

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 662.749

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ СЛАНЦЕВОГО ПОЛУКОКСА В ЦИКЛОННОЙ ТОПКЕ

А.А. МОРЕВ, А.Н. МРАКИН, А.А. СЕЛИВАНОВ

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

Разработана математическая модель процесса горения сланцевого полукокса в циклонной топке, учитывающая характеристики коксозольных частиц, кинетику выгорания углерода, а также процесс разложения карбонатов в зольном остатке, получаемом в результате дожигания полукокса. Приводятся блок-схема алгоритма расчета и результаты численного эксперимента, выполненного на разработанной математической модели. Показано влияние содержания углерода в сланцевом полукоксе на габаритные характеристики циклонной топки и температуру дымовых газов.

Ключевые слова: кинетика, полукокс, псевдооживленный слой, сернистый горючий сланец, циклонная топка.

В результате проведенных ранее исследований [1] было доказано, что для комплексной энерготехнологической переработки сернистых горючих сланцев и получения на её основе ценных химических веществ, в том числе сераорганических соединений тиофенового ряда, наиболее целесообразным является использование реакторов псевдооживленного слоя.

Согласно принципиальной технологической схеме реакторного блока полукоксования сернистого горючего сланца в псевдооживленном слое [1], для сушки исходного сланца используются дымовые газы, получаемые при сжигании сланцевого полукокса в циклонной технологической топке. Выбор циклонной топки в качестве устройства для сжигания сланцевого полукокса обусловлен высокими показателями интенсивности процессов тепло- и массообмена, при которых тепловое напряжение топочного объема в вертикальных циклонных камерах достигает 1750 кВт/м^3 , в горизонтальных – 4650 кВт/м^3 [1].

Температурный уровень в циклонной топке определяет условия работы сушилки исходного сланца и зольного теплообменника. Поэтому важной задачей является создание математического описания процесса горения сланцевого полукокса в циклонной камере, учитывающего характеристики коксозольных частиц, кинетику выгорания углерода, а также процесс разложения карбонатов в зольном остатке, получаемом в результате дожигания сланцевого полукокса.

Процесс горения сланцевого полукокса в циклонной топке в определяющей степени зависит от качественных характеристик коксозольных частиц. В циклонную камеру направляется смесь коксозольных частиц широкого полифракционного состава. Более крупные частицы, многократно циркулируя в объеме топочной камеры, сепарируются на цилиндрическую стенку, где находятся до момента полного выгорания углерода из сланцевого полукокса, а более мелкие частицы, не успев достигнуть стенки, догорают в объеме циклонной камеры [2].

На рис. 1 показан общий вид циклонной камеры. Расчет аэродинамики и определение коэффициента сопротивления циклонной топки производились на основе методики аэродинамического расчета циклонных камер с незагруженным объемом [3], предложенной Э.Н. Сабуровым. Особенности аэродинамики циклонной камеры, главным образом, определяются её геометрией. Основными геометрическими характеристиками циклонных камер являются: диаметр D и длина L камеры; диаметр d и длина l_c выходного сопла; ширина b , высота h и число входных каналов $a_{вх}$.

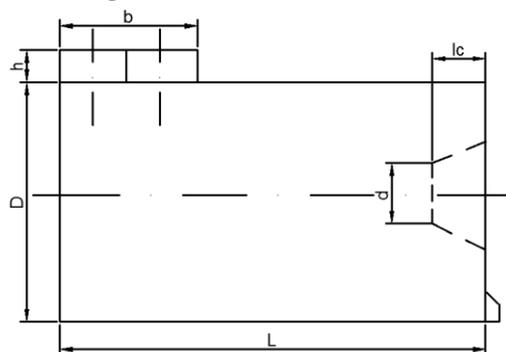


Рис. 1. Общий вид циклонной камеры

Определяющим размером является диаметр циклонной камеры, по отношению к которому выбираются все остальные размеры. Для энергетических горизонтальных циклонных камер рекомендуются следующие основные конструктивные соотношения [2]:

$$L = 1,25D; \quad (1)$$

$$d = 0,44D; \quad (2)$$

$$l_c = 0,25D. \quad (3)$$

Диаметр циклонной камеры определяется исходя из задаваемой производительности и теплового напряжения камеры [2]:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot B \cdot Q_H^P}{\pi \cdot q_F}}, \quad (4)$$

где B – расход полукокса, кг/с; Q_H^P – низшая теплота сгорания полукокса, кДж/кг; q_F – тепловое напряжение сечения циклонной камеры, кВт/м².

Согласно исследованиям [4], процесс выгорания углерода из сланцевого полукокса происходит во всем объеме исходных частиц. На такой основе для описания процессов в циклонной топке могут быть использованы теоретические положения гетерогенного горения, доказанные обширным экспериментальным материалом [4, 5]. При этом в качестве рабочей гипотезы может быть принят вариант описания процесса догорания углерода, равномерно распределенного в процессе полукоксования по зольной поверхности сланцевого полукокса.

Если принять цилиндрическую форму пор с диаметром d_{Π} , то уравнение для определения удельной поверхности коксозольных частиц S_v , $\text{м}^2/\text{м}^3$, можно записать в следующем виде:

$$S_v = 6\left(\frac{\xi}{d_{\Pi}} + \frac{1}{d_{\text{кз}}}\right), \quad (5)$$

где $d_{\text{кз}}$ – средний диаметр коксозольных частиц, м; ξ – пористость коксозольного остатка, %.

По полученному значению S_v , с использованием кажущейся плотности коксозольных частиц $\rho_{\text{к}}$, можно определить удельную массовую поверхность S_M , ($\text{м}^2/\text{кг}$):

$$S_M = \frac{S_v}{\rho_{\text{к}}}. \quad (6)$$

Для определения значения среднего диаметра полифракционной смеси коксозольных частиц было использовано выражение [1]:

$$d_{\text{кз}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot d_{\text{min}}^2 \cdot d_{\text{max}}^2}{d_{\text{min}} + d_{\text{max}}}}, \quad (7)$$

где d_{min} , d_{max} – соответственно минимальный и максимальный диаметры коксозольных частиц, м.

Согласно теории гетерогенного горения, основополагающее уравнение кинетики горения частицы твердого топлива имеет вид [5]

$$\frac{d(d_{\text{ч}})}{d\tau} = -\frac{2K_S^C}{\rho_{\text{С}}}, \quad (8)$$

где $d_{\text{ч}}$ – диаметр углеродной частицы, м; $\rho_{\text{С}}$ – плотность углерода, $\text{кмоль}/\text{м}^3$; K_S^C – удельная поверхностная скорость выгорания углерода, определяемая как количество углерода, прореагировавшего за единицу времени на единице поверхности сферической углеродной частицы, $\text{кмоль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Однако использование данного уравнения для описания процесса догорания углерода сланцевого полукокса невозможно. Это связано с высокой зольностью сланцевого полукокса, неправильной (отличной от шарообразной) формой коксозольных частиц, а также с принятыми нами условиями равномерного распределения углерода по пористой поверхности сланцевого полукокса. При таком предположении не может идти речь о скорости уменьшения диаметра углеродной частицы, как это приведено в уравнении (8).

Процесс выгорания углерода с поверхности коксозольных частиц может быть записан в виде двух реакций:



Содержание углерода в сланцевом полукоксе может быть записано в следующем виде:

$$g = \delta \cdot S_M \cdot \rho_{\text{С}}, \quad (11)$$

где δ – толщина пленки углерода на пористой (внешней и внутренней) поверхности минеральной основы полукокса, м; S_M – удельная массовая поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$; $\rho_{\text{С}}$ – плотность углерода, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для описания кинетики выгорания углерода с поверхности сланцевого полукокса использовалось уравнение [5]

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{K_S^C}{\rho_C^C}, \quad (12)$$

где K_S^C – удельная поверхностная скорость выгорания углерода, кмоль/м²·с; ρ_C^C – плотность углерода, кмоль/м³.

Величину K_S^C можно определить, воспользовавшись следующим выражением [5]:

$$K_S^C = (K_1 + 2K_2) \cdot C_{O_2} \cdot x, \quad (13)$$

где K_1 и K_2 – константы скорости реакций (9) и (10), м/с; C_{O_2} – концентрация кислорода в объеме газовой фазы (текущее значение), кмоль/м³; $x = \frac{(g_0 - g)}{g_0}$ – доля

остаточного углерода в сланцевом полукоксе после частичного выгорания.

Таким образом, совместное использование выражений (12) и (13) позволяет получить зависимость, пригодную для поинтервального (по времени) расчета уменьшения толщины δ пленки углерода:

$$\Delta\delta = -\frac{(K_1 + 2K_2)}{\rho_C^C g_0} (C_{O_2,0} - \sum_1^{i-1} C_{O_2,i}) (g_0 - \sum_1^{i-1} \Delta g_i) \cdot \Delta\tau, \quad (14)$$

где $\Delta\tau$ – выбранный интервал расчета по времени, с; $\sum_1^{i-1} \Delta g_i$ – суммарное количество догоревшего углерода за время, предшествующее расчетному интервалу, кг/100 кг сух. сл.; g_0 – содержание углерода в исходном сланцевом полукоксе, кг/100 кг сух. сл.; $C_{O_2,0}$ – концентрация кислорода в исходном дутьевом воздухе, кмоль/м³; $\sum_1^{i-1} C_{O_2,i}$ – снижение содержания кислорода в газовой фазе за время, предшествующее расчетному интервалу, кмоль/м³.

Для определения значений констант скорости реакций (9) и (10) должны быть использованы значения предэкспоненциального множителя и энергии активации. Приведенные в большом количестве публикаций [6, 7, 8] значения K_0 и E характеризуются большим разбросом:

$$K_{01} = (0,6 \div 7,9) \cdot 10^3 \text{ м/с}; \quad K_{02} = (10,8 \div 12,6) \cdot 10^3 \text{ м/с};$$

$$E_1 = (40 \div 120) \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}; \quad E_2 = (55 \div 170) \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}.$$

Для описания процесса догорания углерода из сланцевого полукокса были приняты полученные в результате предварительных многовариантных расчетов на математической модели кинетические характеристики, соответствующие минимальным размерам циклонной камеры:

$$K_{01} = 0,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}; \quad K_{02} = 10,8 \cdot 10^3 \text{ м/с};$$

$$E_1 = 110 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}; \quad E_2 = 130 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}.$$

Для поинтервального (по времени) расчета процесса выгорания углерода с поверхности сланцевого полукокса необходимо составить уравнение теплового баланса с учетом ряда особенностей процесса: на любом расчетном интервале будет иметь место изменение расхода и состава газовой фазы; суммарные тепловыделения на

каждом временном интервале расчета должны учитывать тепловой эффект разложения карбонатов кальция и магния, который с видимой скоростью начинается в пределах температур 700–840 °С, кроме того образующийся при этом диоксид углерода включается в состав газовой фазы. Уравнение теплового баланса показано ниже:

$$(g''_{\text{ПК}} \cdot c''_{\text{ПК}} + V''_{\text{Г}} \cdot c''_{\text{Г}}) \cdot t'' = (g'_{\text{ПК}} \cdot c'_{\text{ПК}} + V'_{\text{Г}} \cdot c'_{\text{Г}}) \cdot t' + Q_{\text{ЭКЗ}} - Q_{\text{ЭНД}}, \quad (15)$$

где t' и t'' – температура газозвеси, соответственно, в начале и в конце временного интервала, °С; $g'_{\text{ПК}}$ и $g''_{\text{ПК}}$ – расход сланцевого полукокса, соответственно, в начале и в конце временного интервала, кг/100 кг сух. сл.; $c'_{\text{ПК}}$ и $c''_{\text{ПК}}$ – теплоемкость полукокса, соответственно, в начале и в конце временного интервала, кДж/кг·К; $V'_{\text{Г}}$ и $V''_{\text{Г}}$ – объем газовой фазы, соответственно, в начале и в конце временного интервала, м³/100 кг сух. сл.; $c'_{\text{Г}}$ и $c''_{\text{Г}}$ – теплоемкость газовой фазы, соответственно, в начале и в конце временного интервала, кДж/м³·К; $Q_{\text{ЭКЗ}}$ – суммарный экзотермический эффект догорания углерода по реакциям (9) и (10), кДж/100 кг сух. сл.; $Q_{\text{ЭНД}}$ – суммарный эндотермический эффект разложения карбонатов кальция и магния по реакциям:



Согласно проведенным исследованиям [4] установлено, что кинетические характеристики для чистого карбоната кальция близки константам, описывающим суммарное разложение карбонатов в сланце. Поэтому для определения количества разложившихся карбонатов кальция и магния могут быть использованы следующие значения предэкспоненциального множителя и энергии активации:

$$K_0 = 1340 \cdot 10^3 \text{ м/с}, E = 180 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль}.$$

Таким образом, совместное использование выражений (1)–(17) позволяет создать алгоритм поинтервального (по времени) расчета процесса выгорания углерода с поверхности сланцевого полукокса, укрупненная блок-схема которого показана на рис. 2.



Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма расчета циклонной топки

Для проверки работоспособности полученного математического описания был выполнен численный эксперимент. Исходными данными являлись: сланцевый

полукокс с размером частиц 1–10 мм, начальной температурой 500 °С и содержанием карбонатной углекислоты 14,6 кг/100 кг сух. сл.; атмосферный воздух с $\alpha = 1$. Расход сланца был принят равным 5,78 кг сух. сл./с. Зависимость температуры дымовых газов от остаточного содержания углерода в сланцевом полукоксе при различной температуре подаваемого для горения воздуха показана на рис. 3.

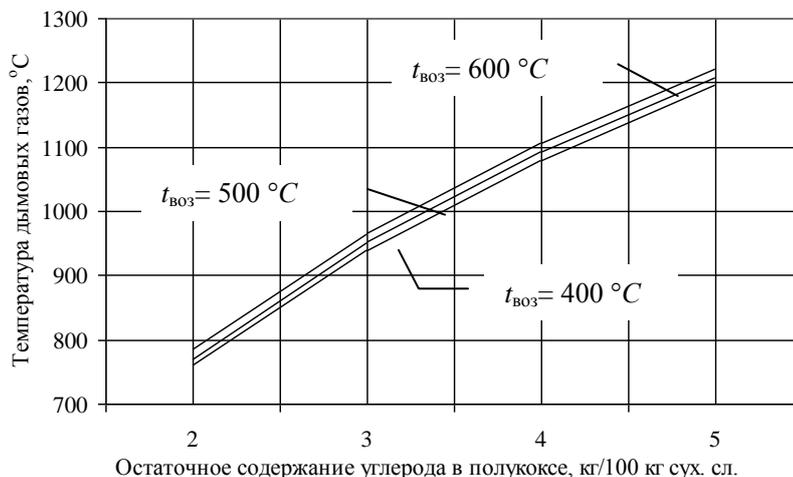


Рис. 3. Зависимость температуры дымовых газов от остаточного содержания углерода в сланцевом полукоксе

Из рис. 3 видно, что при увеличении содержания углерода в сланцевом полукоксе значительно увеличивается температура продуктов горения, что объясняется увеличением экзотермического эффекта реакций горения углерода. При этом температура воздуха, идущего на горение, не оказывает столь значительного влияния на температуру образующихся дымовых газов.

На рис. 4 показана зависимость определяющего размера (диаметра) циклонной камеры и суммарного коэффициента сопротивления от остаточного содержания углерода в сланцевом полукоксе при температуре подаваемого на горение воздуха 500 °С.

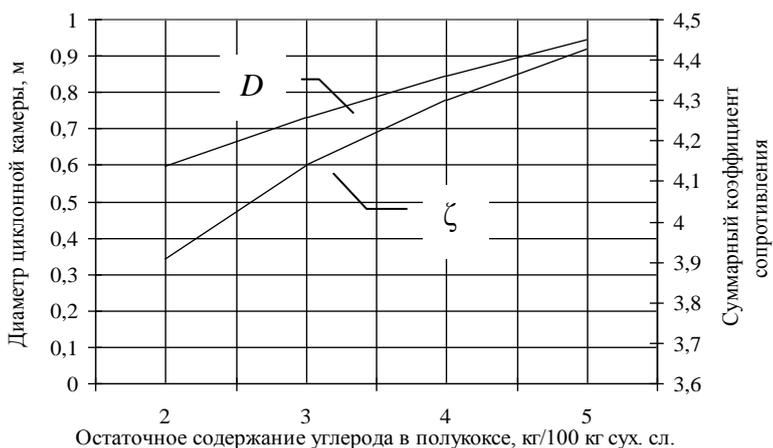


Рис. 4. Зависимость диаметра D и коэффициента сопротивления циклонной топки ζ от остаточного содержания углерода в сланцевом полукоксе

Из рис. 4 следует, что диаметр циклонной топки увеличивается при увеличении содержания углерода в полукоксе, что объясняется возрастанием теплоты сгорания сланцевого полукокса и последующим увеличением диаметра топки в соответствии с выражением (4). Суммарный коэффициент сопротивления циклонной камеры при этом возрастает в результате увеличения объема продуктов сгорания и соответственно увеличения максимальной тангенциальной скорости.

Выводы:

1. Представлено описание процесса горения сланцевого полукокса с точки зрения теории гетерогенного горения. Приведены зависимости для поинтервального (по времени) расчета уменьшения толщины пленки углерода, равномерно распределенной по поверхности коксозольной частицы.

2. Разработана математическая модель процесса горения сланцевого полукокса в циклонной топке, учитывающая характеристики коксозольных частиц, кинетику выгорания углерода, а также процесс разложения карбонатов в зольном остатке, получаемом в результате дожигания полукокса.

3. Исследовано влияние содержания углерода в сланцевом полукоксе на габаритные характеристики циклонной топки и температуру дымовых газов. Установлено, что при увеличении содержания углерода в сланцевом полукоксе значительно увеличивается температура продуктов горения. Диаметр и суммарный коэффициент сопротивления циклонной камеры при увеличении содержания углерода также возрастают.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №15-48-02313 «р_поволжье_a».

Summary

Developed a mathematical model of the combustion process of shale semicoke in a cyclone furnace, taking into account the characteristics particles, kinetics of carbon combustion, as well as the decomposition of carbonates in the bottom ash resulting from the post-combustion of coal char. Presents a flowchart of the calculation and the results of numerical experiments performed on the developed mathematical model. The effect of the carbon content of shale semicoke on the overall characteristics of the cyclone burner and flue gas temperature.

Keywords: kinetics, semicoke, fluidized bed, sulfur oil shale, cyclone furnace.

Литература

1. Морев А.А. Разработка и оптимизация реакторного блока для комплексной энерготехнологической переработки сернистых горючих сланцев в псевдоожиженном слое: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / А.А. Морев. Саратов, 2014. 132 с.
2. Басаргин А.П. Исследование сжигания угля в плазменно-циклонной топливной системе: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / А.П. Басаргин. Чита, 2010. 140 с.
3. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
4. Симонов В.Ф. Влияние условий выгорания полукокса на состав оборудования реакторного блока при энергоэффективной переработке сернистых сланцев Поволжья / В.Ф. Симонов, А.А. Селиванов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 1/2. С. 18-27.
5. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох и др. М.-Л.: Энергия, 1966. 461 с.

6. Алаев Г.П. Кинетика взаимодействия петрографических микрокомпонентов энергетических углей Кузбасса с молекулярным кислородом / Г.П. Алаев, Б.В. Нелюбин, Л.А. Арзаева // Горение твердого топлива. 1974. С. 101-107.

7. Колодцев Х.И. Исследования процесса горения твердого топлива и методов его интенсификации: авт. докл. по опубл. работам ... д-ра техн. наук / Х.И. Колодцев. М.-Л., 1962. 47 с.

8. Шестаков С.М. Расчет выгорания частиц твердого топлива в прямоточной части факела топки с низкотемпературным вихрем / С.М. Шестаков, В.В. Померанцев, Ф.З. Финкер и др. // Горение твердого топлива. 1974. С. 42-48.

Поступила в редакцию

26 июня 2016 г.

Морев Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. Тел.: 8(8452)99-87-49; 8-927-115-15-29. E-mail: aamorev@gmail.com.

Мракин Антон Николаевич – канд. техн. наук, доцент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. Тел.: 8(8452) 99-87-49; 8-987-322-76-56. E-mail: anton1987.87@mail.ru.

Селиванов Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. Тел.: 8(8452)99-87-49; 8-917-217-70-70. E-mail: selivanych-86@mail.ru.