

На правах рукописи

МАЗАНЧЕНКО Екатерина Павловна

**ГАЗИФИКАЦИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДА
В ПАРАХ ВОДЫ И ДВУОКСИ УГЛЕРОДА**

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гремячкин Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Хвесюк Владимир Иванович

кандидат физико-математических наук
Истратов Анатолий Григорьевич

Ведущая организация: **Институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова РАН.**

Защита состоится 16 декабря 2010 г. в 15 часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского РАН по адресу: 119526, Москва, проспект Вернадского
д.101, корп. 1, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН.

Автореферат разослан 2 ноября 2010 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
Д 002.240.01 при ИПМех РАН
кандидат физико-математических наук

Сысоева Е.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Газификация является перспективным процессом при переработке угля, древесины, биомассы и других твердых углеводородных веществ с целью получения синтез-газа (смеси водорода и монооксида углерода). Синтез-газ может быть использован в качестве топлива для энергетики и как сырье для получения моторных топлив, метанола и других ценных химических продуктов.

Взаимодействие углерода с реакционными газами является сложным процессом, прежде всего потому, что частицы углерода являются пористыми и реакция протекает на внутренней их поверхности. В связи с этим возникает сложное течение газа внутри частицы, которое связано с увеличением массы газа вследствие потребления углерода при протекании гетерогенных реакций.

К настоящему времени в техническом и технологическом отношении разработаны различные типы газификаторов, использующие реакторы с неподвижным стационарным слоем, кипящим и подвижным слоями. В реакторах разработаны разные методы передачи тепла и организации процессов горения угля и газификации углеродных остатков, образующихся при выгорании летучих компонентов угля. Можно полагать, что в техническом плане были использованы все возможные методы организации процесса газификации углей. Однако в научном плане результаты исследования процессов горения и газификации угля остаются более скромными. Во всяком случае, теория этих процессов остается не развитой в достаточной степени для того, чтобы описывать все существенные особенности процессов. Экспериментальные результаты, как правило, сильно отличаются друг от друга и плохо поддаются систематизации, что естественно при отсутствии теории процессов. Отсутствие теории не позволяет разработать методы расчета процессов горения и газификации, что необходимо для определения технологических

параметров работы газификаторов. К таким параметрам можно отнести содержание кислорода или воздуха, а также паров воды в составе дутья, отношение дутья к количеству угля, необходимая температура в газификаторе, геометрические размеры газификатора, обеспечивающие полноту газификации угля и другие параметры. Большое число необходимых технологических параметров делает невозможным определение их экспериментальным путем. Определение оптимальных технологических параметров возможно только на основе расчетной модели горения и газификации частиц углерода. Этим обусловлена актуальность темы диссертационной работы.

Цель работы. Цель работы - создание и тестирование диффузионно-кинетической модели газификации пористой частицы углерода в парах воды и двуокиси углерода и определение основных закономерностей процессов газификации.

Научная новизна.

- (1) Разработана диффузионно-кинетическая модель газификации пористых частиц углерода в реакционных газах, которая включает в себя уравнения переноса веществ и тепла внутри пористых частиц и в газовой фазе над их поверхностью, а также уравнения гидродинамики течения газа внутри пористой среды частицы.
- (2) Определены зависимости основных параметров процесса газификации: скорости газификации и состава продуктов в среде паров воды, двуокиси углерода и их смеси от размера частиц, давления, температуры печи и состава окружающей среды, в которой происходит процесс газификации.
- (3) Определены распределения давления и температуры внутри пористой частицы.
- (4) Показано, что основным параметром, определяющим скорость газификации и состав ее продуктов, является внутренняя поверхность пористых частиц.

Основными защищаемыми положениями и результатами являются:

- (1) Модель газификации пористой частицы углерода в двуокиси углерода, парах воды и их смеси, основанная на решении задачи тепло- и массообмена в газовой фазе над поверхностью частицы и внутри частицы..
- (2) Основные параметры процесса газификации: скорость газификации и состав продуктов газификации пористой частицы углерода в зависимости от состава реакционных газов, давления и температуры печи, от размера частиц и величины их внутренней поверхности.

Научная и практическая значимость. Предложенная модель газификации пористых частиц углерода расширяет наши знания о физико-химических процессах взаимодействия углерода с реакционными газами. Она может быть использована в пакетах прикладных вычислительных программ для расчетов основных характеристик процесса газификации, а также для поиска путей оптимизации процессов промышленных реакторов с целью улучшения технологических характеристик этих устройств и достижения высоких экологических показателей.

Достоверность результатов диссертации подтверждается физической обоснованностью постановок задач и строгим аналитическим характером их рассмотрения с применением современных теоретических концепций и математических средств физической и химической механики, а также достаточно хорошим качественным соответствием полученных результатов решениям, полученным с помощью других программных комплексов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных профильных научных конференциях и семинарах:

- (1) II конференция по фильтрационному горению, Черноголовка, 2010;
- (2) Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем», Москва, ИПМех РАН, 2009, 2008 гг.;

- (3) VII Всероссийская конференция «Горение твердого топлива», Новосибирск, ИТ СО РАН, 2009;
- (4) Международная конференция «Химическая и радиационная физика» (Мемориал О.И. Лейпунского), Москва, ИХФ РАН, 2009;
- (5) VI Mediterranean Combustion Symposium, Porticcio-Ajaccio, Corsica, France, 2009;
- (6) XIV Симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка, 2008;
- (7) 6th International seminar on flame structure, Brussels, Belgium, 2008;
- (8) III International workshop «Nonequilibrium processes in combustion and plasma based technologies», Minsk, Belarus, 2008.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе 3 статьи в журналах из перечня Высшей аттестационной комиссии РФ. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 97 страниц, включая 24 рисунка. Список литературы содержит 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность рассматриваемых в работе проблем, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены представляемые в работе новые результаты, их практическая значимость и положения, выносимые на защиту, кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** рассмотрены основные модели, используемые для описания процессов горения и газификации, описаны экспериментальные сложности, возникающие при исследовании этих процессов вследствие того, что необходимо учитывать реакции, протекающие внутри пористой частицы. Приведен

обзор работ по рассматриваемой проблеме и описано ее современное состояние.

Во **второй главе** описана постановка задачи. Рассматривается пористая сферическая частица углерода, которая находится в печи в среде водяного пара и двуокиси углерода. Пары воды и двуокись углерода диффундируют внутрь пористой частицы и вступают в реакцию с углеродом. Продукты реакции выходят из пористой частицы путем диффузии, а также с массовым потоком газа, который возникает из-за наличия гетерогенных реакций углерода с реакционными газами.

Математическая модель основана на уравнениях диффузии веществ и теплопроводности, как в газовой фазе, так и внутри пористой частицы, а также уравнениях гидродинамики течения газа внутри частицы. Рассмотрены основные гетерогенные реакции взаимодействия углерода с парами воды и двуокисью углерода, а также гомогенная обратимая реакция взаимодействия окиси углерода с парами воды. Образование метана и других углеводородных веществ не рассматривается в данной модели, так как концентрации этих веществ обычно малы.

В третьей главе рассмотрено взаимодействие пористой частицы углерода с двуокисью углерода.

При горении углерода в кислороде и газификации в парах воды одновременно протекают несколько химических реакций. При газификации углерода в двуокиси углерода имеет место только одна реакция, поэтому этот процесс выглядит более простым. Однако исследования этого процесса очень важны, поскольку кинетика реакции углерода с двуокисью оказывается связанной с реакцией углерода с парами воды [1-4].

Экспериментальные исследования взаимодействия углерода с двуокисью углерода [5-8] основаны на измерениях скорости газификации в зависимости от температуры поверхности частицы и показывают, что этот процесс

является кинетическим и происходит на внутренней поверхности пористой частицы. Экспериментальные трудности, как правило, не позволяют исследовать процессы взаимодействия углерода с двуокисью углерода внутри частицы углерода, в связи с чем 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.

Для оценки влияния процессов тепло- и массообмена в окружающей среде можно ввести «приведенную пленку» [9]. Граничные условия в окружающей среде в этом случае устанавливаются на конечном расстоянии δ от частицы, которое соответствует толщине «приведенной пленки». Параметр δ для сферических частиц связан с параметрами теплообмена следующим выражением [9]:

$$\delta = a \frac{Nu}{Nu-2} \quad (1)$$

где Nu – критерий Нуссельта.

Можно отметить, что этот параметр сильно влияет на скорость газификации частицы (рис. 1). Таким образом, скорость газификации в значительной мере определяется условиями тепло- и массообмена частицы с окружающей средой, следовательно, экспериментальные данные по зависимостям скорости газификации от температуры поверхности частицы не могут быть использованы для определения кинетики без учета условий тепло- и массообмена.

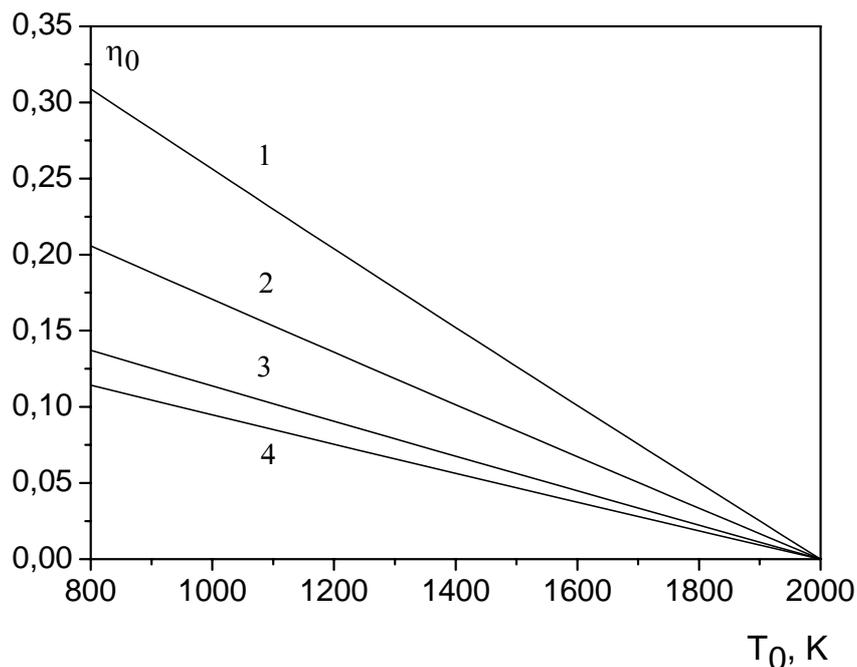


Рис. 1. Зависимость скорости газификации частицы углерода от температуры поверхности частицы для разных значений параметра δ :

1 – 1.5, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 10.

При достаточно высоких скоростях газификации и 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 фазой.

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.

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 равновес-

ной концентрации двуокиси углерода. Температура поверхности частицы углерода обычно ниже температуры окружающей среды, так как процесс газификации является эндотермическим процессом.

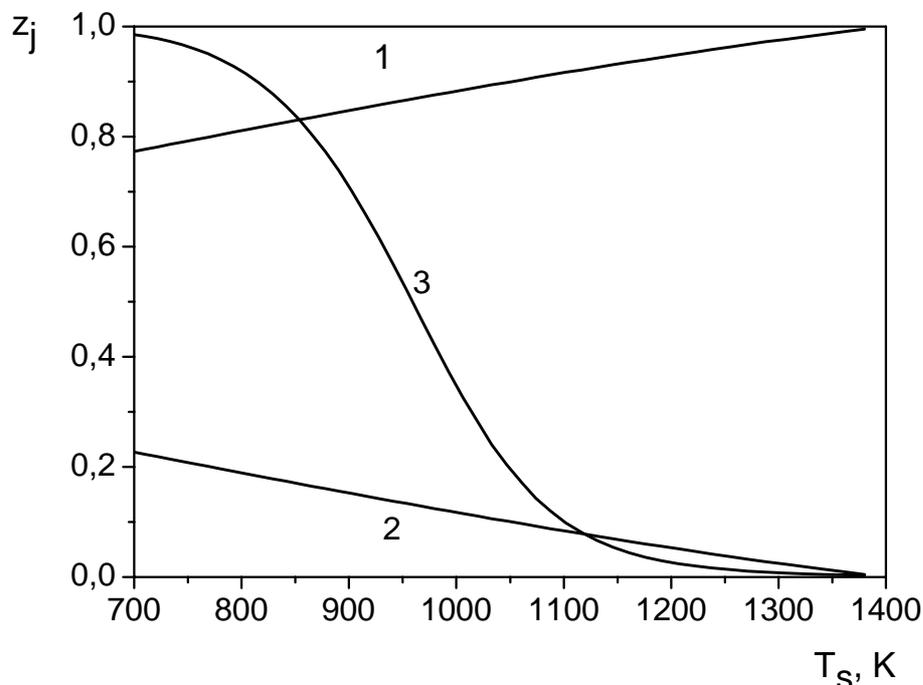


Рис. 2. Зависимость концентраций двуокиси углерода (кривая 1), монооксида углерода (2) и равновесной концентрации двуокиси углерода (3) на поверхности частицы от ее температуры.

Таким образом, рис.2 показывает, что при температурах ниже 850 К газификация частицы углерода возможна только в чистой двуокиси углерода. При более низких концентрациях двуокиси углерода в окружающей среде равновесная концентрация двуокиси углерода у поверхности частицы будет выше концентрации в окружающей среде, что делает процесс газификации невозможным. Для газификации частицы углерода в среде с низким содержанием двуокиси углерода необходимы температуры выше 1300 К.

На рис. 3 показаны распределения температуры (кривая 1), давлений (2) и скорости гетерогенной реакции (3) внутри пористой частицы.

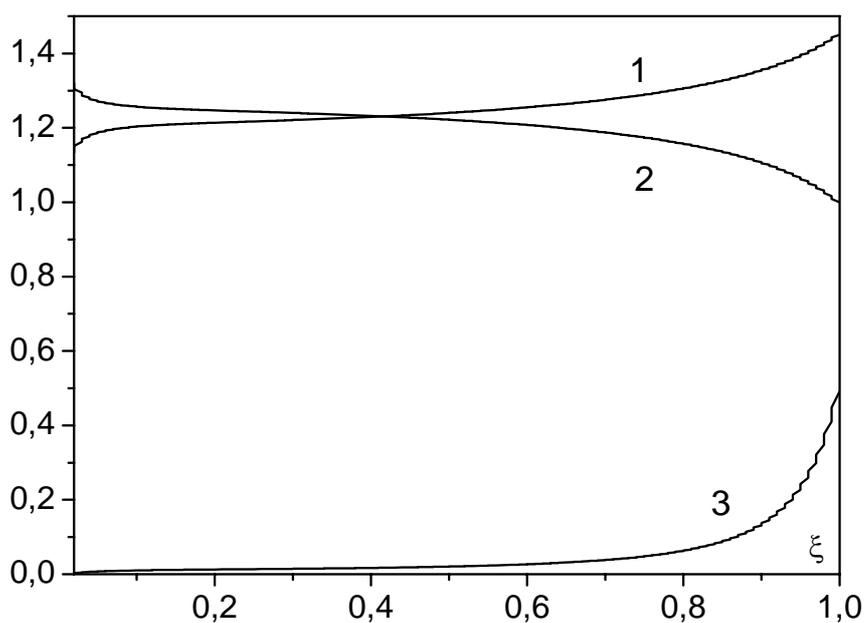


Рис. 3. Распределение по координате температуры $T \times 10^{-4}$ К (1), давлений $p \times 10^6$ Па (2) и скорости реакции (3) углерода с двуокисью углерода внутри пористой частицы.

Расчеты проводились для частиц размером $A=1$, газифицирующихся в печи с температурой $T_w=1500$ К и давлением $p=1$ атм. Температура поверхности частицы $T_s=1450$ К, при этом рассчитанная величина ее внутренней поверхности $\lg S=5.863$. Можно отметить довольно резкое увеличение давления внутри частицы, градиент которого обеспечивает выход продуктов газификации из пористой частицы, и резкое уменьшение скорости реакции внутри частицы. Реакция углерода с CO_2 является эндотермической и в рассматриваемых условиях протекает в узком слое у поверхности частицы.

Также рассмотрено влияние на процесс газификации температуры печи, в которой находятся пористый частицы, давления и размера частиц. Показано, что основным параметром, влияющим на скорость газификации частицы, является величина ее внутренней поверхности.

В четвертой главе рассмотрено взаимодействие пористой частицы углерода с парами воды. Для определения основных параметров процесса газификации, таких, как скорость газификации и состав продуктов, необходимы кинетические уравнения основных гетерогенных реакций.

Уравнения гидродинамики течения газа внутри пористой частицы могут быть рассмотрены в виде

$$\frac{1}{\xi} \frac{d\beta}{d\xi} = (\Phi_h + \Phi_c) S \quad (2)$$

$$\frac{d\eta}{d\xi} = -\frac{\beta}{\xi^2} \quad (3)$$

где $\beta = -\xi^2 \frac{d\eta}{d\xi}$ - функция, которая определяет собой скорость газового потока, возникающего вследствие протекания гетерогенных реакций внутри частицы; $\eta = \int_r^{\infty} \frac{U}{\varepsilon \rho D} dr$; $\xi = \frac{r}{a}$ - безразмерная радиальная координата; $S = \frac{sa}{\varepsilon}$ - безразмерная внутренняя поверхность частицы; $\Phi_h = W_h A$ и $\Phi_c = W_c A$ - безразмерные функции скоростей реакций углерода с парами воды и реакции двуокиси углерода с углеродом соответственно; параметр $A = \frac{a}{\varepsilon \rho D}$ определяет размер частицы.

Выражения для температуры и концентраций являются функциями η из уравнений сохранения элементов.

Граничные условия для уравнений (2)-(3) должны рассматривать условия равенства нулю потоков веществ и массового потока газа в центре частицы, а также условия непрерывности концентраций и температуры на поверхности частицы, то есть непрерывность функции η и непрерывность массового потока газа:

$$\xi = 0, \quad \beta = 0, \quad ;$$

$$\xi = 1, \quad \eta = \eta_0, \quad \beta = \beta_0 = \frac{\eta_0}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Можно полагать, что кинетическое уравнение реакции углерода с двуокисью углерода известно [7]:

$$W_c = 760 \exp\left(-\frac{30205}{T}\right) [CO_2] \quad (5)$$

где $[CO_2]$ - молярная концентрация двуокиси углерода.

Гомогенная реакция $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ обратима, и можно полагать, что она протекает в равновесном режиме.

В [2, 4] было показано, что при газификации частицы углерода в парах воды имеется связь между скоростями реакций углерода с водяным паром и с двуокисью углерода. В результате для скорости реакции углерода с парами воды на единицу внутренней поверхности было получено выражение [4]:

$$W_h = 3.79 \cdot 10^4 [H_2O] \rho \exp\left(-\frac{36207}{T}\right) \quad (6)$$

где $[H_2O]$ - молярная концентрация паров воды.

Таким образом, выражения для скоростей основных реакций, протекающих при газификации пористых частиц углерода, известны, и задача может быть решена.

Состав продуктов газификации определяется через параметр

$$G = -\frac{\mu_c J_3}{\mu_3 \beta} \quad (7)$$

[4], который представляет собой отношение мольного потока паров воды к мольному потоку атомов углерода. Если параметр $G = 2$, то продуктом газификации является двуокись углерода, если же параметр $G = 1$, то продуктом газификации является одноокись углерода. Изменение этого параметра от 1

до 2 соответствует образованию в продуктах газификации как монооксида, так и двуоксида углерода.

Скорость газификации и состав продуктов газификации зависят от различных параметров, среди которых состав окисляющей среды, размер пористых частиц, температура печи и давление.

При увеличении давления, температуры печи и размера частицы углерода скорость газификации частицы возрастает. Но при увеличении скорости газификации температура частицы падает, вследствие протекания эндотермических реакций. Поэтому возрастание скорости газификации оказывается достаточно слабым, особенно при небольших величинах внутренней поверхности частицы.

Для получения СО в продуктах газификации нужно поддерживать достаточно высокую температуру частиц, что возможно либо при увеличении их размера, либо при увеличении температуры печи.

В пятой главе рассматривается газификация пористых частиц углерода в смеси паров воды и двуоксида углерода, что позволяет получить в результате газификации такие полезные продукты, как водород и монооксид углерода.

Скорость газификации частицы углерода и ее зависимость от параметров окружающей среды, температуры печи, давления и размера частиц должны определяться для частиц с одинаковой внутренней пористой структурой, так как величина внутренней поверхности существенно влияет на скорости протекания гетерогенных реакций внутри частицы [10-11]. Для частиц размером $a \approx 10^{-4}$ м. внутренняя поверхность изменяется в диапазоне $s \approx 1-10^3$ 1/м. Значение безразмерного параметра $S = \frac{sa}{\varepsilon}$ для таких частиц составит $S \approx 10^3 - 10^6$.

На рис. 4 показана зависимость скорости газификации частицы углерода от состава окружающей среды для условий $T_w = 1500$ К и $A = 1$ кг·м² / с,

что соответствует радиусу частиц $a \approx 1 \cdot 10^{-4}$ м, если положить, что $\varepsilon \rho D \approx 1 \cdot 10^{-4}$ кг/м·с.

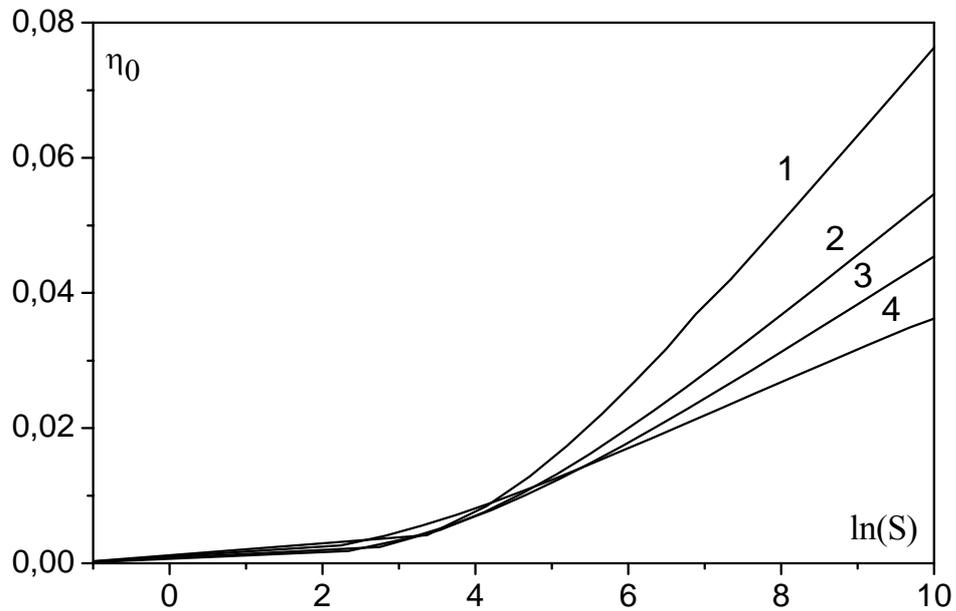


Рис. 4. Зависимость скорости газификации частицы углерода от внутренней поверхности частицы в смеси паров воды и двуокиси углерода для парциальных давлений паров воды: 1 – $p_3^\infty = 0.9$, 2 – 0.6, 3 – 0.4, 4 – 0.1.

При больших величинах внутренней поверхности частицы увеличение содержания паров воды в смеси паров воды и двуокиси углерода увеличивает скорость газификации частицы. Однако при малых величинах внутренней поверхности частицы увеличение концентрации паров воды и соответственное уменьшение концентрации двуокиси углерода приводит к уменьшению скорости газификации частицы, что указывает на то, что в этих условиях двуокись углерода становится более сильным окислителем, чем пары воды. Замена двуокиси углерода на инертный газ в смеси с парами воды в целом приводит к уменьшению скорости газификации частицы.

Представляет интерес рассмотреть влияние водорода в составе реакционных газов на процесс газификации. В [13] указывается, что водород является ингибитором реакции углерода с парами воды. Объяснение этому явлению пытаются найти, исследуя кинетический механизм реакции углерода с водяным паром. Однако следует отметить, что возможны и диффузионные явления, влияющие на скорость газификации.

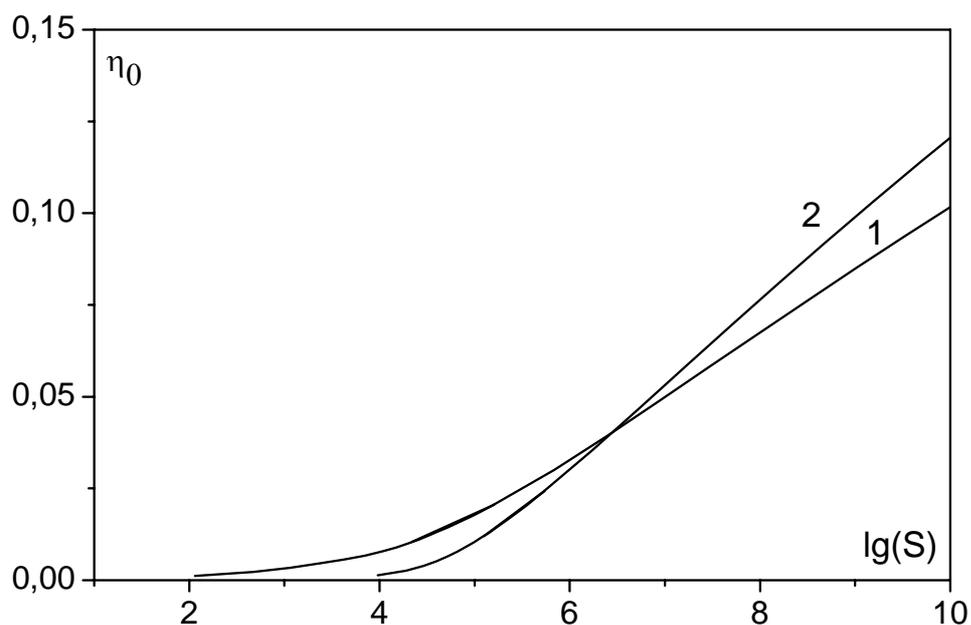


Рис. 5. Зависимость скорости газификации частицы углерода от внутренней поверхности частицы при разном содержании водорода в окружающей среде: 1 – 0, 2 – 20%.

На рис. 5 показаны зависимости скорости газификации частицы от величины внутренней поверхности при постоянном содержании водяного пара ($p_3^\infty = 0.8$), но разном содержании водорода в окружающей среде (кривая 1 - $p_4^\infty = 0$, 2 - 0.2). Как видно, при больших величинах внутренней поверхности частицы наличие водорода в окружающей среде увеличивает скорость газификации частицы углерода. Но при величинах внутренней поверхности

$\lg(S) < 6$ водород в окружающей среде резко замедляет процесс газификации. Такое уменьшение скорости газификации при наличии водорода связано с уменьшением температуры частицы и концентрации паров воды внутри частицы, связанной с увеличением концентрации водорода.

Распределение давления внутри пористой частицы для различных составов реакционной смеси показано на рис. 6. При газификации в чистом водяном паре давление в центре частицы в полтора раза превышает давление для случая газификации в чистой двуокиси углерода и составляет 3,5 атм. По-видимому, это связано со значительно меньшим молекулярным весом продуктов газификации.

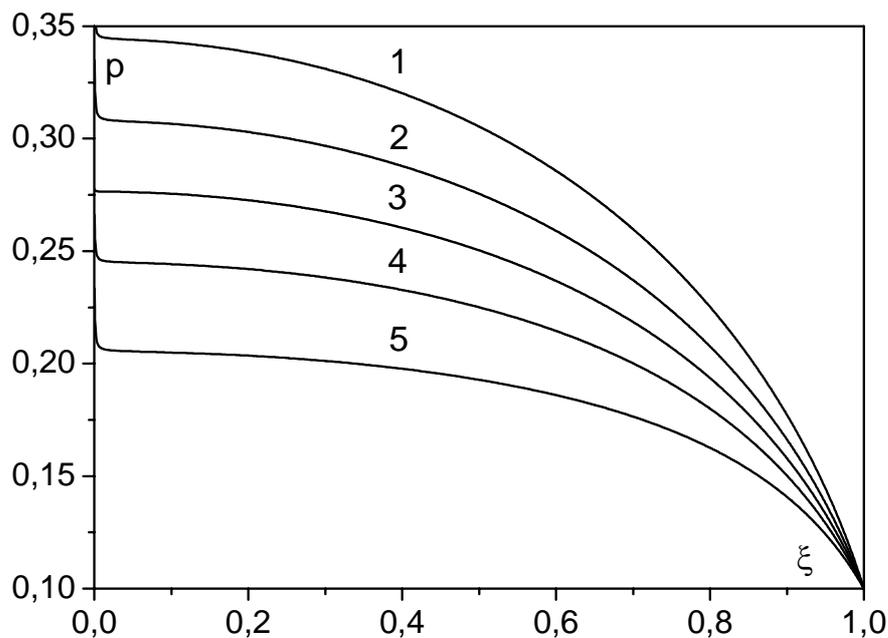


Рис. 6. Распределение давления внутри пористой частицы, H_2O/CO_2 , %:
1 – 100/0, 2 – 80/20, 3 – 60/40, 4 – 40/60, 5 – 20/80.

Увеличивая давление, также можно повышать скорость газификации. Однако ее рост не пропорционален увеличению давления, как можно было бы ожидать из кинетической зависимости, так как увеличение скорости газификации компенсируется снижением температуры частицы и уменьшени-

ем массовой доли паров воды в частице. Для поддержания достаточно высокой температуры частицы необходим большой тепловой поток от стенок печи. В случае низких температур частицы (высоких скоростей газификации) увеличение давления не приводит к увеличению содержания монооксида углерода в первичных продуктах газификации частицы.

Скорость газификации зависит от размера частиц и температуры печи [4, 11]. Для крупных частиц скорость газификации значительно повышается, так как увеличивается поток тепла излучением от частицы к поверхности печи, и режим горения становится диффузионным. При очень высоких температурах частицы (2400 К) и высоких величинах внутренней поверхности частицы также возможен переход к диффузионному режиму газификации, при котором гетерогенные реакции будут протекать только на поверхности частицы. При низких величинах внутренней поверхности частицы гетерогенные реакции протекают во всем объеме частицы. Вообще говоря, размер частиц, при котором режим горения изменяется на диффузионный, зависит от типа используемого угля [12]. Увеличение температуры печи также приводит к повышению содержания монооксида углерода в продуктах газификации [1, 4, 11].

Гетерогенные реакции взаимодействия углерода с парами воды и двуокисью углерода являются эндотермическими, следовательно, температура уменьшается по радиальной координате к центру частицы, однако это уменьшение происходит значительно при увеличении концентрации двуокиси углерода. Распределение температуры внутри частицы показано на рис. 7.

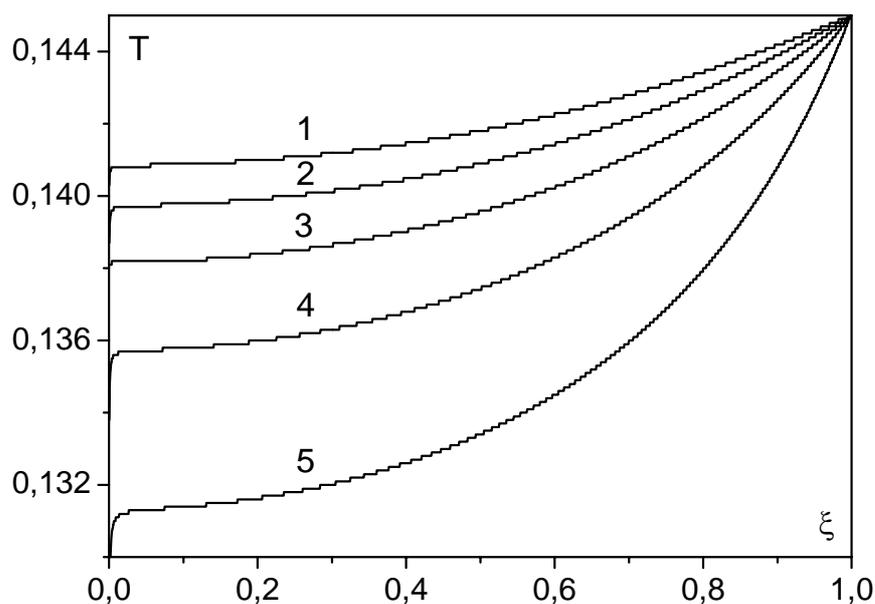


Рис. 7. Распределение температуры внутри пористой частицы, H_2O/CO_2 , %: 1 – 100/0, 2 – 80/20, 3 – 60/40, 4 – 40/60, 5 – 20/80.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- (1) Разработана диффузионно-кинетическая модель газификации пористых частиц углерода в реакционных газах, которая включает в себя уравнения переноса веществ и тепла внутри пористых частиц и в газовой фазе над их поверхностью, а также уравнения гидродинамики течения газа внутри пористой среды частицы.
- (2) Определены зависимости скорости газификации частиц в среде паров воды, двуокиси углерода и их смеси от размера частиц и величины их внутренней поверхности, а также давления, температуры печи и состава окружающей среды, в которой происходит процесс газификации. Показано, что при больших величинах внутренней поверхности частицы водяной пар является основным окислителем в смеси с двуокисью углерода. При

малых величинах внутренней поверхности эти окислители становятся практически равноценными.

- (3) Определены распределения давления и температуры внутри пористой частицы.
- (4) Для обеспечения преимущественного образования окиси углерода и водорода в первичных продуктах газификации на поверхности частицы, необходимо увеличение теплового потока к частице от стенок печи. Это может быть достигнуто за счет увеличения температуры печи или увеличение размера частиц, так как поток тепла излучением к частице от стенок печи пропорционален поверхности частицы.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- (1) Higman C., Burt M. van der. «Gasification». Gulf Professional Publishing, 2008.
- (2) Чуханов З. Ф. «Некоторые проблемы топлива и энергетики». М.: АН СССР, 1961.
- (3) Гремячкин В. М. «О кинетике гетерогенных реакций углерода с кислородом при горении пористых частиц углерода в кислороде» // Физика горения и взрыва, 2006, V. 42, № 3, P. 11.
- (4) Гремячкин В. М. «Взаимодействие пористой частицы углерода с парами воды» // Химическая физика, 2007, V. 26, № 5, P. 26.
- (5) Головина Е. С. «Высокотемпературное горение и газификация углерода». М.: Энергоатомиздат, 1983.
- (6) Бабий В. И., Куваева Ю. Ф. «Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела». М.: Энергоатомиздат, 1986.
- (7) Lee S., Angus J.C., Edwards R.V., Gardrer N.C. «Noncatalytic coal char gasification» // A.I.Ch.E. Journal, 1981, V. 30, P. 583.

- (8) Предводителей А. С., Хитрин Л. Н., Цуханова О. А. и др. «Горение углерода». М.-Л.: Академия наук, 1949.
- (9) Франк-Каменецкий Д. А. «Диффузия и теплопередача в химической кинетике». М.: Наука, 1987.
- (10) Klose W., Wolki M. «On the intrinsic reaction rate of biomass char gasification with carbon dioxide and steam» // Fuel, 2005, V. 84, P. 885.
- (11) Гремячкин В. М., Мазанченко Е. П. «Газификация пористой частицы углерода в парах воды» // Химическая физика, 2009, V. 28, № 8, P. 36.
- (12) Molina A., Mondragon F. «Reactivity of coal gasification with steam and CO₂» // Fuel, 1998, V. 77, P. 1831.
- (13) «Термодинамические свойства индивидуальных веществ». Справ./ Под ред. Глушко В.П. М.: Наука, 1978.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- (1) *Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П.* Газификация пористой частицы углерода в диоксиде углерода // ХФ. 2010. Т. 29. № 12. С. 1-6.
- (2) *Мазанченко Е.П., Гремячкин В.М.* Газификация пористой частицы углерода в двуокиси углерода // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Том 9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/010-01-12-032.pdf>.
- (3) *Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П.* Газификация пористой частицы углерода в парах воды // ХФ. 2009. Т. 28. № 8. С. 36-43.
- (4) *Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П.* Взаимодействие пористых частиц углерода с парами воды и двуокиси углерода // Тез. докл. на II Конференции по фильтрационному горению. Черноголовка: 11-15 октября 2010.
- (5) *Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П.* Газификация пористой частицы углерода в парах воды и двуокиси углерода // Горение твердого топлива: Сб.

докладов VII Всерос. конф. с междунар. участием. Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2009. Ч. 3. С. 4-10.

- (6) *Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П.* Газификация пористой частицы углерода в двуокиси углерода // Современные проблемы химической и радиационной физики. Москва, Черноголовка: ОИХФ РАН, 2009. С. 140-143.
- (7) *Mazanchenko E.P., Gremyachkin V.M.* Porous carbon particle gasification in carbon dioxide // Proc. VI Mediterranean Combustion Symposium. Porticcio-Ajaccio, Corsica, France: June 7-11, 2009. CD (Paper 045).
- (8) *Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П.* Горение пористой частицы углерода в парах воды // Тез. докл. на XIV Симпозиуме по горению и взрыву. Черноголовка: 13-17 октября 2009.
- (9) *Gremyachkin V.M., Mazanchenko E.P.* Gasification of porous carbon particle in steam // Proc 6th International seminar on flame structure. Brussels, Belgium: Sept. 14-17, 2008. CD (Paper OP-35).
- (10) *Gremyachkin V.M., Mazanchenko E.P.* Gasification of a porous carbon particle by steam // Abs. III International workshop «Nonequilibrium processes in combustion and plasma based technologies». Minsk, Belarus: August 23-28, 2008. P. 166-168.

Автор выражает благодарность научному руководителю проф. В.М. Гремячкину за постоянное внимание, ценные советы и большую помощь в работе, а также благодарит В.В. Кузенова, Д.В. Котова и весь коллектив лабораторий «Термогазодинамика и горение» и «Радиационная газовая динамика» ИПМех РАН за плодотворные обсуждения и полезные замечания.

**ГАЗИФИКАЦИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДА
В ПАРАХ ВОДЫ И ДВУОКСИ УГЛЕРОДА**

Мазанченко Екатерина Павловна

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати 28.09.2010 г. Заказ № 45-2010. Тираж 90 экз.

Отпечатано на ризографе Учреждения Российской академии наук
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.