

ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЯ В ПЛОТНОМ СЛОЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ОБРАЩЕННОГО ПРОЦЕССА

Д.Р. Таймасов¹, Е.Е. Пермяков¹, Худрээ Улзийсайхан², П.К.Сеначин^{1, 3}
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Рассматривается принципиальная технологическая схема и математическая модель физико-химических процессов получения генераторного газа в окислительной и восстановительной зонах в плотном слое газогенератора обращенного процесса (ГОП).

Ключевые слова: газогенератор плотного слоя, обращенный процесс, математическая модель, численное моделирование.

COAL GASIFICATION IN THE DENSE LAYER OF THE GAS GENERATOR FACING PROCESS

D. R. Taimasov, E. E. Permyakov, Hydreia Ulziisaikhan, P. K. Senachin
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul

Discusses the process flow diagram and mathematical model of physico-chemical processes for the production of generator gas in the oxidizing and reducing zones in the dense layer facing the gas generator of the process (GOP).

Keywords: gasifier dense layer facing the process, mathematical model, numerical simulation.

Введение

Целью данной работы является разработка физико-химической модели активных зон газогенератора плотного слоя обращенного процесса (ГОП), работающего на угле или брикетированном твердом топливе различного происхождения. На рисунке 1 приведена упрощенная принципиальная схема ГОП, из которой видно, что основное отличие ГОП от газогенератора прямого процесса состоит в том, что дутьевые газы и медленно опускающийся плотный слой топлива движутся сверху вниз в попутном направлении, а не на встречу друг другу [1, 2].

Предлагаемая модифицированная принципиальная схема ГОП

Предлагаемая модель газогенератора несколько отличается от схемы, приведенной на рисунке 1. Основное отличие состоит в том, что между II и III зонами находится довольно протяженная инертная зона 0 (в которой практически не протекают ни какие физико-химические процессы). Причем зоны I, II и 0 теплоизолированы футеровкой. В конце II зоны летучие и пиролизные газы отводятся в рядом расположенный котел-утилизатор (воздухо- и водоподогреватель), где сгорают с воздухом. Значительная часть продуктов сгорания летучих и пиролизных газов подает-

ся в зону I ГОП для обеспечения процесса полукоксования. Основное дутье для процесса газификации (воздух и пар) подается в начале зоны III ГОП. Таким образом, основные физико-химические процессы газификации протекают в зонах III и IV при наличии минимального (незначительного) количества пиролизных газов, которые полностью сгорают в зоне III. Реактор ГОП в районе зон III и IV окружен водяной рубашкой (пароперегревателем).

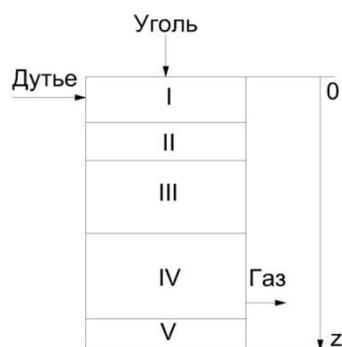


Рисунок 1 – Газогенератор обращенного процесса (ГОП): I – зона сушки; II – зона выхода летучих; III – окислительная зона; IV – восстановительная зона; V – зольная подушка

Математическая модель ГОП

На вход газогенератора – в модели условно будем полагать начало зоны III ($z = 0$) - подаётся дутьевая смесь (воздуха с водяным паром). На поверхности твердых частиц (брикетов) протекают гетерогенные (1-4), а в поровом пространстве - гомогенные (5-7) реакции макрокинетики (рассматриваем совместную модель для окислительной III и восстановительной IV зон реактора), соответствующим тепловым эффектом [3]:

- 1) $C + O_2 = CO_2 + 393,3$ кДж/моль;
- 2) $C + CO_2 = 2CO - 172,4$ кДж/моль;
- 3) $C + H_2O = CO + H_2 - 131,4$ кДж/моль;
- 4) $C + 2H_2 = CH_4 + 74,9$ кДж/моль.
- 5) $2CO + O_2 = 2CO_2 + 565,7$ кДж/моль;
- 6) $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 483,7$ кДж/моль,
- 7) $CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 41,0$ кДж/моль;

Примем для обозначения фаз рассматриваемой гетерогенной системы индексы для твёрдой фазы - «C» - твёрдый реагент, «b» - балласт, а для обозначения компонентов газовой фазы – общий индекс «j», в том числе «1» - кислород O_2 , «2» - азот N_2 , «3» - водяной пар H_2O , «4» - двуокись углерода CO_2 , «5» - окись углерода (монооксид) CO , «6» - водород H_2 , «7» - метан CH_4 . С целью учёта реального состава атмосферного воздуха, аргон Ar условно заменяем азотом N_2 . Полагаем, что скорость каждого j -го компонента газовой фазы относительно твёрдой фазы равна скорости фильтрации $w_j = w_\phi$, а скорость движения твердой фазы относительно стенки реактора постоянна $u_C = const$.

Запишем уравнения, описывающие процесс газификации (рис. 1) [1, 4, 5]:

- уравнения неразрывности для каждого j -го компонента газовой фазы

$$\frac{d}{dz} \sum_j \rho_j (w_\phi + u_C) = \sum_j M_j \sum_i \xi_{ij} W_i$$

для конкретных газов запишутся в виде

$$\rho_1 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_1}{dz} = -M_1(W_1 + W_5 + W_6), \quad (1)$$

$$\rho_2 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_2}{dz} = 0, \quad (2)$$

$$\rho_3 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_3}{dz} = M_3(-W_3 + 2W_6 + W_7), \quad (3)$$

$$\rho_4 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_4}{dz} = M_4(W_1 - W_2 + 2W_5 + W_7), \quad (4)$$

$$\rho_5 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_5}{dz} = M_5(2W_2 + W_3 - 2W_5 - W_7), \quad (5)$$

$$\rho_6 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_6}{dz} = M_6(W_3 - 2W_4 - 2W_6 + W_7), \quad (6)$$

$$\rho_7 \frac{dw_\phi}{dz} + (w_\phi + u_C) \frac{d\rho_7}{dz} = M_7 W_4, \quad (7)$$

где ρ_j - действительная плотность j -го компонента газовой фазы, w_ϕ - скорость фильтрации относительно твёрдой фазы, M_j - молярная масса j -го компонента, W_i - скорость i -й гетерогенной или гомогенной реакции (для продуктов реакции знак «+»);

- уравнение неразрывности для твёрдой фазы

$$\rho_C^0 u_C \frac{d\eta}{dz} = M_C (W_1 + W_2 + W_3 + W_4), \quad (8)$$

где η - глубина выгорания угля (изменяется от 0 до 1), ρ_C^0 - начальная плотность углерода, M_C - молярная масса углерода;

- общее для всей гетерогенной системы уравнение теплового баланса (изотермическое приближение $T(z) = T_g(z) = T_C(z)$ для любой заданной толщины плотного слоя толщиной от z до $z + dz$)

$$\left[(w_\phi + u_C) \sum_j c_j \rho_j + u_C (c_C \rho_C^0 (1 - \eta) + c_b \rho_b) \right] \times \frac{dT}{dz} = \frac{d}{dz} \lambda \frac{dT}{dz} + \sum_i W_i Q_i - \frac{\alpha}{r_{gen}} (T - T_0), \quad (9)$$

где c_j - теплоемкость j -го компонента газовой фазы, c_C - теплоёмкость углерода, c_b - теплоемкость балласта, ρ_b - плотность

балласта, Q_i - молярная теплота i -й гомогенной или гетерогенной реакций, λ - приведённый коэффициент теплопроводности пористой среды, α - приведённый коэффициент теплоотдачи между пористой средой и стенкой реактора с температурой T_0 , r_{gen} - внутренний радиус газогенератора;

- уравнение закона Дарси (для пористых сред)

$$\frac{dp}{dz} = \frac{w\phi}{k\phi}, \quad (10)$$

где p - давление, $k\phi$ - коэффициент фильтрации, который можно вычислить, используя соотношение Козени-Кармана [6] (следует отметить, что закон применим для чисел Рейнольдса меньше или порядка единицы);

- уравнения состояния для j -х компонентов газовой фазы

$$p = \sum_j p_j = RT \sum_j \frac{\rho_j}{M_j}, \quad (11)$$

- уравнения скорости i -й газовой фазы (гомогенной) реакции

$$W_i = k_i \prod_j A_{ij}^{\xi_{ij}} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad (12)$$

- макрокинетический закон горения кокса (скорость реакции) по i -м реакциям газификации углерода с j -м компонентом газовой фазы

$$W_i = K_{Ci} K_{Si} (1-\eta), \quad (13)$$

$$S_C = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_0 \left(1 + \frac{\rho_C^0 / \rho_b}{100/A^r - 1}\right)},$$

$$K_{Si} = S_C \frac{A_{ij} / \xi_{ij}}{\sum_j A_j},$$

$$K_{Ci} = \frac{\beta_i A_{ij}}{\frac{1}{k_{wi}} + \frac{d_0}{Nu_D D_j}},$$

$$k_{wi} = k_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right),$$

где S_C - приведенная площадь активной поверхности угля, A^r - зольность угля в %, ε - порозность пористой среды, d_0 - средний диаметр частиц (брикетов) пористой среды, K_{Si} - коэффициент площади i -й реакции га-

зификации, A_{ij} - концентрация j -го компонента газовой фазы участвующей в i -й реакции, ξ_{ij} - стехиометрический коэффициент, Nu_D - диффузионное число Нуссельта, D_j - коэффициент диффузии j -го компонента, k_{wi} - кинетическая скорость i -й реакции, вычисляемая исходя из закона Аррениуса с энергией активации E_i и предположения о существовании полюса скоростей [7].

Система (1)-(13) дополняется двумя замыкающими уравнениями:

- уравнение альтернативного условия прекращения горения

$$p(1-\eta) = 0, \quad (14)$$

- кинематическое условие стационарности процесса (скорости горения на фронте пламени w_f или относительно стенки реактора u_f)

$$u_f = u_C - w_f = 0. \quad (15)$$

Граничные условия задачи учитывают, что рассматривается проточный реактор с теплоизолированным входом (секции I и II) и секцией V с отводящим генерируемый газ устройством, нарушающим сплошность движения твердофазных компонентов, то есть имеем:

(на входе в реактор, начало зоны III, при $z=0$)

$$p = p_0, \quad T = T_0, \quad w_f \sum_j \rho_j = m_{gas}^0,$$

$$A_j = A_j^0, \quad \rho_C = \rho_C^0, \quad \frac{dT}{dz} = 0, \quad (16)$$

(на выходе из реактора, начало зоны V, при $z=h$)

$$p \neq p_0, \quad \eta = 0, \quad \frac{dT}{dz} = 0. \quad (17)$$

Кроме того, на фронте пламени имеем

$$z = z_f, \quad \frac{dT}{dz} = 0, \quad A_1 = A_{O_2} = 0. \quad (18)$$

Численное решение задачи

Система уравнений (1)-(18) решается численным интегрированием методом Рунге-Кутты путем последовательных итераций.

Отметим, что в настоящее время существует несколько альтернативных физико-химических моделей горения твердого топлива в пористых средах [8-12].

Список литературы

1. Загрутдинов, Р.Ш. Технологии газификации в плотном слое: Монография / Р.Ш. Загрутдинов, А.Н. Нагорнов, А.Ф. Рыжков, П.К. Сеначин и др.; под ред. П.К. Сеначина. - Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2009. - 296 с.
2. Загрутдинов, Равиль. Газификация в плотном слое: Цикл статей / монография / Равиль Загрутдинов, Павел Сеначин, Михаил Никишанин. – Saarbrücken, Deutschland / Германия: Изд-во «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2016. – 168 с.
3. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 480 с.
4. Нагорнов, А.Н. Физико-химические основы горения и газификации углей в плотном слое газификатора Lurgi / А.Н. Нагорнов, Р.Ш. Загрутдинов, П.К. Сеначин, С.М. Кисляк, Р.М. Утемесов // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008): Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, АлтГТУ им. ИИ. Ползунова, 1-4 октября 2008. - Барнаул: ОАО «Алтайский дом печати», 2008. - С. 380-397.
5. Зайцев, А.В. Газогенераторные технологии в энергетике: Монография / А.В. Зайцев, А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин, Р.Ш. Загрутдинов, А.В. Попов, Т.Ф. Богатова и др. Под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: ООО Изд-во «Сократ», 2010. – 612 с.
6. Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. - Л.: Химия, 1979. - 176 с.
7. Леонтьев, Н.Е. Основы теории фильтрации: Учебное пособие / Н.Е. Леонтьев. - М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. - 88 с.
8. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. - 312 с.
9. Ярин, Л.П. Основы теории горения двухфазных сред / Л.П. Ярин, Г.С. Сухов. –Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 240 с.
10. Степанов, С.Г. Математическая модель газификации угля в слоевом реакторе / С.Г. Степанов, С.Р. Исламов // Химия твёрдого топлива. - 1991. - № 2. - С. 52-58.
11. Кузоватов, И.А. Численное моделирование физико-химических процессов в слоевом газификаторе / И.А. Кузоватов, А.А. Гроо, С.Г. Степанов // Вычислительные гии. - 2005. - Т.10. №5. - С. 39-48.
12. Ворончихина, Т.С. Компьютерная модель нестационарных процессов при слоевой газификации угля / Т.С. Ворончихина, В.С. Славин, С.Р. Исламов.// Сибирский физико-технический журнал. - 1993. - Вып. 3. - С. 85-90.

Таймасов Д.Р.¹, магистрант АлтГТУ,
Пермяков Е.Е.¹, аспирант АлтГТУ,
Улзийсайхан Худрээ^{1,2}, магистрант
 АлтГТУ,

Сеначин П.К.^{1,3}, профессор каф. ДВС
 АлтГТУ, д.т.н., проф., senachinpk@mail.ru

¹ Алтайский государственный технический
 университет имени И.И. Ползунова, г. Барнаул

² «Их монгол» хотхон 94/103 (УТО LLC),

Улаанбаатар хот, Монголия

³ Институт теплофизики СО РАН, г. Ново-
 сибирск