

Вторая секция. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ ОКИСЛИТЕЛЯ

А.Э. Новиков

Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5Б95

Твердое топливо имеет широкое применение, в частности, оно используется для получения из него горючего газа, а сам процесс называется газификацией. Процессы газификации топлива и горения являются весьма схожими между собой. Схожесть заключается в том, что оба процесса несут в себе окисление твёрдого топлива, посредством химических реакций и продуктов, образовавшихся во время пиролиза. В первом процессе – газификации, окисляющей средой является водяной пар с добавлением кислорода, а во втором процессе – горении, окислителем является только кислород. Но всё же, разница между процессами есть, она заключается в том, что во время горения топливо окисляется полностью, процесс протекает в условиях избытка кислорода, а процесс газификации происходит в условиях дефицита кислорода, при этом не происходит полного окисления топлива [1].

Физическая постановка задачи газификации заключается в том, что через цилиндрическую капсулу, которая заполнена коксом, происходит дутьё высокотемпературным паровым или парокислородным окислителем [2].

Основываясь на математическую модель, производилось моделирование нестационарного режима теплопереноса при конверсии кокса в среде парокислородного окислителя [3].

Исследуемый процесс конверсии кокса описывается следующими уравнениями:

- уравнение сохранения массы золы и кокса

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = -R_C, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_S R_C, \quad R_C = R_{C1} + R_{C2} + R_{C3} + R_{C4}; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_5 \varphi_5)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_5 \varphi_5 v)}{\partial z} = R_C; \quad (2)$$

- уравнение неразрывности α – компоненты газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha)}{\partial \tau} + v \frac{\partial(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z}) + R_{S\alpha} + R_{S\alpha}, \quad \alpha = \overline{1,4}; \quad (3)$$

- уравнение сохранения энергии газовой фазы

$$\rho_5 \varphi_5 c_{P5} \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda_5 + \lambda_R) \varphi_5 \frac{\partial T}{\partial z} \right) - A_S (T - T_S) + q_{CO}^1 R_{CO}^1 + q_{CO}^2 R_{CO}^2 + q_{H_2} R_{H_2} - \frac{2}{r_0} \alpha_1 \varphi_5 (T - T_S); \quad (4)$$

- уравнение сохранения энергии твердой фазы (золы и кокса)

$$\sum_{i=3}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_S}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z}) + q_{C1} R_{C1} + q_{C2} R_{C2} - q_{C3} R_{C3} - q_{C4} R_{C4} + A_S (T - T_S) + \frac{2 \cdot r_1}{r_0^2} \alpha_2 (T_S - T_E) + q_R; \quad (5)$$

- уравнение движения газа в порах (квадратичный закона фильтрации) и уравнения состояния

$$v = -\frac{k}{\mu + k \cdot \beta \cdot \rho_5 |V|} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \quad p = \frac{\rho_5 \cdot R \cdot T}{M_5}. \quad (6)$$

Система уравнений (1) – (6) решалась при краевых условиях:

$$\tau = 0: \quad \varphi_i = \varphi_{iH}, \quad i = \overline{3,4}; \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1,4}, \quad T = T_S = T_H, \quad p = p_H; \quad (7)$$

$$z = 0: \quad T = T_G, \quad (p\nu)_w = const, \quad \lambda_S \cdot \frac{\partial T_S}{\partial z} = \alpha_1 \cdot (T_S - T_G), \quad c_\alpha = c_{\alpha G}, \quad (8)$$

$$z = h: \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad p = p_H, \quad \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} = 0.$$

При проведении численных расчетов использовались теплофизические и кинетические параметры [3]. Некоторые результаты численных расчетов приведены ниже.

На рисунке 1 приведен профиль температуры газообразных продуктов по длине капсулы, в которой проводилась газификация кокса.

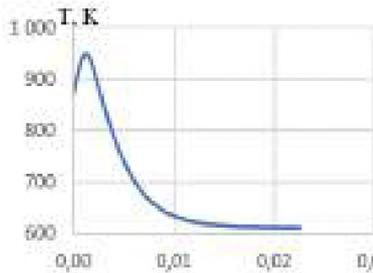


Рис. 7. Профиль температуры в газовой фазе по длине газификатора

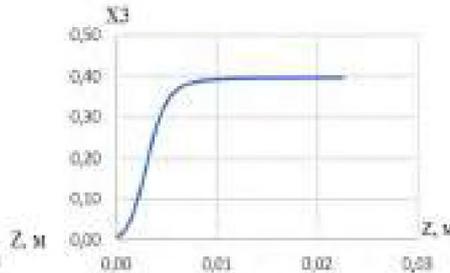


Рис. 2. Профиль объёмной доли кокса

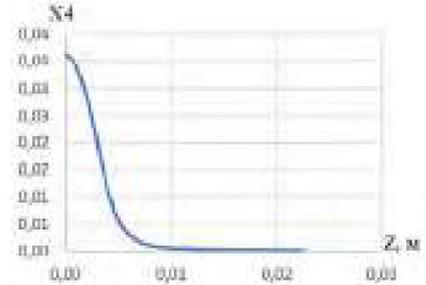


Рис. 3. Профиль объёмной доли золы

Из рисунка 1 следует, что температура по длине газификатора уменьшается и имеет максимум на некотором расстоянии от нижнего основания газификатора, через которое осуществляется подача окислителя. В области высоких температур объёмная доля кокса минимальная (рисунок 2), а золы максимальная (рисунок 3).

Кроме исследования физики процесса при газификации кокса были произведены расчеты для установления состава газообразных продуктов на выходе из газификатора, называемым верхней границе капсулы при развитом процессе газификации (полном прогреве образца). Состав продуктов газификации (синтез газа) определяется при различном содержании кислорода в парокислородном окислителе. Состав продуктов газификации при разном содержании кислорода в окислителе приведён в таблице 1.

Таблица 1. Объёмный состав газообразных продуктов на выходе из образца, при температуре окислителя 873 К и разном содержании кислорода в окислителе

| Максимальная температура окислителя, К | Максимальная температура кокса, К | O ₂ , % | CO, % | CO ₂ , % | H ₂ , % | H ₂ O, % |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0 | | | | | | |
| 856,44 | 839,54,54 | 0 | 0,1 | 0,138 | 0,443 | 99,319 |
| Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,05 | | | | | | |
| 881,47 | 924,82 | 0,6 | 0,54 | 3,05 | 2,09 | 93,72 |
| Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,1 | | | | | | |
| 906,75 | 1134,6 | 0,21 | 2,09 | 12,67 | 18,4 | 66,63 |
| Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,15 | | | | | | |
| 918,65 | 1332,1 | 0,16 | 6,22 | 22,03 | 39,02 | 32,57 |
| Состав продуктов газификация при массовой доле кислорода в парокислородном окислителе равной 0,2 | | | | | | |
| 927,05 | 1617,2 | 0,12 | 21,74 | 20,01 | 51,83 | 6,3 |

В ходе анализа таблице 1 можно сделать вывод о том, что при увеличении концентрации кислорода в окислителе температура процесса газификации увеличивается, что приводит к увеличению концентрации CO и H₂ в продуктах газификации, концентрация диоксида углерода (CO₂) вначале растет, а при больших температурах газификации начинает уменьшаться.

Доля водяного пара в продуктах газификации с увеличением концентрации кислорода в окислителе (увеличением температуры процесса) резко уменьшается. Кислород в получаемом газе присутствует, но его доля мала.

Следовательно, при газификации твердого топлива, при сравнительно невысоких температурах, получается горючий газ с весомой примесью диоксида углерода, а не чистый синтез газ. В работе [4] было показано, что можно получать, при высоких температурах, чистый синтез газ (без примесей), при газификации угольного кокса в среде высокотемпературного парового окислителя. При газификации древесных отходов наличие примеси в синтез газе [5] объясняется сравнительно низкой температурой процесса. При газификации кокса при высоких температурах начинается более интенсивное его окисление диоксидом углерода ($C + CO_2 = 2CO$) в результате чего при высоких температурах процесса диоксид углерода может полностью расходоваться и отсутствовать в синтез газе.

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.В. Померанцев. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов; 2-е издание переработанное и дополненное / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
2. Еркинов Д.Е., Еркинов М.Е., Субботин А.Н. Моделирование газификации твердого топлива в высокотемпературной среде окислителя / Энергетика и энергосбережение: теория и практика // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, 13 – 15 декабря 2017. – Кемерово: КузГТУ, 2017. статья № 125.
3. Р.Н. Кулеш. Математическое моделирование тепломассопереноса при подземной газификации угля / Р.Н. Кулеш, А.С. Мазаник, А.Н. Субботин // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 25–32.
4. R.N. Aryukov. Physical Model and Bases of Mathematical Modelling of Above-Surface Gasification of Coal. Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016) / R.N. Aryukov and A.N. Subbotin // MATEC Web Conf. Volume 72, 2016, Article Number 01003, Number of page(s) 5. Свободный доступ из сети Интернет.
5. Е. Данильченко. Моделирование тепломассопереноса при газификации отходов древесины сосны в высокотемпературной среде окислителя / Е. Данильченко, М.И. Лушников, А.Н. Субботин. Инновационные исследования: теоретические основы и практическое применение: сборник статей Международной научно – практической конференции (24 мая 2020г., г. Саратов). В 3-х ч., Ч. 3 – Уфа: OMEGA SCIENCE, 2020. – С. 5–11.

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.Н. Субботин, профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.