

## ГАЗИФИКАЦИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДА В ДВУОКСИ УГЛЕРОДА

Е.П. Мазанченко, В.М. Гремячкин

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

### Аннотация

Рассматривается диффузионно-кинетическая модель газификации пористой частицы углерода в двуокиси углерода при наличии обтекающего газового потока. Модель рассматривает процессы переноса тепла и массы в газовой фазе над поверхностью частицы, а также теплообмен частицы излучением со стенками печи. Показано, что зависимость скорости реакции от температуры частицы существенно зависит от тепло- и массообмена частицы с окружающей средой. Поэтому экспериментальные данные по зависимости скорости газификации от температуры частицы не могут быть использованы для определения кинетики реакции углерода с двуокисью углерода без рассмотрения параметров тепло- и массообмена частицы с окружающей средой.

Показано, что при низких температурах равновесная концентрация  $\text{CO}_2$  у поверхности частицы достигает больших величин, так что при температурах, меньших 1000 К, когда концентрация двуокиси углерода становится меньше ее равновесной концентрации, реакция углерода с двуокисью углерода не может осуществляться.

Определены зависимости скорости газификации от давления и температуры печи, а также от величины внутренней поверхности частицы.

### GASIFICATION OF A POROUS CARBON PARTICLE BY CARBON DIOXIDE

The diffusive-kinetic model of porous carbon particle gasification by carbon dioxide with a flow of gas is developed. The model considers the processes of heat and mass transfer both inside the porous particle and outside it. Heat losses by radiation from the particle to furnace wall are taken into account. It was shown that dependence of reaction rate on the particle temperature depends from heat and mass transfer of particle with ambient gas. Therefore experimental data on dependence of gasification rate on particle temperature cannot be used for kinetics definition of carbon – carbon dioxide reaction without taking into account heat and mass transfer processes.

It was shown that in case of low temperatures equilibrium concentration of carbon dioxide approach to high values, and at the temperatures less than 1000 K carbon – carbon dioxide reaction cannot occurs.

The dependences of the particle gasification rate and the composition of gasification products on gas composition, pressure temperature of ambient gas and the internal surface of the porous particle are determined.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Углерод может взаимодействовать с различными газообразными окислителями. Среди этих окислителей наиболее распространенными являются кислород, пары воды и двуокись углерода. При горении частицы углерода в кислороде и газификации в парах воды одновременно протекают несколько реакций. Это гетерогенные реакции взаимодействия углерода с кислородом и водяным паром с образованием одноокси и двуокиси углерода, а также реакция углерода с двуокисью углерода. Кроме этого осуществляются гомогенные реакции окисления одноокси углерода при горении и реакция водяного газа при газификации в парах воды. При газификации углерода в двуокиси углерода протекает только одна гетерогенная реакция взаимодействия углерода с двуокисью углерода. С этой точки зрения процесс газификации углерода в двуокиси углерода выглядит более простым. Однако исследование процесса газификации частицы углерода в двуокиси углерода оказывается весьма важным, прежде всего потому, что гетерогенные реакции взаимодействия углерода с кислородом и углерода с водяным паром оказываются тесно связанными с реакцией углерода с двуокисью углерода [1, 2]. Такая связь между кинетическими уравнениями реакций углерода с парами воды и углерода с двуокисью углерода отмечалась еще в монографии [3].

Экспериментальные исследования взаимодействия углерода с двуокисью углерода [4–7], как правило, основаны на измерениях скорости газификации угле-

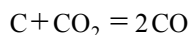
рода в зависимости от температуры поверхности углерода, хотя было показано, что взаимодействие углерода с двуокисью углерода является чисто кинетическим процессом и в значительной мере происходит на внутренней поверхности пористой частицы углерода.

Экспериментальные трудности, как правило, не позволяют исследовать процессы взаимодействия углерода с двуокисью углерода внутри пористой частицы углерода. В связи с этим о кинетике реакции судят по результатам измерений скорости горения и температуры поверхности частицы. В результате получают весьма разные кинетические уравнения этой реакции, среди которых имеются и зависимости аррениусовского типа и зависимости, подчиняющиеся кинетике Ленгмюра-Хиншельвуда. Порядок реакции и энергия активации также различаются в разных экспериментальных исследованиях.

Теоретические исследования [8] основаны на использовании экспериментально определенных кинетических уравнениях реакции углерода с двуокисью углерода. В [8] при рассмотрении уравнений переноса тепла и массы пренебрегается стефановским потоком, который возникает вследствие потребления углерода в гетерогенной реакции углерода с двуокисью углерода. При этом массовая скорость стефановского потока равна скорости горения частицы. Поэтому пренебрегать скоростью стефановского потока в модели газификации частицы углерода, по-видимому, неправомерно.

## 2. МОДЕЛЬ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТИЦЫ УГЛЕРОДА В ДВУОКСИ УГЛЕРОДА

Модель газификации пористой частицы углерода в двуокиси углерода должна рассматривать процессы тепло- и массопереноса как внутри пористой частицы, так и вне частицы, а также кинетическое уравнение гетерогенной реакции углерода с двуокисью углерода



Уравнения диффузии могут быть записаны в виде уравнений сохранения атомов углерода и атомов кислорода

$$\operatorname{div} \left( \frac{I_1}{\mu_1} + \frac{I_2}{\mu_2} \right) = \frac{W_c s}{\mu_c} \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \left( 2 \frac{I_1}{\mu_1} + \frac{I_2}{\mu_2} \right) = 0, \quad (2)$$

Здесь и далее индексы 1 и 2 соответствуют  $CO_2$  и  $CO$ ,

$$I_j = \rho u z_j - \varepsilon \rho D \operatorname{grad} z_j \quad (3)$$

– потоки соответствующих веществ,  $\mu_j$  и  $\mu_c$  – молекулярные массы газообразных веществ и углерода,  $W_c$  – скорость потребления углерода в гетерогенной реакции с двуокисью углерода на единицу внутренней поверхности частицы,  $s$  – удельная (на единицу объема) внутренняя поверхность частицы,  $\rho$  – плотность газа,  $u$  – скорость стефановского потока,  $D$  – бинарный коэффициент диффузии веществ 1 и 2,  $\varepsilon$  – пористость частицы и  $z_j$  – массовые доли веществ в газе.

Уравнение энергии запишем в виде сохранения полной энтальпии

$$\operatorname{div} (I_1 h_1 + I_2 h_2 + I_h) = W_c s h_c + I_R \delta (r - a), \quad (4)$$

где  $h_j$  и  $h_c$  – энтальпии газообразных веществ и твердого углерода,  $I_R = \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)$  – поток тепла излучением от поверхности частицы в окружающую среду с температурой  $T_\infty$ ,

$$I_h = \rho u c_p T - [\varepsilon \lambda_g + (1 - \varepsilon) \lambda_c] \operatorname{grad} T, \quad (5)$$

– поток тепла в газе с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_g$  и пористом скелете частицы с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_c$ .

Кроме уравнений сохранения элементов и энергии необходимо также рассмотреть и уравнения гидродинамики в виде уравнения неразрывности

$$\operatorname{div} \rho u = W_c s \quad (6)$$

и уравнение Дарси для фильтрации газа в пористой среде частицы

$$\rho u = (k/\mu) \rho \operatorname{grad} p \quad (7)$$

Граничные условия для уравнений могут быть записаны в виде

$$r = 0, I_1 = I_2 = 0, I_h = 0, u = 0, \frac{dp}{dr} = 0 \quad (8)$$

$$r = \delta, z_1 = z_1^\infty, z_2 = z_2^\infty, T = T_\infty, p = p_0$$

Здесь граничные условия в окружающей среде устанавливаются на конечном расстоянии  $\delta$  от частицы, которое соответствует толщине «приведенной пленки» [9]. Введение «приведенной пленки» позволяет учесть изменение параметров тепло- и массообмена частицы с окружающей средой, в частности из-за наличия газового потока, обтекающего частицу. Для сферической частицы толщина «приведенной пленки» может быть связана с параметрами теплообмена соотношением [9]

$$\delta = a \frac{Nu}{Nu - 2} \quad (9)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта.

Уравнения (1) и (2) могут быть проинтегрированы по радиальной координате, если исключить скорость потребления углерода  $W_c$  с использованием уравнения неразрывности (6). В результате для потоков двуокиси и одноокиси углерода получим выражения

$$I_1 = -\frac{\mu_1}{\mu_c} \rho u, \quad I_2 = 2 \frac{\mu_2}{\mu_c} \rho u \quad (10)$$

Подставляя сюда выражения для потоков веществ (3) и интегрируя еще раз по радиальной координате с использованием граничных условий при  $r = \delta$ , найдем соотношения для определения зависимости состава газа от радиальной координаты

$$z_1 = \left( z_1^\infty + \frac{\mu_1}{\mu_c} \right) \exp(-\eta) - \frac{\mu_1}{\mu_c}, \quad (11)$$

$$z_2 = \left( z_2^\infty - 2 \frac{\mu_2}{\mu_c} \right) \exp(-\eta) + 2 \frac{\mu_2}{\mu_c}. \quad (12)$$

Здесь  $\eta = \int_0^r u a dr / \varepsilon D$  – новая безразмерная координата.

Уравнение энергии также может быть проинтегрировано по радиальной координате, если учесть, что энтальпия твердого углерода  $h_c = 0$  [10]:

$$I_1 h_1 + I_2 h_2 + I_h = I_R \theta (r - a) \quad (13)$$

Здесь  $\theta (r - a)$  – тета-функция, равная нулю при  $r < a$  и единице при  $r > a$ .

Повторное интегрирование уравнения (13), после подстановки в него выражений для потоков веществ (3) и тепла (5), может быть осуществлено, если полагать, что при достаточно большой пористости частицы тепловой поток в твердом скелете  $-(1 - \varepsilon) \lambda_c dT/dr$  является величиной малой по сравнению с потоком полной энтальпии в газе  $I_1 h_1 + I_2 h_2 + \rho u c_p T - \varepsilon \lambda_g dT/dr$ , и предположить, что критерий Льюиса  $Le = 1$ . В результате, после интегрирования уравнения, найдем выражение для определения температуры

$$Y = \exp(-\eta) \left( Y_\infty + \frac{I_R}{\eta_0} A \right) - \frac{I_R}{\eta_0} A \quad r > a, \quad (14)$$

$$Y = \exp(-\eta) \left[ Y_\infty - \frac{I_R}{\eta_0} A (e^{\eta_0} - 1) \right] \quad r < a. \quad (15)$$

Здесь  $Y = \sum \frac{z_j}{\mu_j} (H_j + C_j T)$ ,  $Y_\infty = \sum \frac{z_j^\infty}{\mu_j} (H_j + C_j T)$ ;

$H_j$  и  $C_j$  – энтальпия и теплоемкость на моль веществ;  $\eta_0 = \int_a^a u a dr / \varepsilon D$  значение функции  $\eta$  на поверхности частицы и  $A = a / \varepsilon \rho D$  – параметр, характеризующий размер частицы.

Таким образом, уравнения (11)–(12) и (14)–(15) определяют зависимость состава газа и температуры от функции  $\eta$ .

### 3. СКОРОСТЬ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТИЦЫ УГЛЕРОДА

В газе над поверхностью частицы химические реакции отсутствуют для рассматриваемого случая газификации частицы углерода в двуокиси углерода. Скорость стефановского потока вследствие сферической симметрии меняется по закону  $u = u_0 a^2 / r^2$ . Для функции  $\eta$  будем иметь выражение

$$\eta = \frac{u_0 a}{\varepsilon D} \left( \frac{a}{r} - \frac{a}{\delta} \right), \quad (16)$$

а для параметра  $\eta_0 = \text{Re}(1 - a/\delta)$ , где  $\text{Re} = u_0 a / \varepsilon D$  – критерий Пекле, который является, по существу, безразмерной скоростью газификации частицы.

На поверхности частицы, при  $\eta = \eta_0$ , выражения (11) и (12) определяют состав газа у поверхности частицы, а уравнение (14) определяет зависимость скорости газификации от температуры поверхности частицы. Эта зависимость для разных значений параметра  $\delta$  представлена на рис. 1.

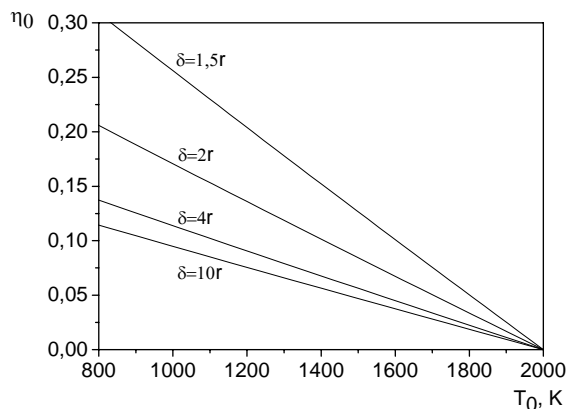


Рис. 1. Зависимость скорости газификации частицы углерода от температуры поверхности частицы для разных значений параметра  $\delta$ : 1 – 1,5a, 2 – 2a, 3 – 4a, 4 – 10a

Как видно, параметр  $\delta$  весьма сильно влияет на зависимость скорости газификации от температуры поверхности частицы. Это означает, что скорость газификации частицы в значительной мере определяется условиями тепло- и массообмена частицы с окружающей средой. В частности, это показывает, что экспериментальные данные по зависимости скорости газификации частицы углерода от температуры ее поверхности не могут быть использованы для определения кинетического уравнения газификации частицы без контролируемых условий тепло- и массообмена частицы.

При достаточно высоких скоростях газификации и достаточно низких температурах частицы процесс

газификации частицы углерода в двуокиси углерода может происходить в диффузионном режиме. В этом случае на поверхности частицы осуществляется равновесие между твердой частицей и газовой фазами. Учет такого равновесия равносителен условию равновесия гетерогенной реакции углерода с двуокисью углерода.

Условие равновесия этой реакции может быть записано в виде

$$z_1 = k_c z_2^2 \quad (17)$$

где константа равновесия  $k_c = k_p \mu_1 p_0 \bar{\mu} / \mu_2^2$ ,  $\bar{\mu}$  – средняя молекулярная масса смеси одно- и двуокиси углерода, а константа  $k_p$  определяется по данным справочника [10].

Уравнения (11), (12) и (14) на поверхности частицы ( $\eta = \eta_0$ ) определяют зависимость состава газовой фазы от температуры поверхности частицы. Следовательно, уравнение (17) дает возможность определить равновесный состав газа у поверхности частицы. Если принять во внимание, что при газификации в чистой двуокиси углерода сумма относительных массовых концентраций равна единице, то можно определить равновесную концентрацию двуокиси углерода на поверхности частицы. Зависимость равновесной концентрации двуокиси углерода от температуры поверхности частицы показана на рис. 2 кривой 3. Можно видеть, что при температурах частицы около 1000 К происходит довольно резкое изменение равновесной концентрации двуокиси углерода у поверхности частицы, которая изменяется от величины близкой к единице до величины близкой к нулю.

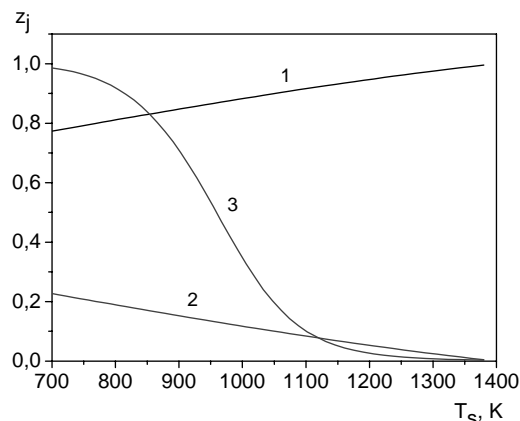


Рис. 2. Зависимость концентраций двуокиси углерода (кривая 1), монооксида углерода (2) и равновесной концентрации двуокиси углерода (3) на поверхности частицы от ее температуры

Для существования процесса газификации частицы углерода в двуокиси углерода необходимо, чтобы концентрация двуокиси углерода в окружающей среде была выше, чем у поверхности частицы, а концентрация двуокиси углерода у поверхности частицы была бы больше или равна равновесной концентрации двуокиси углерода. Температура поверхности частицы углерода обычно ниже температуры окружающей среды, так как процесс газификации является эндотермическим процессом.

Таким образом, рис. 2 показывает, что при температурах ниже 1000 К газификация частицы углерода

возможна только в чистой одноокиси углерода. При более низких концентрациях одноокиси углерода в окружающей среде равновесная концентрация одноокиси углерода у поверхности частицы будет выше концентрации в окружающей среде, что делает процесс газификации невозможным. Для газификации частицы углерода в среде с низким содержанием одноокиси углерода необходимы температуры выше 1300 К.

Протекание реакции углерода с двуокисью углерода возможно, если концентрация двуокиси углерода выше равновесной концентрации. Таким образом, газификация углерода в двуокиси углерода оказывается невозможной, если температура частицы ниже 850 К для рассматриваемых условий, как это можно видеть из рис. 1.

На рис.2 представлена зависимость безразмерной скорости газификации частицы углерода в двуокиси углерода от температуры поверхности частицы. Скорость газификации частицы углерода уменьшается с ростом размера частицы (параметра  $A$ ), так что при одинаковых температурах частицы скорость газификации уменьшается с ростом размера частиц. Уменьшение скорости газификации для крупных частиц углерода может быть связано с тем, что поток двуокиси углерода на поверхность частиц уменьшается с ростом их размера. Для более высоких температур печи скорость газификации частицы увеличивается, однако, скорость газификации растет слабее с ростом температуры частицы.

#### 4. СОСТАВ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ

Скорость газификации частицы и ее температура зависят от скорости потребления углерода внутри частицы. Определение скорости газификации частицы углерода и ее зависимости от параметров окружающей среды, температуры и давления должно определяться для частиц с одинаковой внутренней пористой структурой, поскольку скорость протекания гетерогенной реакции внутри частицы существенно зависит от ее внутренней поверхности.

Для определения зависимости функции  $\eta$  от радиальной координаты  $\xi$  внутри пористой частицы необходимо рассмотреть уравнение неразрывности

$$-\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \xi^2 \frac{d\eta}{d\xi} = \Phi_c S, \quad (18)$$

где функция  $\beta = -\xi^2 d\eta/d\xi$  определяет скорость газового потока, возникающего вследствие протекания гетерогенных реакций внутри частицы;  $\Phi_c = W_c A$  – безразмерная функция скорости реакции углерода с двуокисью углерода,  $S = sa/\varepsilon$ . Тогда уравнение неразрывности может быть записано в виде:

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d\beta}{d\xi} = \Phi_c S, \quad (19)$$

$$\frac{d\eta}{d\xi} = -\frac{\beta}{\xi^2} \quad (20)$$

Граничные условия для уравнений (19) и (20) должны рассматривать условия равенства нулю массового потока газа в центре частицы, а также условия непрерывности функции  $\eta$ , и непрерывность массового потока газа. Последнее условие подразумевает,

вообще говоря, разрыв функции  $\beta$  на поверхности частицы, так как пористость частицы на ее поверхности может испытывать скачок. Таким образом, граничные условия для уравнений (19) и (20) будут:

$$\xi = 0, \quad \beta = 0; \quad \xi = 1, \quad \eta = \eta_0, \quad \beta = \beta_0 = \eta_0/\varepsilon_0 \quad (21)$$

Решение уравнений (19) и (20) с граничными условиями (21) позволяет определить зависимость функции  $\eta$  от радиальной координаты  $\xi$  и, следовательно, распределения концентраций, температуры и давления по координате внутри частицы, так как их зависимость от  $\eta$  известна, и распределение внутри частицы скорости гетерогенной реакции углерода с  $\text{CO}_2$ .

Для пористых частиц размером  $A = 1$  с температурой поверхности  $T_s = 1300$  К, газифицирующихся в печи с  $T_w = 1500$  К и  $p = 1$  атм изменение концентраций  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  внутри частицы незначительно и в центре частицы достигает 0.951 для  $\text{CO}_2$  и 0.048 –  $\text{CO}$ .

Распределения давлений и температуры внутри пористой частицы с теми же параметрами показаны на рис.3.

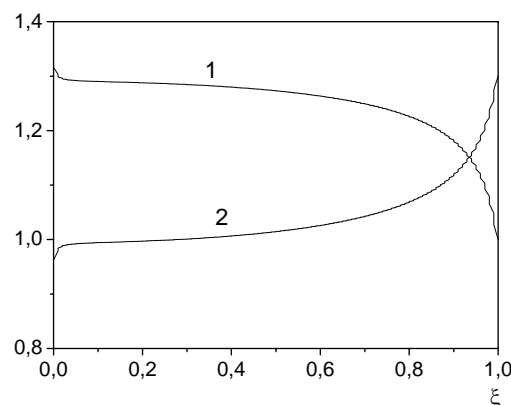


Рис. 3. Распределение по координате давлений  $p \cdot 10^{-6}$  Па (1) и температуры (2)  $T \cdot 10^{-4}$  К внутри пористой частицы

Можно отметить довольно резкое увеличение давления внутри частицы, градиент которого обеспечивает выход продуктов газификации из пористой частицы.

Увеличение давления и изменения концентраций реагентов приводят к увеличению скорости гетерогенной реакции. На рис. 4 показано распределение скорости реакции углерода с двуокисью углерода по радиальной координате.

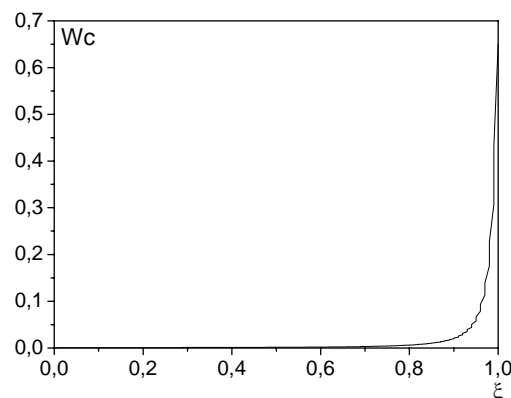


Рис. 4. Зависимость скорости реакции углерода с двуокисью углерода от радиальной координаты внутри частицы

В рассматриваемом случае реакция углерода с  $\text{CO}_2$  протекает в узком слое у поверхности частицы.

Система уравнений (1)–(8) позволяет оценить влияние на скорость газификации размера частиц, температуры печи и давления.

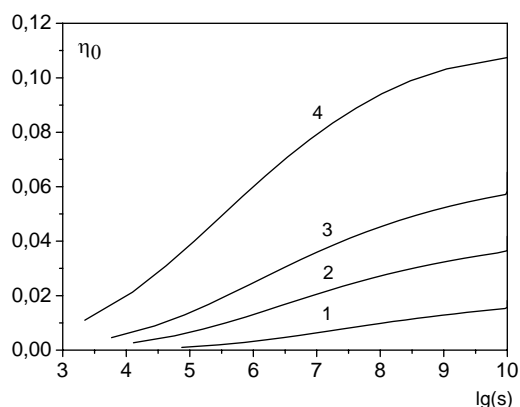


Рис. 5. Зависимость скорости газификации частицы углерода от внутренней поверхности частицы при температурах печи: 1 – 1500, 2 – 1800, 3 – 2000, 4 – 2400 К

На рис. 5 показано влияние температуры печи на скорость газификации частицы. При увеличении температуры печи от 1500 до 2000 К скорость газификации увеличивается вследствие повышения температуры частицы, что связано, прежде всего, с увеличением теплового потока от частицы к стенкам печи.

При достаточно высоких температурах частицы и больших величинах внутренней поверхности частицы возможен переход к диффузионному режиму газификации (кривая 4), при котором гетерогенная реакция будет протекать только на поверхности частицы. При малых величинах внутренней поверхности реакция будет протекать во всем объеме частицы, смещаясь к ее поверхности.

Влияние давления на скорость газификации частицы углерода для случая  $T_w = 1500$  К и  $A = 1$  показано на рис. 6.

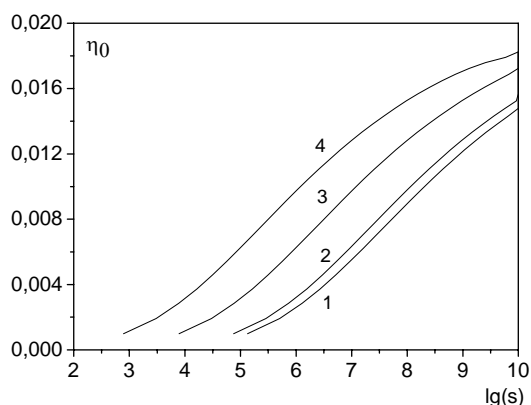


Рис. 6. Зависимость скорости газификации частицы углерода от внутренней поверхности частицы при разных давлениях: 1 – 0,5, 2 – 1, 3 – 10, 4 – 100 атм.

При увеличении давления скорость газификации возрастает. Однако увеличение скорости гетерогенной реакции при увеличении давления компенсируется снижением температуры частицы вследствие протекания эндотермической реакции внутри нее. Поэтому увеличение скорости газификации не пропорционально давлению.

Размер частиц также влияет на скорость газификации частицы, так как тепловой поток излучение пропорционален площади поверхности частицы. Для больших частиц ( $A = 40$ ) при больших величинах внутренней поверхности ( $\lg(S) \approx 9$ ) возможен переход к диффузионному режиму газификации, при котором реакция будет протекать только на поверхности частицы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования газификации частиц углерода в двуокиси углерода показывают, что скорость газификации пористой частицы существенно зависит от условий тепло- и массообмена частицы с окружающей средой и экспериментальные данные по зависимости скорости газификации частицы углерода от температуры ее поверхности не могут быть использованы для определения кинетического уравнения газификации частицы без контролируемых условий тепло- и массообмена частицы.

Скорость газификации возрастает с увеличением давления, температуры печи и размера частицы. Однако, основным параметром, влияющим на нее, является внутренняя поверхность частицы.

Анализ модели дал возможность определить кинетическую зависимость для реакции углерода с  $CO_2$ .

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a$  – радиус частицы (м)
- $C_j$  – теплоемкость на кмоль
- $c_j$  – теплоемкость на кг
- $D$  – коэффициент диффузии ( $m^2/c$ )
- $I_j$  – потоки веществ ( $kg/m^2c$ )
- $I_h$  – поток тепла ( $kJ/m^2c$ )
- $H_j$  – энтальпии образования веществ из элементов ( $kJ/kg K$ )
- $h_j$  – энтальпии образования веществ из элементов ( $kJ/kg K$ )
- $h_c$  – энтальпия твердого углерода ( $kJ/kg K$ )
- $k$  – коэффициент проницаемости пористой частицы ( $m^2$ )
- $m_j$  – числа атомов углерода в молекуле вещества
- $n_j$  – числа атомов кислорода в молекуле вещества
- $W_c$  – скорость реакции углерода с двуокисью углерода ( $kg/m^2c$ )
- $W$  – скорость потребления углерода в гетерогенной реакции ( $kg/m^2c$ )
- $P$  – давление в единицах атмосферы
- $r$  – радиальная координата (м)
- $s$  – внутренняя поверхность пористой частицы ( $m^{-1}$ )
- $T$  – температура (К)
- $T_w$  – температура стенок печи (К)
- $T_0$  – температура поверхности частицы (К)
- $U$  – массовый поток газа ( $kg/m^2c$ )
- $u$  – стефановский поток (м/с)
- $z_j$  – относительные массовые концентрации
- $z_j^{00}$  – относительные массовые концентрации в окружающей среде
- $z_j^0$  – относительные массовые концентрации у поверхности частицы

### Греческие символы

- $\kappa$  – параметр, определяющий проницаемость частицы углерода,
- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа (Вт/м с град)
- $\mu_j$  – молекулярные массы газообразных веществ ( $kg/mole$ )
- $\mu_c$  – молекулярная масса углерода ( $kg/mole$ )
- $\mu$  – вязкость газа

$\varepsilon$  – пористость частицы

$\beta$  – безразмерный массовый поток газа внутри частицы

$\rho$  – плотность газа ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

$\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана

$\Phi_c$  – безразмерная скорость реакции углерода с двуокисью углерода

$\Phi$  – безразмерная скорость потребления углерода в гетерогенных реакциях

Индексы j:

1 –  $\text{CO}_2$

2 –  $\text{CO}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гремячкин В.М. О кинетике гетерогенных реакций углерода с кислородом при горении пористых частиц углерода в кислороде // ФГВ. Т. 42. № 3. 2006. С. 11–22.
2. Гремячкин В.М. Взаимодействие пористой частицы углерода с водяным паром // ХФ. Т. 26. № 5. 2007. С. 25–32.
3. Чуханов З.Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. М.: Изд-во АН СССР. 1961. 479 с.
4. Lee S., Angus J.C., Edwards R.V., Gardner N.C. Noncatalytic Coal Char Gasification // A.I.Ch.E.J. Vol. 30. № 4. 1984. P. 583–593.
5. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат. 1986.
6. Предводителев А.С., Хитрин Л.Н., Цуханова О.А. и др. Горение углерода. М.–Л.: Изд-во АН СССР. 1949. 407 с.
7. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. М.: Энергоатомиздат. 1983. 176 с.
8. Самуйлов Е.В., Фаминская М.В., Головина Е.С. Модель и расчет процесса газификации одиночной углеродной частицы. // ФГВ. Т. 40. № 1. 2004. С. 86–94.
9. Франк–Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1987. 502 с.
10. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справ. (Под ред. Глушко В.П.). М.: Наука. 1978.

