

3. **Ивашов С. Н., Фисенко А. И.** Оптические и излучательные характеристики вольфрама при высоких температурах // ИФЖ.— 1989.— 57, № 1.— С. 131—134.
4. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Статистическая физика.— М.: Наука, 1976.
5. **Излучательные свойства твердых материалов/Под ред. А. Е. Шейдлина.**— М.: Энергия, 1974.
6. **Прудников А. П. и др.** Интегралы и ряды.— М.: Наука, 1981.

г. Одесса

Поступила в редакцию 11/X 1990,  
после доработки — 30/VII 1991

УДК 536.46 : 533.6

*И. В. Деревич, И. А. Крестова*

## РАСЧЕТ ГАЗИФИКАЦИИ КОКСОВ ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ УГЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СЛУЧАЙНО-ПОРИСТЫХ СРЕД

Разработана математическая модель динамики пористой структуры коксов высокозольных углей с учетом первоначальной неравнодоступности внутреннего объема газовому реагенту. В модели учитывается увеличение площади пористой структуры в результате уноса органической массы, коалесценция пор и раскрытие внутренних объемов образца по ходу конверсии. При рассмотрении процессов тепло- и массопереноса внутри частицы принимаются во внимание тепловый эффект реакции, а также диффузионные сопротивления в минеральном компоненте и слое продуктов реакции, уменьшающих проходное сечение транспортных пор. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными по газификации антрацитового штыба в углекислом газе.

Газификация угля — один из важнейших этапов переработки твердого топлива в энерготехнологических установках [1]. Для сравнительно невысоких температур (800—1400 К) химические процессы протекают во внутрикинетическом режиме, когда газовый реагент заполняет весь объем угольных частиц. В этом случае необходим учет влияния пористой структуры угля на его реакционную способность [2]. В литературе существует несколько типов моделей, позволяющих связать структуру внутренней поверхности частицы со скоростью наблюдаемых химических превращений. Модель сжимающегося угольного ядра [3—6] используется для описания реакционного газообмена зольных углей и сланцев. Она позволяет учесть снижение скорости конверсии в результате увеличения диффузионного сопротивления в зольном слое и применяется для обработки экспериментальных данных по горению высокозольных топлив, например [4]. Однако она не объясняет наблюдающееся на практике увеличение скорости конверсии при малых степенях конверсии. Кроме того, результаты измерений пористой поверхности угля [2] не могут быть описаны в рамках даже более общей модели, включающей группу угольных ядер в единой зольной оболочке частицы [7].

В [8] предложена модель реагирования пористых сред с газообразным реагентом. Пористая структура представляется в виде системы случайно расположенных цилиндрических пор. В результате учета изменения порозности кокса по ходу конверсии обнаружено, что скорость конверсии  $W$  достигает максимального значения в области конверсии  $X = 0,4 \div 0,6$  и уменьшается до нуля при  $X = 1$ . Однако величина и положение максимума скорости конверсии не соответствуют большинству имеющихся экспериментальных данных по газификации угля [9].

Для описания реальной зависимости скорости конверсии от степени конверсии необходимо изучение динамики пористой структуры коксов. В [10] предложено уравнение для функции плотности вероятности распределения пор по радиусам, учитывающее увеличение пористой поверхности в результате химической реакции, а также последующее уменьшение реакционной поверхности вследствие коалесценции пор. Построена замкнутая система уравнений для первых и вторых моментов, представляющих среднее число пор, среднюю пористую поверхность на единицу

объема и средний диаметр пор. Решение находится численным интегрированием. Для замыкания системы необходимо определить 8 констант, значения которых зависят от типа выбранного кокса. Отметим, что для однозначного выбора требуется обширная эмпирическая информация. Математическая модель горения угольной частицы, поры которой представляются в виде сфер, разработана в [11]. Здесь также учитывается рост пор и их дальнейшее слияние по мере выгорания.

В [12, 13] предложена модель пористого «дерева». Уравнение, описывающее рост и коалесценцию пор, по виду аналогично кинетическому уравнению в теории коагуляции и решается методом последовательных приближений. В результате находится связь между реакционной способностью коксов различной природы и динамикой пористой структуры.

На основе теории случайных процессов в [14] разработана простая модель изменения пористой структуры в результате газификации, которая позволяет описать рост и коалесценцию случайно расположенных в твердом теле капилляров, причем динамика пористой структуры контролируется двумя средними параметрами: числом капилляров и площадью пор на единицу поверхности. Полученная зависимость  $W(X)$  имеет максимум, величина и положение которого определяются выше перечисленными параметрами. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными по газификации коксов малозольных твердых топлив. В [15, 16] предложена методика расчета изменения внутривористой поверхности вследствие химической реакции. Учет эффекта коалесценции пор в уравнении для функции распределения плотности вероятности цилиндрических капилляров по радиусам проводится на основе приближения Аврамя [17]. Структурный параметр, описывающий специфику динамики внутренней поверхности, связывает общую длину пор и площадь первоначальной пористой поверхности в единице объема. Отметим, что результаты работ [14, 15], полученные принципиально различными путями, согласуются между собой и применимы для расчета структурных изменений коксов малозольных углей, внутренняя поверхность которых равнодоступна газообразному реагенту.

В связи с увеличением минерального компонента в коксах высокозольных углей во внутреннем объеме коксовых частиц наблюдаются области, первоначально не доступные реагенту и раскрывающиеся в процессе конверсии [2]. В настоящей работе методика учета изменения пористых структур [14—16] обобщена с целью описания динамики внутренней поверхности высокозольных коксов. Проведено сравнение результатов расчета газификации антрацитового штыба в атмосфере углекислого газа с экспериментальными данными [18].

### Уравнения динамики пористой структуры

Пористую структуру коксовой частицы моделируем случайной системой цилиндрических, пересекающихся друг с другом капилляров, равномерно и изотропно распределенных по объему образца. Предполагаем, что во внутреннем объеме имеются первоначально закрытые для реагента поры, т. е. внутренний объем образца неравнодоступен газовому реагенту. По мере увеличения степени конверсии происходит раскрытие закрытых областей. Для описания изменения внутренней поверхности в процессе газификации используем математический аппарат марковских процессов. Рассмотрим цилиндрическую поверхность радиуса  $r$ . Вероятность того, что на единице длины этой поверхности отсутствуют пересечения с другими порами, уменьшается по мере увеличения радиуса  $r$ , согласно уравнению [19]:

$$\frac{dp_0}{dr} = -\pi r^2 f(r, V, t) p_0, \quad p_0(0) = 1. \quad (1)$$

Здесь  $f(r, V, t)$  — функция плотности вероятности распределения откры-

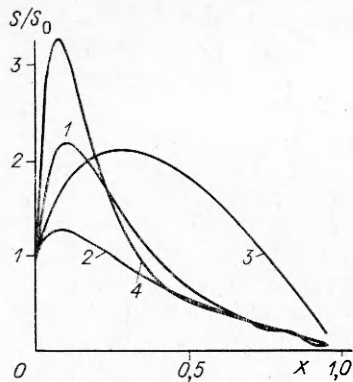


Рис. 1. Влияние постоянной структуры на динамику изменения пористой поверхности по ходу конверсии.

1 —  $\Psi = 200$ ,  $\gamma = 6$ ; 2 —  $\Psi = 100$ ,  $\gamma = 6$ ; 3 —  $\Psi = 30$ ,  $\gamma = 1,5$ ; 4 —  $\Psi = 300$ ,  $\gamma = 10$ .

тых пор по радиусам, нормированная таким образом, что  $f(r, V, t)dr$  представляет суммарную длину цилиндрической поверхности в единице объема тех пор, радиус которых лежит в интервале  $[r, r + dr]$ . В случае неравнодоступной поверхности распределение открытых пор зависит от наблюдаемой порозности образца  $V = 1 - p_0$ . Считаем, что вероятность пор радиуса  $r$  оказаться в области недоступности для газового реагента не зависит от ее поперечного размера. В этом случае функции плотности вероятности равнодоступного  $f'(r, t)$  и неравнодоступного образцов подобны, а соотношение между ними может быть предложено в виде

$$f(r, V, t) = (1 - V)^{\gamma-1} f'(r, t). \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует уравнение для наблюдаемой порозности образца

$$dV = (1 - V)^{\gamma} dV', \quad dV' = 4\pi r^2 f'(r) dr. \quad (3)$$

При  $\gamma = 1$  (равнодоступная реакционная поверхность) выражение (3) совпадает с приближением Авраами [15, 17], а решение уравнения (1)  $V = 1 - \exp(-V')$ , представляющее порозность кокса, соответствует результатам [14]. Из (3), используя предположения работы [15], находим систему уравнений для расчета наблюдаемой реакционной поверхности  $S$  и объема пор  $V$  на единицу объема образца

$$\frac{dV}{dt} = qS, \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = 2\pi q L_0 \frac{(1 - V)^{\gamma}}{(1 - V_0)^{\gamma}} - \gamma q \frac{S^2}{(1 - V)}, \quad (5)$$

где  $L_0$  — суммарная длина пор на единицу объема;  $V_0$  — начальное значение пористости органической массы образца;  $q = dr/dt = k_s C_s / \rho_c$  — скорость увеличения размера пор в результате гетерогенной химической реакции;  $k_s$  — константа скорости химической реакции;  $C_s$  — массовая концентрация реагента на поверхности реакционных пор;  $\rho_c$  — плотность органического компонента кокса.

Пренебрегая изменением наружной поверхности частицы по сравнению с изменением пористой поверхности образца, определяем степень конверсии:

$$X = 1 - \frac{1 - V}{1 - V_0}.$$

Из уравнений (4) и (5) вытекает соотношение, описывающее изменение внутренней пористой поверхности в зависимости от степени конверсии

$$\frac{S}{S_0} = (1 - X) \left\{ 1 + \frac{\Psi}{\gamma - 1} (1 - X)^{\gamma-1} [1 - (1 - X)^{\gamma-1}] \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

где  $S_0$  — начальное значение пористой поверхности на единицу объема;  $\Psi = 4\pi L_0 (1 - V_0) S_0^2$  — структурный параметр. При  $\gamma = 1$  формула (6) совпадает с результатами [14, 15]:

$$\frac{S}{S_0} = (1 - X) [1 - \Psi \ln(1 - X)]^{1/2}.$$

Из рис. 1 видно, что на кривой  $S(X)$  наблюдается максимум, связанный с увеличением размера пор по мере конверсии. В дальнейшем в результате коалесценции пор уменьшается площадь пористой поверхности. Величина и положение максимума зависят от значений параметров  $\Psi$  и  $\gamma$ . Увеличение параметра  $\Psi$  приводит к возрастанию максимального значения пористой поверхности, рост параметра  $\gamma$  смещает координату максимума в область меньших значений конверсии.

#### Уравнения тепло- и массопереноса реагента в пористой частице

Скорость гетерогенной химической реакции, проходящей на активированных центрах пористой поверхности, зависит от температуры частицы и от концентрации реагента на поверхности. В коксах высокозольных углей минеральный компонент менее микропористый, чем органическая часть, препятствует диффузии газообразного реагента к реакционной поверхности. Кроме того, в результате химической реакции транспортные поры в минеральном компоненте могут забиваться продуктами реакции газификации [18], что резко снижает интенсивность диффузии реагента внутри частицы. Этот эффект описывается как рост слоя продукта вдоль реакционной поверхности в результате реакции [20, 21].

Из равенства потоков газообразного реагента через внешний диффузионный слой вне частицы, через зольную поверхность внутри частицы, через образующийся слой продукта и скорости изменения массы реагента на реакционной поверхности имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} 4\pi R_p^2 k_D (C_\infty - C_0) &= D_a \frac{4}{3} \pi R_p^3 S_a \frac{C_0 - C_c}{\Delta_a} = \\ &= D_p \frac{4}{3} \pi R_p^3 S_p \frac{C_a - C_S}{\Delta_p} = f k_S C_S \frac{4}{3} \pi R_p^3 S, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $R_p$  — радиус частицы;  $k_D = \text{Sh } D_\infty / 2R_p$  — коэффициент массопереноса, зависящий от скорости натекания реагента на частицу;  $\text{Sh}$  — число Шервуда;  $D_\infty$  — коэффициент молекулярной диффузии реагента вне частицы;  $D_a, D_p$  — коэффициенты молекулярной диффузии реагента в минеральном компоненте и слое продукта;  $S_a, S_p$  — площади поверхности минерального компонента и слоя продукта на единицу объема образца кокса;  $\Delta_a$  и  $\Delta_p$  — характерные толщины первоначального слоя минерального компонента и образующегося слоя;  $f$  — отношение стехиометрических коэффициентов реакции;  $C_\infty, C_0, C_a$  — массовые концентрации реагента вне частицы, на поверхности частицы и на поверхности минерального компонента внутри частицы. Из равенств (7) определяем концентрацию газового реагента на органической поверхности кокса

$$C_S = C_{cs} \left[ 1 + \frac{f k_S R_p S}{3 k_D} + \frac{f k_S S \Delta_a}{S_a D_a} + \frac{f k_S S \Delta_p}{S_p D_p} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Увеличение толщины слоя продукта реакции газификации, препятствующего проникновению газообразного реагента к реакционной поверхности, описывается уравнением

$$\frac{d\Delta_p}{dt} = Zq, \quad (9)$$

где  $Z$  — числовой параметр.

Из уравнений (4), (5), (9) находим связь между эффективной толщиной образующегося слоя и степенью конверсии

$$\begin{aligned} \Delta_p &= \frac{Z(1 - V_0)}{S_0(\gamma - 1)} \ln \left\{ \frac{2 + \frac{\Psi}{\gamma - 1} Y + 2 \left[ 1 + \frac{\Psi}{\gamma - 1} Y(1 - Y) \right]^{1/2}}{Y \left( 4 + \frac{\Psi}{\gamma - 1} \right)} \right\} = \\ &= \frac{Z(1 - V_0)}{S_0(\gamma - 1)} \varphi(Y), \quad Y = (1 - X)^{\gamma - 1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Продукты реакции газификации, уменьшающие проходное сечение транспортных пор, изменяют порозность образца по ходу конверсии [21]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - X(Z - 1)(1 - \varepsilon_0), \quad (11)$$

где  $\varepsilon_0$  — первоначальная порозность образца кокса. Коэффициент диффузии газообразного реагента в объеме зависит от порозности частицы [22]

$$D_a = D_\infty \varepsilon^2. \quad (12)$$

Зольность образца  $A_d$  может быть связана с толщиной и удельной поверхностью минерального компонента

$$S_a \Delta_a = A_d.$$

Скорость конверсии кокса (уменьшение органической массы) рассчитывается по формуле

$$\frac{dX}{dt} = W = \frac{C_S}{\rho_C} k_S S_0 \left( \frac{S}{S_0} \right) = W_0 \left( \frac{S}{S_0} \right) \frac{C_S}{C_\infty}, \quad W_0 = \frac{C_\infty}{\rho_C} k_S S_0, \quad (13)$$

$$\frac{C_S}{C_\infty} = \left\{ 1 + f \frac{\rho_C}{C_\infty} \frac{W_0 R_p}{3k_D} \left( \frac{S}{S_0} \right) + f \frac{\rho_C}{C_\infty} \frac{W_0 A_d}{D_a S_a^2} \left( \frac{S}{S_0} \right) + f \frac{\rho_C}{C_\infty} \frac{W_0 \Phi}{w \varepsilon^2} \right\}^{-1}, \quad (14)$$

где  $w = S_0^2 (\gamma - 1) D_p / [Z(1 - \varepsilon_0) \varepsilon_0^3]$ ,  $w^{-1}$  — время диффузии реагента в слое продуктов реакции. При записи выражения (14) предполагается, что  $S_p \approx S$ . Формула (14) учитывает диффузионное сопротивление в пограничном слое вне частицы, в зольной оболочке и в объеме продуктов реакции. Константу скорости гетерогенной химической реакции задаем в аррениусовом виде

$$W_0 = A_0 \exp(-E_0/RT_p),$$

где  $E_0$  — энергия активации, Дж/моль;  $A_0$  — частотный фактор, 1/с;  $T_p$  — температура частицы.

Реакции газификации водяным паром, двуокисью углерода эндотермические с тепловым эффектом  $H$ . Вследствие теплового сопротивления в пограничном слое вне частицы температура частицы отлична от температуры газифицирующего агента. Так как времена тепловой релаксации частицы диаметром  $\sim 10^2 - 10^3$  мкм значительно меньше характерных времен процесса газификации, то температуру частицы можно рассчитывать в квазистационарном приближении

$$T_p = T_g - \frac{2}{3} \frac{\rho_C}{\mu_C} H \frac{R_p^2 W}{\lambda_g \text{Nu}}, \quad (15)$$

где  $\mu_C$  — молекулярный вес органического компонента;  $\lambda_g$  — коэффициент теплопроводности газовой среды вне частицы;  $\text{Nu}$  — число Нуссельта, зависящее от скорости обтекания частицы  $v_g$ .

### Результаты расчетов

В качестве примера рассматривается процесс газификации углекислым газом антрацитового штыба. Проводится сравнение с экспериментальными данными из [18]. Предполагается, что внутренняя реакционная поверхность кокса пропорциональна пористой поверхности, определенной по адсорбции воды. На рис. 2 показано сравнение расчетных (6) и экспериментальных данных по изменению внутренней поверхности в зависимости от степени конверсии. Учитывается, что с увеличением температуры предварительного пиролиза  $T_p$  исходного угля снижается площадь внутренней поверхности по воде. Изменение полной поверхности находится с учетом зольности

$$S_{\text{H}_2\text{O}} = S_{\text{H}_2\text{O}}^0 [A_d + (1 - A_d)(S/S_0)],$$

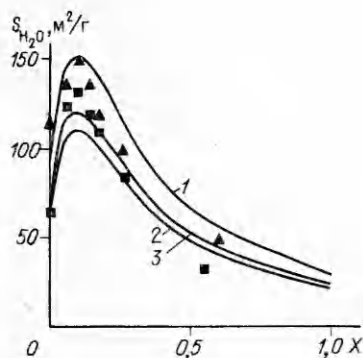


Рис. 2. Изменение внутренней поверхности антрацитового штыба по ходу конверсии (точки — экспериментальные данные, кривые — расчет).

$T_p$ , К: 1 — 1123, 2 — 1373, 3 — 1300.

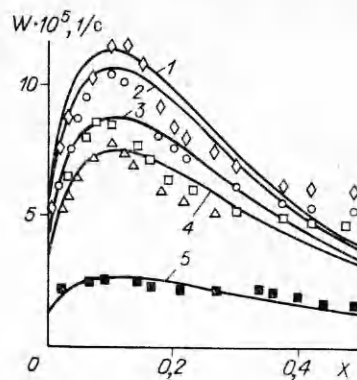


Рис. 3. Влияние температур пиролиза и газификации и размера частиц на скорость конверсии (точки — экспериментальные данные, кривые — расчет).

$T_p$ , К: 1 — 3 — 1373, 4, 5 — 1123;  $T_g$ , К: 1 — 3 — 1273, 4, 5 — 1223;  $R_p$ , мм: 1 — 0,2 — 0,3, 2 — 0,5 — 0,8, 3 — 1,5 — 2, 4, 5 — 0,2 — 0,3.

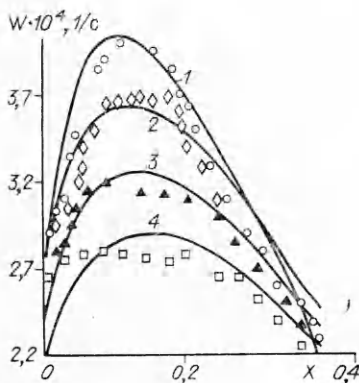


Рис. 4. Влияние скорости потока на интенсивность газификации (точки — экспериментальные данные, кривые — расчет);  $T_p = 1423$  К,  $T_g = 1373$  К,  $R_p = 1,5$  — 2 мм.

$v_g$ , м/с: 1 — 1, 2 — 0,4, 3 — 0,2, 4 — 0,1.

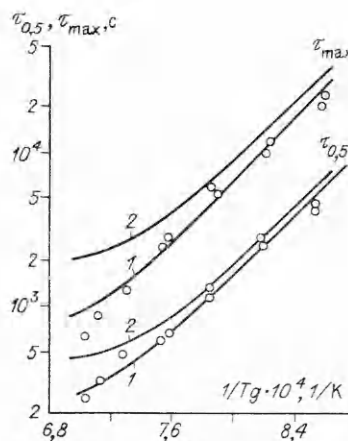


Рис. 5. Зависимость времени газификации до заданной степени конверсии от температуры процесса (точки — экспериментальные данные, кривые — расчет,  $\tau_{\max}$  — время достижения максимальной скорости конверсии,  $\tau_{0,5}$  — время достижения половинной конверсии,  $T_p = 1370$  К).

1 —  $R_p = 0,2 \div 0,3$  мм,  $v_g = 1$  м/с; 2 —  $R_p = 2$  мм,  $v_g = 0,4$  м/с.

где  $A_d$  — зольность образца;  $S_{H_2O}^0$  — удельная поверхность после пиролиза,  $m^2/g$ .

Расчет реакционной способности кокса проводится по формулам (10) — (15) при условии, что поверхность минерального компонента в частице пропорциональна внешней поверхности частицы  $S_d = 2\alpha_a/R_p$ . Расчеты проведены при следующих значениях параметров:  $E_0 = 229 \cdot 10^3$  Дж/моль,  $A_0 = 1,3 \cdot 10^5$   $1/c$ ,  $\epsilon_0 = V_0 = 0,07$ ,  $\rho_c = 1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $A_d = 0,3$ ,  $H = 171 \cdot 10^3$  Дж/моль [23],  $Z = 1,05$ ,  $w = 1$   $1/c$ ,  $\alpha_a = 5$ . Значения постоянных пористой структуры в дальнейшем не меняются.

Рис. 3 иллюстрирует влияние температур газификации  $T_g$  и пиролиза, а также размера частиц на скорость конверсии ( $v_g = 1$  м/с). Зависимость  $W(X)$  при различных скоростях газового потока показана на рис. 4. Видно, что с уменьшением скорости газового реагента лимитирующим фактором на начальной стадии конверсии является внешнее диффузионное сопротивление в пограничном слое вне частицы. С увели-

чением  $X$ , вследствие уменьшения реакционной поверхности, скорость конверсии лимитируется химической кинетикой. Из сравнения рис. 3 и 4 следует, что с увеличением температуры газифицирующего агента, растет диффузионное сопротивление в слое продукта, а это приводит к снижению величины  $W$  при  $X > 0,3$ .

Путем численного интегрирования уравнения (13) найдена длительность газификации  $\tau$  антрацита до заданной степени конверсии. Сравнение с экспериментальными данными показано на рис. 5.

### Заключение

В работе предложена математическая модель газификации коксов высокозольных углей. При описании динамики пористой структуры учитываются процесс роста пор в результате уноса органической массы, коалесценция пор, а также раскрытие тех внутренних областей коксов, которые первоначально недоступны для газообразного реагента. В процессе конверсии органической массы кокса возможно уменьшение проходного сечения транспортных пор в результате осаждения на стенках пор продуктов реакции газификации. Этот процесс рассматривается в предложенной модели наряду с диффузионным сопротивлением при прохождении реагента через внешний пограничный слой и слой минерального компонента коксов. С целью корректного описания влияния скорости обтекания частиц на интенсивность конверсии в расчетах принимаются во внимание тепловой эффект реакции и эффект теплового сопротивления внешнего пограничного поля на поверхности частицы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллинг Г. Д., Тоони Б., Краус У. Газификация угля.— М.: Недра, 1986.
2. Оренбах М. С. Реакционная поверхность при гетерогенном горении.— Новосибирск: Наука, 1973.
3. Laurendeau N. M. Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion // *Progr. Energy Comb. Sci.*— 1978.— N 4.— P. 221.
4. Balarsch K. I., Swaney G. P., Stiller A. H. A mathematical model for heterogeneous reactions with a moving boundary // *AIChE J.*— 1989.— 35, N 4.— P. 25.
5. Shekely J., Evans W. E. A structural model for gas — solid reactions with a moving boundary // *Chem. Eng. Sci.*— 1970.— 25.— P. 1091.
6. Оге А. А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей.— М.: Энергия, 1977.
7. Jensen G. A. The kinetic of gasification of carbon contained in coal minerals of atmospheric pressure // *Ind. Eng. Chem. Process Dev. Des.*— 1985.— 14, N 3.— P. 308.
8. Petersen E. E. Reaction of porous solids // *AIChE J.*— 1957.— N 3.— P. 443.
9. Su J. L., Perlmutter D. D. Effect of pore structure on char oxidation kinetics // *Ibid.*— 1985.— 31, N 6.— P. 973.
10. Hashimoto K., Silveston P. L. Gasification: Pt I. Isothermal, kinetic control model for a solid with a pore size distribution. Pt II. Extension to diffusion control // *Ibid.*— 1973.— 19, N 2.— P. 259.
11. Beshty B. S. A mathematical model for the combustion of porous carbon particle // *Combust. Flame.*— 1978.— N 32.— P. 295.
12. Simons G. A., Finson M. L. The structure of coal char: Pt I. Pore branching. Pt II. Pore combinations // *Comb. Sci. Technol.*— 1979.— N 19.— P. 217.
13. Simons G. A. Char gasification: Pt I. Transport Model. Pt II. Oxidation results // *Ibid.*— 1979.— N 20.— P. 107.
14. Cavalas G. R. A random capillary model with application to char gasification at chemically controlled rates // *AIChE J.*— 1980.— 26, N 4.— P. 577.
15. Bhatia S. K., Perlmutter D. D. A random pore model for fluid — solid reactions: 1. Isothermal kinetic control // *Ibid.*— 1980.— 26.— P. 379.
16. Bhatia S. K., Perlmutter D. D. A random pore model for fluid — solid reactions: 2. Diffusion and transport effects // *Ibid.*— 1981.— 27.— P. 247.
17. Розовский А. Я. Гетерогенные химические реакции. Кинетика и макрокинетика.— М.: Наука, 1980.
18. Жолудов Я. С., Майстренко Ю. А. Кинетика газификации антрацитового штыба.— Киев, 1988.— (Препр./АН УССР. ИПМЭ; № 116).
19. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения.— М.: Мир, 1984.— Т. I.
20. Bhatia S. K., Perlmutter D. D. Unified treatment of structural effects in fluid solid reactions // *AIChE J.*— 1983.— 29, N 2.— P. 281.



21. Sotirchos S. V., Yu H. C. Mathematical modelling of gas — solid reactions with solid product // Chem. Engng. Sci.— 1985.— 40, N 11.— P. 2039.
22. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача.— М.: Химия, 1982.
23. Dutta S., Wen C. Y., Belt R. J. Reactivity of coal and char. 1. In carbon dioxide atmosphere // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.— 1977.— 16, N 1.— P. 20.

г. Москва

Поступила в редакцию 7/III 1991

УДК 533.6.011

В. Н. Дурнев, В. С. Власов

## УЧЕТ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ ПОРОШКООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В МГДУ

Численно исследовано влияние неполноты сгорания углеродного порошкообразного топлива на электропроводность плазмы при движении двухфазной смеси в конкретном МГД-генераторе. Показана некорректность учета полидисперсности углеродного топлива при помощи последовательных расчетов сгорания монодисперсных фракций. Получена зависимость температуры микропламени вокруг алюминиевой частицы полидисперсного ансамбля от размера частицы и ее положения в генераторе плазмы.

Использование в различных областях науки и техники МГД-генераторов с применением порошкообразного топлива обусловлено низкой стоимостью последнего, возможностью прямого преобразования энергии, регулирования длительностью работы МГД-установки (МГДУ) (путем отсечки подачи топлива), ее компактностью, мобильностью и т. д. В связи с этим встают проблемы расчета движения рабочего тела в МГДУ с целью выбора оптимальных размеров и режимов работы энергоустановок данного типа.

В [1, 2] представлена математическая модель процессов в канале МГДУ для монодисперсных частиц топлива. Учтены изменение химического состава несущей среды, скоростная и температурная неравновесность двухфазного потока, кинетика испарения ионизирующей присадки. Математическая модель движения полидисперсных ансамблей частиц порошкообразного топлива в камере сгорания МГДУ с учетом эволюции функций распределения частиц по размерам (определяемых в соответствии с [3]) приведена в [4]. Численные расчеты в [1, 2, 4] выполнены для МГД-генератора плазмы типа «Памир», имеющего следующие основные характеристики: длина генератора плазмы  $l = 720$  мм; расход 25 кг/с; окислитель — газообразный кислород; массовый состав горючего: углерод — 75 %, алюминий — 15 %, ионизирующая присадка (карбонат калия  $K_2CO_3$ ) — 10 %; давление в камере 6 МПа; температура в камере и в зоне зажигания 3500—3000 К. Коэффициент избытка окислителя  $\alpha = 0,9$ .

Считается, что в генераторе плазмы имеются частицы Al, C,  $K_2CO_3$  и  $Al_2O_3$ , образующегося в результате горения. В [5] установлено, что горение и испарение частиц начинается сразу при их выходе из зоны зажигания. Скорости горения частиц Al и C определялись по [6] и [7] соответственно.

Настоящая работа выполнена с целью сравнения результатов численных исследований в поли- и монодисперсном приближении с использованием модели [1, 2, 4]. Сравнение проводилось по неполноте сгорания топлива, а также по интегральной характеристике системы — электропроводности плазмы  $\sigma$ , зависящей от температуры и давления в камере сгорания и определяемой по [8]. Заметим, что углерод — главный компонент топлива — в основном определяет значение  $\sigma$ .

Аналитическая модель высокотемпературного горения угольных частиц [9] рассматривает реакции газификации, пиролиза, окисления на поверхности частиц, газофазные реакции вокруг них, передачу тепла