

УДК 536.7

ГАЗИФИКАЦИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДА

© 2011 г.

В.М. Гремячкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

grema@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается диффузионно-кинетическая модель газификации пористых частиц углерода в реакционных газах (парах воды и двуокиси углерода). Модель рассматривает перенос тепла и веществ как в газе вокруг частицы, так и внутри пористой частицы, а также теплообмен частицы со стенками печи излучением. Анализ модели позволяет определить основные гетерогенные реакции, протекающие на внутренней поверхности пористой частицы. Определены основные зависимости скорости газификации частицы углерода от температуры печи, давления, размера частицы и величины внутренней поверхности частицы.

Ключевые слова: углерод, пористая частица, газификация, пары воды, двуокись углерода.

Диффузионо-кинетическая модель газификации частицы углерода

Газификация частиц углерода является существенно кинетическим процессом [1]. Отсутствие кинетических уравнений гетерогенных реакций углерода с реакционными газами, прежде всего с парами воды, является серьезным препятствием для разработки теории процесса газификации. Диффузионно-кинетическая модель процесса газификации пористой частицы углерода [2–4] рассматривает уравнения переноса массы вне и внутри пористой частицы углерода в виде уравнений сохранения элементов, участвующих в реакциях (углерода, кислорода и водорода), уравнения энергии, уравнения неразрывности и уравнения фильтрации газа в форме уравнения Дарси.

Уравнения переноса массы и энергии могут быть проинтегрированы по радиальной координате, если предположить, что тепловой поток в твердом пористом скелете частицы пренебрежимо мал по сравнению с потоком полной энтальпии в газе, который включает в себя большие величины тепловых эффектов реакций, и критерий Льюиса равен единице. Тогда распределения температуры и концентраций компонентов, участвующих в процессе, могут быть выражены в виде зависимости от координаты

$$\eta = \int_r^{\infty} \frac{U}{\varepsilon \rho D} dr,$$

которая является, по существу, отношением массовой скорости потока газа к диффузионной скорости. Такие зависимости могут быть

найлены при использовании дополнительного условия. На рис. 1 представлены зависимости безразмерной скорости газификации $\eta_0 = U_0 a / \rho D$ от температуры поверхности частицы при условии равновесия гомогенной реакции $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (кривая 1), равенства нулю концентрации двуокиси углерода (кривая 2) и равенства нулю концентрации монооксида углерода (кривая 3) на поверхности частицы углерода.

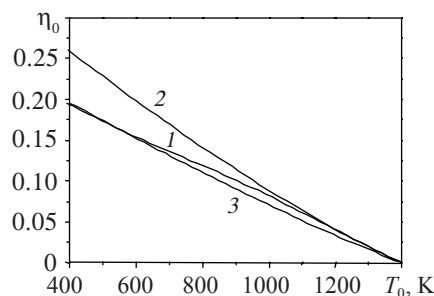


Рис. 1

Таким образом, зависимость скорости газификации частицы от температуры ее поверхности принадлежит довольно узкой области между кривыми 2 и 3, где концентрации монооксида и двуокиси углерода являются положительными величинами. Можно полагать, что эта зависимость соответствует условию равновесия гомогенной реакции, которое, как правило, имеет место при высоких температурах. Если зависимость температуры, концентраций и давления определены как функции координаты η , то уравнение неразрывности может быть записано в виде

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \xi^2 \frac{d\eta}{d\xi} = W(\eta)S,$$

где $\xi = r/a$ – безразмерная радиальная координата, $W(\eta)$ – суммарная скорость потребления углерода в гетерогенных реакциях углерода с реакционными газами, $S = sa/\epsilon$ – безразмерная внутренняя поверхность пористой частицы.

Таким образом, задача определения распределений температуры, концентраций и давления внутри пористой частицы сводится к решению гидродинамической задачи фильтрации реагирующих газов в реакционно-способной пористой среде.

Кинетические уравнения гетерогенных реакций

Скорость потребления углерода внутри пористой частицы связана с протеканием гетерогенных реакций углерода с двуокисью углерода и парами воды. Кинетическое уравнение реакции углерода с двуокисью углерода на единицу внутренней поверхности можно полагать определенным из [4]:

$$W_c = 760 \exp(-30205/T) [\text{CO}_2],$$

где $[\text{CO}_2]$ – молярная концентрация двуокиси углерода.

Можно полагать, что кинетика реакции углерода с парами воды связана с кинетикой реакции углерода с двуокисью углерода [5]. Для определения кинетического уравнения гетерогенной реакции углерода с парами воды рассмотрим, наряду с уравнением неразрывности,

уравнение диффузии паров воды в пористой среде частицы

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{dJ_3}{d\xi} = -\frac{\mu_3}{\mu_c} \left(\gamma W_h S + \frac{\mu_c}{\mu_3} \epsilon W_g \right),$$

где $J_3 = \beta z_3 - \xi^2 dz_3/d\xi$ – поток паров воды; $\gamma = 1$, если образуется только CO, и $\gamma = 2$, если образуется CO₂.

Вводя в рассмотрение функцию $G = -\mu_c(z_3 + dz_3/d\eta)/\mu_3$, которая представляет собой отношение мольных потоков паров воды и углерода, можно из условия независимости скорости реакций от внутренней поверхности частицы определить связь между скоростями реакции углерода с парами воды и двуокисью углерода

$$W_h = \frac{G}{\gamma - G} \Phi_c.$$

Это дает возможность получить зависимость скорости газификации частицы от температуры печи, давления и других параметров, определяющих условия протекания процесса газификации.

Список литературы

1. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. М.: Энергоатомиздат, 1983. 284 с.
2. Гремячкин В.М. // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, №3. С. 11–22.
3. Гремячкин В.М. // Химическая физика. 2007. Т. 26, №5. С. 25–32.
4. Lee S. et al. // A.I.Ch.E.J. 1984. Vol. 30, No 4. P. 583–593.
5. Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. М.: Изд-во АН СССР. 1961. 479 с.

GASIFICATION OF POROUS CARBON PARTICLES

V.M. Gremyachkin

The diffusive-kinetic model for gasification of porous carbon particle in gaseous reactants (steam and carbon dioxide) is considered. The model considers heat and mass transfer both inside the porous particle and in gas phase outside the particle. Heat losses by radiation from the particle to a furnace wall are taken into account as well. The analysis of the model gives a possibility to determine the basis heterogeneous reactions are occurred on the internal surface of the porous particle. The dependences of the particle gasification rate on furnace temperature, pressure, size of the particle and value of the internal surface are determined.

Keywords: carbon, porous particle, gasification, steam, carbon dioxide.