростом зольности. Для поверхности, в частности, эта тенденция выражена зависимостью:

$$S_{H2O} = S_{H2O(орг)} \cdot (1 - A^d/100) + S_{H2O(мин)} \cdot A^d/100, \quad (14)$$

где A^d – зольность на сухую массу, %; $S_{H2O(орг)} = 190 \cdot 10^3$ $м^2/кг$, $S_{H2O(мин)} = 5 \cdot 10^3$ $м^2/кг$ – удельная поверхность микропор органической части антрацита. Микропорами, куда при определении внутренней поверхности проникает водяной пар, считают поры с диаметром менее $2 \cdot 10^{-9}$ м.

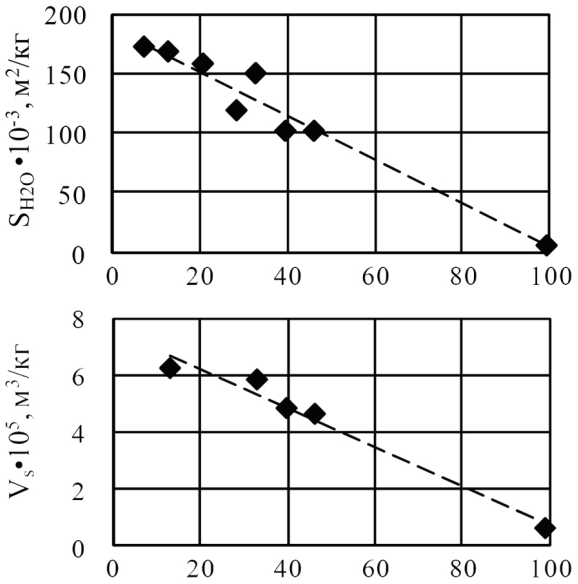

Рис.4 Зависимость поверхности (вверху) и объема микропор (внизу) донецкого антрацита от зольности A^d, %

Отношение объема ($7{,}5 \cdot 10^{-5}$ $м^3/кг$) к поверхности пор при «нулевой» зольности дает характерный диаметр пор органической части антрацита $1{,}6 \cdot 10^{-9}$ м. Это подтверждает, что пористая структура органической части антрацита представлена в основном микропорами.

Пористая структура коксового остатка в основном подобна исходному антрациту, однако после пиролиза она сокращается за счет закупорки микропор смолами, а затем постепенно восстанавливается, хотя линейные аппроксимации S_{H2O} и V_S стремятся к нулю при зольности меньшей, чем в исходных образцах. Причиной этого может быть сокращение микропор в результате их закупорки смолами либо карбонизации угольного вещества с его частичной графитизацией. Средний диаметр микропор при этом практически не изменяется. Его величина подтверждает, что диффузия в порах антрацита действительно является кнудсеновской. Действительно, для кислорода при атмосферном давлении длина свободного пробега примерно равна $0{,}26 \cdot 10^{-9} \cdot T$, м, или $2{,}42 \cdot 10^{-7}$ м при 933 К, что

более чем в 100 раз превосходит средний диаметр пор антрацита.

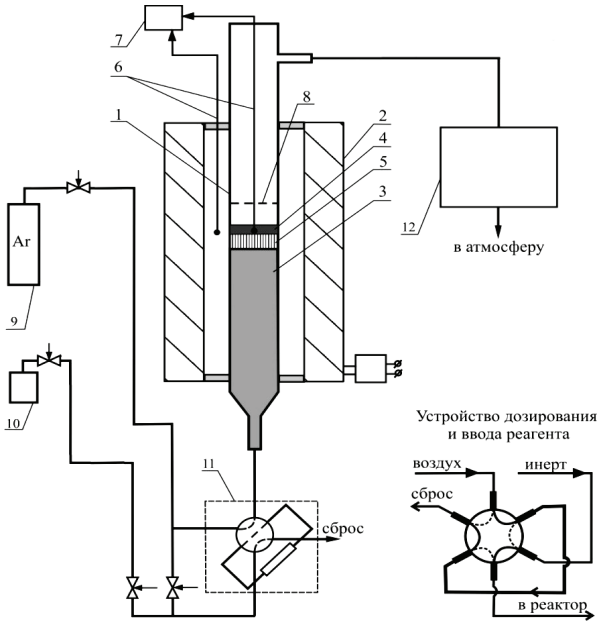

Рис.5 Установка РСК–1 для исследования горения коксов угля в КС в изтермических условиях

Кинетические эксперименты проводились по импульсной методике сжигания в КС на установке РСК–1 («реакционная способность коксов») [5, 6, 9-11], разработанной под руководством академика НАН Украины А.Майстренко для исследования кинетики гетерогенного горения и газификации углей и коксов (рис.5). Смысл методики заключается в подаче в КС импульсов воздуха длительностью в несколько десятков секунд, за время которых КС коксозольных частиц разогревается менее чем на 5 К, а скорость горения определяют с помощью хроматографического газоанализатора. Между имульсами КС ожижается инертным газом с тем же расходом.

На рис.6 показаны кривые конверсии, которые, как и в [10, 11], носят квазистационарный характер в диапазоне X от 0,1 до 0,4-0,5, и изменение поверхности микропор по ходу конверсии антрацита различной зольности. Наличие этих данных позволяет использовать для их анализа выражение (13). Однако для этого следует обосновать ряд исходных допущений.

Первое соображение касается радиуса и длины пор. Если считать, что при внутридиффузионном горении коксовой частицы разработка пор происходит в основном в устьях вблизи внешней поверхности углеродных зерен [10, 13], то разумно допустить, что по ходу конверсии радиус микропор $r_п$ остается приблизительно постоянным. С другой стороны, при реагировании вблизи внешней поверхности углеродных зерен уменьшается их объем, а следовательно, и характерная длина пор $L_п$ по сравнению с начальной $L_{п(0)}$:

$$L_п = L_{п(0)} \cdot (1 - X)^{1/3} \qquad (15)$$

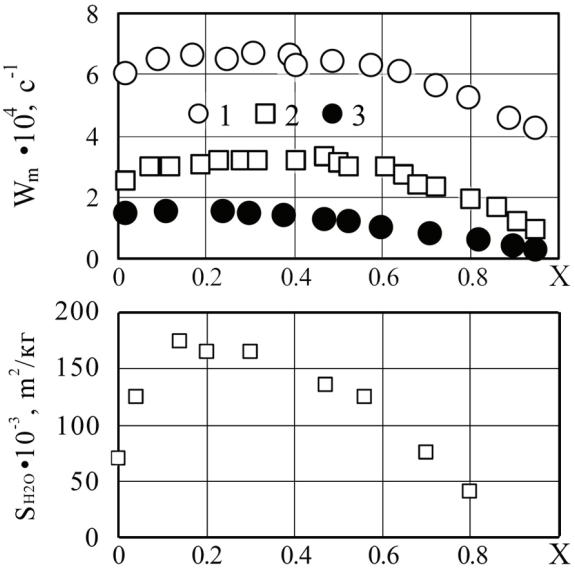

Рис.6 Кривые конверсии коксов антрацита различной зольности (1 – 4,3%, 2 – 32,8%, 3 – 44,2%) (вверху) и удельная поверхность по водяному пару коксового остатка антрацита с A^d = 32,8% (внизу) при выгорании в КС при температуре слоя 933 К

Далее, поскольку процессы кнудсеновской диффузии и гетерогенного реагирования совместно протекают только в углеродных зернах, разумно принять, что для коксозольных частиц в выражении (13) должна фигурировать не удельная поверхность всей частицы $S_Σ$, а удельная поверхность углерода $S_C \approx S_Σ/C_C$. Соответственно, начальная длина пор $L_{п(0)}$ должна определяться не всем начальным объемом коксовой частицы, а долей, которую в нем занимает углеродная часть. Эта доля равна

$$(V_{орг}/V)_0=(\rho_{мин}\cdot(1-A^d_0/100))/((\rho_{орг}\cdot A^d_0/100+ +\rho_{мин}\cdot(1-A^d_0/100)), \qquad (16)$$

где $\rho_{мин}$ = 2200 кг/м^3, $\rho_{орг}$ = 1800 кг/м^3 – кажущиеся плотности минеральной и органической части антрацита [14], A^d_0 – начальная зольность коксовой частицы. По сравнению с длиной пор исходной чисто углеродной частицы $L_{п(0, C)}$, равной $d_{ч(0)}/2$:

$$L_п = L_{п(0, C)} \cdot ((1 - X) \cdot (V_{орг}/V)_0)^{1/3}. \qquad (17)$$

Таким образом, с учетом принятых допущений выражение (13) приобретает вид

$$W_m = \beta \cdot S_Σ \cdot C_0 \cdot (k \cdot D_{кн} \cdot r_п)^{1/2}/(C_C \cdot 1{,}4 \cdot L_п), \quad (18)$$

которое объясняет квазистационарные участки конверсии тем, что при $X \leq 0{,}5$ величина $L_п$ снижается менее чем на 20%, а $S_\Sigma/C_C \approx S_C \approx \text{const}$.

На рис.7 сопоставлены нормированные по максимальным значениям зависимости S_Σ и S_C от степени конверсии углерода X кокса антрацита с исходной зольностью 32,8%, полученные путем прямого измерения S_{H2O} (см. рис.6) и рассчитанные из W_m по выражению (18). Сопоставление показывает, что:

- рассчитанные с использованием выражения (18) значения полной и углеродной удельной поверхности пор по ходу конверсии близки к результатам прямого измерения по водяному пару, что подтверждает правильность принятых допущений;
- величина S_C при $X \leq 0{,}5$ изменяется слабо, а снижение величины S_Σ по ходу конверсии является более значительным, что связано со снижением доли углерода в частицах по ходу конверсии.

Снижение величины S_C при $X \geq 0{,}5$ наиболее вероятно связано с отмеченным в [14] существованием различных видов углерода в коксовых частицах. По ходу конверсии скорее расходуется более реакционноспособная часть углерода, обладающая более развитой микропористой структурой, и остаток углерода по ходу конверсии характеризуется все меньшей удельной скоростью горения и все меньшей поверхностью микропор. В [14] высказано предположение, что менее реакционноспособный углерод содержится в углеминеральных сростках, и его доля должна возрастать с повышением зольности образца. Это предположение подтверждается снижением удельной скорости горения с ростом зольности; целесообразно было бы его проверить экспериментально путем определения поверхности микропор образцов с разной исходной зольностью по ходу конверсии.

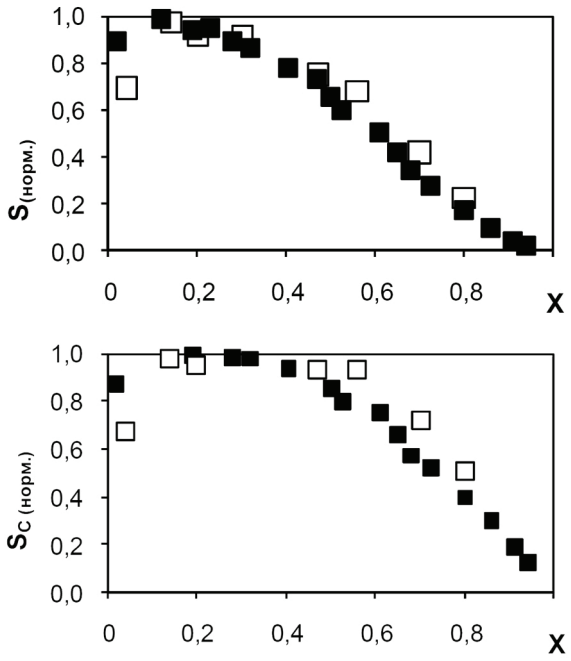

Рис.7 Сопоставление нормированных величин S_Σ (вверху) и S_C (внизу), полученных путем прямого измерения (прозрачные точки) и рассчитанных по выражению (18) (сплошные точки), по ходу конверсии углерода кокса с A^d_0= 34,9%.

ВЫВОДЫ

Сопоставление выражений (8), (9), (10), (18) с результатами экспериментальных исследований показывает продуктивность предложенного подхода к расчету удельной скорости горения угольных частиц в переходной области с учетом доли углерода в частице C_C. В выражении (9) для $W_{диф}$ снижение величины C_C с ростом зольности исходного угля и/или по ходу конверсии является дополнительным фактором возрастания внешнедиффузионной составляющей, следовательно, снижения внешнедиффузионных ограничений скорости горения. В выражении (18) снижение величины C_C с ростом зольности исходного угля и/или по ходу конверсии компенсирует снижение удельной поверхности микропор, происходящее вследствие убыли микропористого углерода в частице, по крайней мере на квазистационарном участке конверсии. По сути, выражение (18) является другой, более физичной, формой записи выражения (8). Форма записи (18) позволяет представлять константу скорости гетерогенного горения постоянной в отношении к текущей общей поверхности углерода, а не в условном отношении к начальной внешней поверхности частицы. В то же время выражения (9) и (18) позволяют вынести C_C в общий знаменатель выражения (3), что упрощает расчет скорости горения и перегрева горящих частиц в переходной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laurendeau N.M. Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion // Prog. En. Comb. Sci. – 1978. – Vol. 4. – P. 221–270.
2. Основы практической теории горения. Под.

ред. Померанцева В.В. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 308 с.

3. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М.:Энергия, 1976.– 488 с.
4. Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справ. – Л. : Химия, 1986 – 352 с.
5. Чернявский Н.В., Осипов П.В., Дулиенко С.Г. Воздушная конверсия бурого угля в условиях кипящего слоя // В кн.: Газогенераторные технологии в энергетике / Под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: ООО Изд-во «Сократ», типография ООО «ИРА УТК», 2010. - С. 502-523.
6. Идентификация диффузионной и кинетической составляющих скорости горения углерода Волчанского бурого угля в кипящем слое / Чернявский Н.В., Осипов П.В., Дулиенко С.Г., Рыжков А.Ф. // Современная наука: Сб. научн. статей. – НПВК «Триакон», 2010.– №3(5). – 7 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Топал О.І. Кінетика і динаміка вигоряння високозольного енергетичного вугілля в киплячому шарі під тиском: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Київ, 2000. – 19 с.
12. Панченков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и катализ: Учеб. для вузов. – М.: Химия, 1985. – 592 с.
13. Оренбах М.С. Реакционная поверхность при гетерогенном горении. – Новосибирск: Наука, 1973. – 200 с.
14. 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.