

УДК 66.011

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ БАРАБАННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ АКТИВИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

Тагиров М.А., Жирнов Б.С., Муртазин Ф.Р., Гостьков Е.В.,
Кугатов П.В., Баулин О.А.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
филиал, г. Салават
e-mail: marat_tagirov_4552@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты математического моделирования вращающейся барабанной печи для активирования углеродного материала водяным паром с целью получения пористого углеродного материала. Описана методика расчета барабанной печи и представлены результаты расчетов по модели.

На основании полученных результатов, построены зависимости угара углеродного материала от коэффициента избытка воздуха и удельного расхода топлива для различных конечных температур активации; зависимость влияния угара и степени заполнения печи на удельный расход топлива при различных конечных температурах активации углеродного материала; зависимость угара углеродного материала и температуры нагрева воздуха от удельного расхода топлива; зависимость изменения состава дымовых газов по длине печи

Ключевые слова: углеродный материал, активирование, барабанная (вращающаяся) печь, математическая модель.

Установка активирования углеродного материала состоит из следующих узлов: подготовки сырья; транспортирования и складирования гранул сырого и активированного углеродного материала; прокали и активирования в барабанной печи; охлаждения; дожига летучих и пыли; утилизации тепла дымовых газов; фасовки и загрузки гранул активированного углеродного материала [1].

Барабанная печь – промышленная печь цилиндрической формы, вращающаяся вокруг продольной оси предназначенная для обжига, сушки, прокали сырья и полупродуктов.

Основные элементы и узлы барабанной печи, приведенные на рисунке 1, следующие: корпус 2, представляющий собой цилиндрический стальной барабан, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом; опорные устройства; привод;

головки 1 и 4; уплотнительные устройства; термоизоляция. Для сопряжения вращающегося барабана с дымоходом и холодильником имеются две головки: холодная (задняя) 1, соединенная с верхним загрузочным концом барабана, и горячая (передняя) 4, соединенная с нижним выгрузочным торцом печи.

Холодная головка вращающейся противоточной печи соединена с дымовой трубой через систему пылеосадительной камеры и боров. Сквозь головку проходит стальная течка 5, через которую в печь загружается углеродный материал.

В горячей головке установлены форсунки для сжигания топлива и имеется футерованная течка 9 для вывода активированного углеродного материала [2].

Футеровка печи не только служит защитой металла корпуса от воздействия высоких температур, но и участвует в тепловой работе печи и снижает тепловые потери. Для футеровки вращающихся печей применяют преимущественно шамотный и хромомагнетитовый огнеупоры (огнеупорность соответственно 1750 и 2300 °С).

Углеродный материал по всей длине барабана печи распределяется ровным слоем; в поперечном сечении он имеет форму сегмента. Движение материала в печи происходит за счет наклона барабана в горизонтальной плоскости. Скорость движения материала и производительность печи прямо пропорциональны ее диаметру, числу оборотов и углу наклона. При вращении печи углеродный материал скатывается в направлении, противоположном движению дымовых газов, подвергается прокатке и активации.

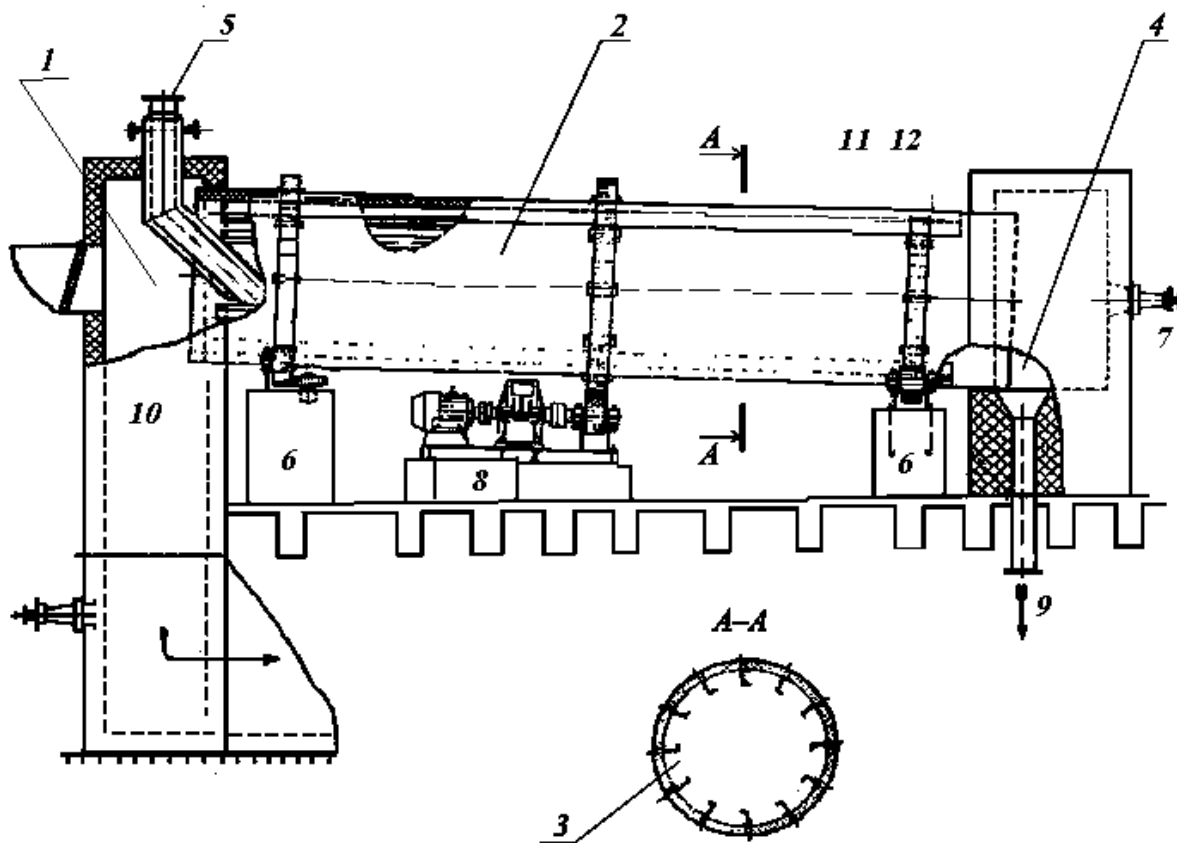


Рисунок 1. Общий вид вращающейся барабанной печи

1 – холодная головка; 2 – вращающийся барабан; 3 – полки насадки; 4 – выгрузочная камера; 5 – стальная течка; 6 – опорные станции; 7 – форсунка; 8 – приводная станция; 9 – течка для выгрузки материала

Время пребывания материала в печи должно быть достаточным для удаления влаги, летучих и окончания физико-химических превращений в активированном углеродном материале. Оно зависит от таких факторов, как диаметр, длина печи, число оборотов барабана, угол наклона барабана и коэффициента трения материала о футеровку. Причем диаметр, длина и угол наклона, всегда постоянны. Незначительно в процессе эксплуатации изменяются число оборотов барабана и коэффициент трения материала. При постоянстве основных параметров процесса прокаливания время пребывания углеродного материала в печи изменяется незначительно.

Другим фактором, существенно влияющим на производительность, является коэффициент заполнения печи. Коэффициентом заполнения называется отношение площади поперечного сечения потока материала ко всей площади сечения барабана печи. Изменяя загрузку барабана углеродным материалом, можно производительность печи регулировать в широких пределах. Однако в

заводских условиях производительность печи стремятся поддерживать постоянной.

Нагрев углеродного материала осуществляется в основном лучистой энергией горящего факела, а также при непосредственном контакте топочных газов с углеродным материалом (т.е. конвекцией). Имеет место также лучистый теплообмен между углеродным материалом и разогретой футеровкой печи. Значительное количество тепла выделяется за счет горения летучих веществ.

Полное сгорание топлива в факеле достигается при достаточном количестве кислорода воздуха, хорошем перемешивании с воздухом и достаточном объеме топочного пространства при температуре не ниже 1000 °С. Углерод топлива, соединяясь с кислородом, образует двуокись углерода, а водород – водяные пары.

Для каждого типа печей подбирают оптимальную величину заполнения барабана, чтобы углеродный материал при движении в зоне прокалики максимально подвергнулся облучению от горящего факела и контактировал с раскаленными газами. При заполнении барабана выше оптимального ухудшаются условия теплообмена углеродного материала с топочными газами, и часть углеродного материала в середине потока не соприкасается ни с футеровкой печи, ни с раскаленными газами, т.е. не нагревается ни излучением, ни конвекцией. В этом случае физико-химические процессы в углеродном материале не успевают закончиться. При заниженном коэффициенте заполнения тепловая энергия топочных газов будет использоваться недостаточно полно.

Согласно [3] вращающейся барабанной печи для активирования по длине можно разделить на следующие зоны:

- подогрев углеродного материала до 100 °С;
- сушка углеродного материала при температуре 100 °С;
- подогрев сухого углеродного материала от 100 °С до температуры начала выделения летучих веществ – 500 °С;
- выделение основной массы летучих веществ при температуре 500 – 850 °С – зона карбонизации;
- активирование при нагреве углеродного материала от 850 °С до конечной температуры;
- топочная зона.

Для более надежного управления процессом активирования число регулируемых параметров сводится к минимуму. Загрузку печи и число оборотов барабана стремятся поддерживать постоянными и в качестве регулирующих параметров не использовать, так как колебания загрузки вредно отражаются как на качестве активированного углеродного материала, так и на стойкости футеровки.

Регулирование процесса активирования сводится к поддержанию заданной температуры, оптимальной длины зоны прокалики и активирования ее положения в печи путем изменения количества топлива, кислорода воздуха и разрежения в

печи. При изменении одного из регулируемых параметров необходимо принять меры к соответствующим изменениям и других параметров.

Качество активированного углеродного материала определяется анализами проб, отбираемых после холодильника. Активированный углеродный материал контролируют на содержание серы, золы, летучих веществ и влаги, истинную плотность и адсорбционную активность по йоду (йодное число).

Качество активированного углеродного материала зависит от следующих факторов:

- 1) положения и длины зоны активирования;
- 2) распределения температур по длине зоны активирования и в зоне подсушки;
- 3) времени нахождения гранул углеродного материала в печи;
- 4) степени заполнения печи углеродным материалом;
- 5) коэффициента избытка воздуха;
- 6) температуры воздуха, подаваемого в печь.

Активирование углеродного материала из нефтяного сырья во вращающихся печах имеет особенности, обусловленные повышенным выходом летучих веществ [4]:

- пыль от гранул углеродного материала загорается сразу при попадании во вращающуюся барабанную печь;
- активирование и прокаливание можно осуществлять без подачи топлива извне, за счет горения летучих соединений;
- при активировании гранул углеродного материала температура передней части печи повышается до 1000 °С и более, что приводит к преждевременному разрушению сегментов и огнеупорной подины;
- за счет интенсивного горения летучих соединений создается высокая температура в печи, вследствие этого зона подсушки и подогрева кокса заметно уменьшается.

На основании имеющихся в литературе теоретических разработок, результатов экспериментальных исследований и опытных испытаний [4], с использованием результатов исследований по кинетике взаимодействия углеродного материала с диоксидом углерода и водяным паром [5], составили математическую модель вращающейся барабанной печи для активирования гранулированного углеродного материала.

При составлении математической модели узла нагрева приняты следующие допущения:

- печь разделяется на N секций, каждая из которых рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами;
- модель секций представляет модель идеального смешения, как по твердой, так и по газовой фазе;
- модель печи в целом рассматривается как модель идеального вытеснения по твердой и газовой фазе;

– углеродный материал расходуется на реакции с водяным паром и диоксидом углерода, а кислород взаимодействует исключительно с топливом и летучими веществами;

- потери тепла через стенку печи приняты равными 10 кДж/(м²с) [3];
- тепловой эффект образования летучих веществ равен 2200 кДж/кг [3];
- содержание пыли в дымовых газах рассчитывается по формуле [6]

$$C_n = 0,06 \cdot u^3, \quad (1.1)$$

где u – линейная скорость дымовых газов, м/с.

Площадь сечения печи, занятой углеродным материалом S_k , определяется из выражений

$$S_k = G_k / (V_k \cdot \rho_n), \quad (1.2)$$

$$S_k = 0,5 \cdot R^2 \cdot (\phi - \sin \phi), \quad (1.3)$$

где $\phi = 2 \cdot \text{atg} \cdot (L_x / (4 \cdot R^2 - L_x^2))$;

G_k – массовый расход углеродного материала, кг/с;

V_k – линейная скорость движения углеродного материала в печи, м/с;

ρ_n – насыпная плотность углеродного материала, кг/м³;

R – радиус печи, м;

ϕ – угол, образованный двумя радиусами, проходящими через концы хорды сегмента, рад.;

L_x – длина хорды, м.

Свободное сечение печи S_c и длина дуги L_c сегмента, занятого углеродного материалом в поперечном сечении печи, рассчитываются по формулам

$$S_c = 3,14 \cdot R^2 - S_k; \quad (1.4)$$

$$L_c = \phi \cdot R. \quad (1.5)$$

Длина хорды L_x определяется решением уравнения (1.3) численным методом.

Теоретическое количество воздуха $G_{\text{от}}$, необходимого для полного сжигания одного килограмма топлива, определится как

$$G_{\text{от}} = (2,67 \cdot C_c + 8 \cdot C_n + C_s - C_o) / 0,232, \quad (1.6)$$

где C_c , C_n , C_s и C_o – содержания углерода, водорода, серы и кислорода в топливе, массовые доли.

Количество продуктов горения одного килограмма топлива определяются по уравнениям

$$N_{\text{CO}_2} = \frac{C_c}{12}; N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{C_H}{2}; N_{\text{N}_2} = \frac{0,79 \cdot \alpha \cdot G_{\text{BM}}}{22,4 \cdot \rho_B}; N_{\text{O}_2} = \frac{0,21(\alpha - 1)G_{\text{BM}}}{22,4 \cdot \rho_B},$$

где α – коэффициент избытка воздуха;

ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Максимальная температура горения определяется как

$$T_{\text{max}} = T_{\text{np}} + \eta_T \cdot Q_m / (C_{\text{d}_2} \cdot N_{\text{d}_2} \cdot M_{\text{d}_2}), \quad (1.7)$$

где $Q_m = 103000 \cdot C_H + 33900 \cdot C_c$ – теплотворная способность топлива;

$\eta_T = 0,95$ – к.п.д. топки;

$N_{\text{d}_2} = N_{\text{CO}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{N}_2} + N_{\text{O}_2}$;

C_{d_2} – теплоемкость дымовых газов;

$T_{\text{np}} = \alpha \cdot G_{\text{em}} \cdot T_0 C_0 / (C_{\text{d}_2} N_{\text{d}_2} M_{\text{d}_2})$;

M_{d_2} – молекулярная масса дымовых газов;

C_0 – теплоемкость воздуха, кДж/(кг К);

T_0 – температура воздуха, °С.

Массовый расход дымовых газов после горения топлива определяется как

$$G_2 = G_m \cdot (1 + \alpha \cdot G_{\text{em}}), \quad (1.8)$$

где G_m – расход топлива, кг/с.

Материальный баланс для участка печи длиной dL запишется как

$$G_K = G'_K - dG_K; \quad (1.9)$$

$$G_2 = G'_2 + dG_K, \quad (1.10)$$

где G_K и G_2 , G'_K и G'_2 – количества уходящих и входящих потоков углеродного материала и газов, соответственно, кг/с.

Приращение массы углеродного материала dG_K определяется из системы уравнений

$$dG_K = dG_p + dG_l + dG_n + dG_w; \quad (1.11)$$

$$dG_p = dG_d + dG_6; \quad (1.12)$$

$$dG_l = dG_c + dG_H + dG_M, \quad (1.13)$$

где dG_d и dG_6 – изменение массы углеродного материала в результате реакции с диоксидом углерода и водяным паром, соответственно, кг/с;

dG_n – потери массы углеродного материала в виде уносимой пыли, кг/с;

dG_c , dG_H , dG_M , dG_w – количества выделившихся смолы, водорода, метана и воды, соответственно, кг/с.

Зависимость градиента массы выделившегося i -ого летучего вещества по температуре dG_i/dT описана уравнением [7]

$$dG_i/dT = G_{kc} \cdot C_i \cdot n \cdot k \cdot (T_k - T_n)^{n-1} \cdot e^{-k(T_k - T_n)^n}, \quad (1.14)$$

где G_{kc} – масса сухого углеродного материала, кг;
 C_i – массовая доля летучего вещества;
 k и n – параметры уравнения (1.14);
 T_n – значение температуры, начиная с которого выделяется данное летучее вещество, °C;
 T_k – температура углеродного материала, °C.

Параметры уравнения (1.14) для отдельных летучих соединений приведены в литературе [1]. При нахождении параметров использованы данные, приведенные в литературе [3].

Состав дымовых газов после разбавления летучими веществами вычисляются как

$$\begin{aligned} C_{CO_2} &= C_d \cdot Z_2; \quad C_{H_2O} = [C_v + dG_w \cdot M_{др} / (18 \cdot G_r)] \cdot Z_2; \\ C_{N_2} &= C_a \cdot Z_2; \quad C_{O_2} = C_k \cdot Z_2; \quad C_{H_2} = [C_n + dG_n \cdot M_{др} / (2G_r)] \cdot Z_2; \\ C_{CO} &= C_o \cdot Z_2; \quad C_{CH_4} = [C_m + dG_m \cdot M_{др} / (16G_r)] \cdot Z_2, \end{aligned}$$

где $Z_2 = 1 - (dG_w/18 + dG_n/2 + dG_m/16) \cdot M_{др} / G_r$;

C_d , C_v , C_a , C_k , C_n , C_o и C_m – концентрации соответственно диоксида углерода, водяного пара, азота, кислорода, водорода, оксида углерода и метана.

При высоких температурах углеродного материала взаимодействует с водяным паром и диоксидом углерода. На основании литературных и экспериментальных данных принято первый порядок по диоксиду углерода и водяному пару. Тогда степени превращения диоксида углерода X_d и водяного пара X_v определяется как

$$X_d = 1 - \exp(-K_d \cdot t), \quad (1.15)$$

$$X_v = 1 - \exp(-K_v \cdot t), \quad (1.16)$$

где K_d и K_v – константы скорости химической реакции углеродного материала с CO_2 и H_2O , соответственно, c^{-1} ;

dL – элемент длины печи, м;

t – время реагирования, с. Определяется по уравнению $t = S_k \cdot dL / [(22,4 \cdot G_z / M_{O_2}) \cdot (T_z + 273,2) / 273,2]$.

Константы скорости химической реакции K_d и K_v вычисляются по формулам [8]

$$K_d = 949000 \cdot \exp(-13800/T_k); \quad (1.17)$$

$$K_6 = z \cdot K_\delta, \quad (1.18)$$

где z – коэффициент, определяющий соотношение констант K_δ и K_6 .

Химическое взаимодействие углеродного материала с CO_2 и H_2O протекает в кинетическом режиме при относительно низких температурах. С повышением температуры скорость реакции быстро растет и определяется скоростью подвода CO_2 и H_2O к поверхности частиц углеродного материала.

Убыль массы углеродного материала dG_j в результате реакций с диоксидом углерода и водяным паром в i -ой секции печи длиной dL определяется по уравнению

$$dG_j = K'_j \cdot F_2 \cdot C_j, \quad (1.19)$$

где $K'_j = (12 \cdot 273 \cdot K_j \cdot S_k \cdot dL) / [22,4 \cdot F_2 \cdot (T_2 + 273)]$, кг/(м²·с);

C_j – концентрация реагента в газовой фазе;

j – "δ" или "ε";

$F_2 = 6 \cdot \varepsilon \cdot S_k \cdot dL / d$ – средняя геометрическая поверхность частиц углеродного материала в объеме печи длиной dL , м²;

ε – пористость, принята равной 0,5;

d – средний диаметр частиц, принят равным 0,014 м [2].

Скорость массообмена M между газовой фазой и твердыми частицами углеродного материала в i -ой секции определяется как

$$M = K_m \cdot F_2 \cdot C, \quad (1.20)$$

где $K_m = 12 \cdot 273 \cdot N_u \cdot D_m / [22,4 \cdot d \cdot (T_2 + 273)]$, кг/(м²·с);

N_u – число Нуссельта, при малых числах Рейнольдса ($Re < 150$) равно 2;

D_m – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с.

Кажущаяся константа взаимодействия углерода определяется из формулы

$$K_s = 1 / (1 / K'_j + 1 / K_m). \quad (1.21)$$

Тогда скорость взаимодействия углеродного материала с активными газами определится как

$$W = K_s \cdot F_2 \cdot C. \quad (1.22)$$

Состав дымовых газов после взаимодействия углеродного материала с диоксидом углерода и водой определяется по формулам

$$\begin{aligned} C_\delta &= C_{\text{CO}_2} \cdot (1 - X_\delta) / Z_1; \quad C_\varepsilon = C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (1 - X_\varepsilon) / Z_1; \\ C_a &= C_{\text{N}_2} / Z_1; \quad C_k = C_{\text{O}_2} / Z_1; \quad C_{\text{H}_2} = (C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot X_\varepsilon + C_{\text{H}_2}) / Z_1; \\ C_o &= 2 \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot X_\delta + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot X_\varepsilon + C_{\text{CO}} / Z_1; \quad C_m = C_{\text{CH}_4} / Z_1, \end{aligned}$$

где $Z_1 = 1 + C_{\text{CO}} \cdot X_\delta + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot X_\varepsilon$.

Состав дымовых газов после реакции летучих веществ с кислородом воздуха вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} C_{CO_2} &= [C_o + (C_o + C_m) \cdot X_l] \cdot Z_3; C_{H_2O} = [C_o + (C_n + 2 \cdot C_m) \cdot X_l] \cdot Z_3; \\ C_{N_2} &= C_a \cdot Z_3; C_{O_2} = C_k \cdot (1 - X_k) \cdot Z_3; C_{H_2} = C_n \cdot (1 - X_l) \cdot Z_3; \\ C_{CO} &= C_o \cdot (1 - X_l) \cdot Z_3; C_{CH_4} = C_m \cdot (1 - X_l) \cdot Z_3, \end{aligned}$$

где $Z_3 = G_2 \cdot [1 - 0,5 \cdot (C_o + C_n) \cdot X_l] / M_{O_2}$;

X_k и X_l – степени превращения кислорода и летучих веществ, соответственно. X_k и X_l вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} X_k &= M_k \cdot M_{O_2} / (32 \cdot G_2 \cdot C_k); \\ X_l &= X_k \cdot C_k / (0,5 \cdot C_o + 0,5 \cdot C_n + 2 \cdot C_m), \end{aligned}$$

где M_k – количество кислорода, прореагировавшего с летучими веществами, кг/с.

При активировании гранулы углеродного материала нагреваются теплом дымовых газов, образующихся при сгорании топлива, летучих веществ и взвешенной в дымовых газах пыли углеродного материала. Тепло передается углеродному материалу в основном излучением от газов и футеровки, а также конвекцией от газов. Тепловой баланс для участка печи длиной dL запишется системой уравнений

$$dQ_2 = dQ + dQ_c + dQ_n - dQ_l; \quad (1.23)$$

$$dQ_k = dQ - dQ_u, \quad (1.24)$$

где dQ_2 – изменение количества тепла дымовых газов на участке печи длиной dL , кВт;

dQ – количество тепла, переданное от дымовых газов к углеродному материалу на участке dL , кВт;

dQ_c – количество тепла, необходимое для нагрева субстанций, переходящих от углеродного материала в дымовые газы до температуры T_2 , кВт;

dQ_n – потери тепла через футеровку, кВт;

dQ_k – изменение количества тепла углеродного материала на участке dL , кВт;

dQ_u – суммарное количество тепла, необходимое для испарения воды, выделения летучих и вторичных реакций, кВт;

dQ_l – тепло, выделяемое при горении летучих веществ, кВт.

Количество тепла dQ , передаваемого от дымовых газов к слою углеродного материала через элемент поверхности dF , рассчитывается по уравнению

$$dQ = \alpha_c \cdot (T_2 - T_k) \cdot dF, \quad (1.25)$$

где α_c – суммарный коэффициент теплоотдачи, кВт/(м² К);
 T_z – температура дымовых газов, К;
 T_k – температура углеродного материала, К;
 dF – поверхность теплообмена, м².
 Суммарный коэффициент теплоотдачи α_c определяется как

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_p. \quad (1.26)$$

Значение α_k определяли по выражению

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / D, \quad (1.27)$$

где $Nu = 0,0258 \cdot Re^{0,8}$;
 $Re = w \cdot D / \mu$;
 D – диаметр печи, м;
 λ – коэффициент теплопроводности дымовых газов, кВт/(м К);
 μ – динамическая вязкость дымовых газов, кг/(м с);
 w – скорость дымовых газов, м/с.
 Величина α_p вычисляется по выражению

$$\alpha_p = C_s \cdot \varepsilon_v \cdot F \cdot \phi \cdot (T_z^4 - T_k^4) / (T_z - T_k), \quad (1.28)$$

где C_s – постоянная излучения абсолютно черного тела, равная $5,694 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴);

ε_v – приведенная степень черноты;
 F – поверхность теплообмена, м²;
 ϕ – угловой коэффициент излучения, определяется как отношение части окружности, не экранируемой углеродным материалом, к общей длине окружности, обычно $\phi = 0,8$.

Величина ε_v вычисляется по формуле

$$\varepsilon_v = 1 / (1/\varepsilon_k + 1/\varepsilon_z - 1), \quad (1.29)$$

где $\varepsilon_r = \varepsilon_{CO_2} + b \cdot \varepsilon_{H_2O}$;
 b – поправка на парциальное давление водяного пара равная 1,08;
 $\varepsilon_{CO_2} = 0,15 \cdot (P_{CO_2})^{1/3} \cdot l^{1/2} \cdot T_r$;
 $\varepsilon_{H_2O} = 0,07 \cdot P_{H_2O}^{0,8} \cdot l^{0,6} \cdot T_r$;
 P_{CO_2} и P_{H_2O} – парциальные давления диоксида углерода и водяного пара, Па;
 l – толщина поглощающего газового слоя, $l = V/S$;
 V – объем, в котором заключен газ, м³;
 S – поверхность оболочки ограничивающей объем газа, м².
 Поверхность теплообмена рассчитывается по формуле

$$dF=(L_x+L_c) \cdot dL, \quad (1.30)$$

где L_x и L_c – длина хорды и дуги сегмента, занятого углеродным материалом в поперечном сечении печи, м.

Другие составляющие уравнений (1.23) и (1.24) теплового баланса определяются по формулам

$$dQ_c=(c_k dG_d+c_k dG_b+c_l dG_l+c_w dG_w+c_k dG_n) \cdot (T_r-T_k); \quad (1.31)$$

$$dQ_n=Q_d \cdot dG_d+Q_b \cdot dG_b+Q_l \cdot dG_l+Q_w \cdot dG_w; \quad (1.32)$$

$$dQ_l=Q_{gl} \cdot dG_{gl}, \quad (1.33)$$

где c_k, c_w, c_l – теплоемкости углеродного материала, воды и летучих веществ, кДж/(кг·К);

$dG_d, dG_b, dG_w, dG_l, dG_n$ – приращения массы углеродного материала на участке dL из-за реакции с диоксидом углерода и водяным паром, выделения воды, летучих веществ и пыли, соответственно, кг/с;

Q_d, Q_b, Q_{gl}, Q_l и Q_w – тепловые эффекты реакции углеродного материала с диоксидом углерода и водяным паром, реакции летучих веществ с кислородом, тепловой эффект образования летучих и парообразования, соответственно, кДж/кг;

dG_{gl} – количество летучих веществ, прореагировавших с кислородом, кг/с.

Приращение температуры дымовых газов dT_z и углеродного материала dT_k определяются как

$$dT_z=dQ_z/(G_z \cdot c_{dz}); \quad (1.34)$$

$$dT_k=dQ_k/(G_k \cdot c_k). \quad (1.35)$$

Блок – схема алгоритма расчета активирования углеродного материала в барабанной печи приведена на рисунке 2.

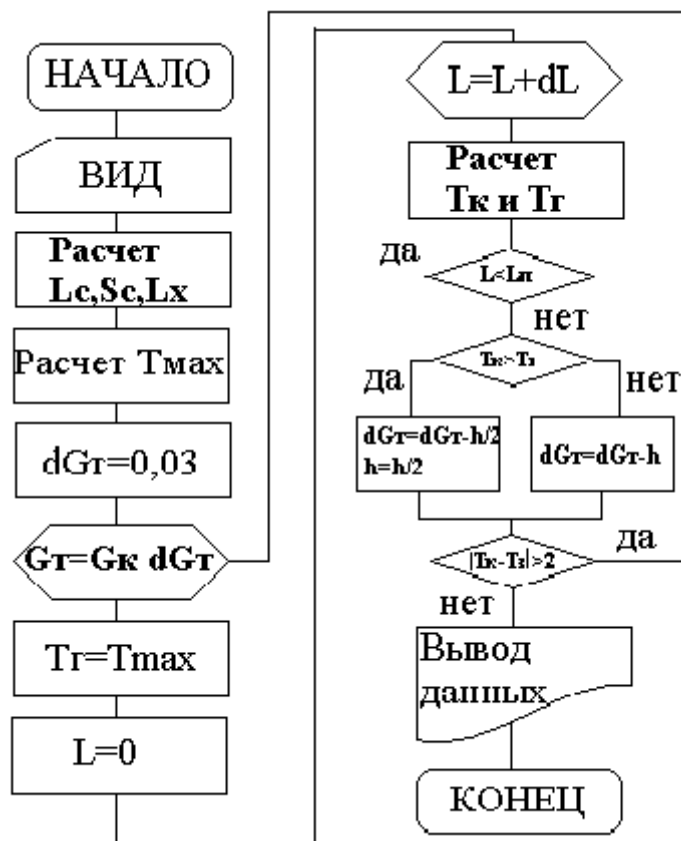


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма расчета барабанной печи для прокалики и активирования углеродного материала

Ниже приведены исходные данные для расчета барабанной печи и диапазон изменения основных параметров:

Параметр	Единица измерения	Обозначение	Диапазон изменения
Температура углеродного материала:	°С		
конечная		T_{np}	1150-1500
на входе в печь, заданная		T_z	20
воздуха		T_b	20-400
Расход активированного углеродного материала	кг/с	$G_{кп}$	
Количество топлива доли от $G_{кп}$		dG_m	
Коэффициент избытка воздуха		α	1,1-3,1
Диаметр печи	м	D	2,2
Длина печи	м	L	18
Время прокаливания	ч	t_n	9-28

Алгоритм расчета активирования углеродного материала в барабанной печи. После ввода исходных данных рассчитываются значения длины хорды по формуле (1.3) итерационным методом, свободное сечение печи S_c и длина дуги сегмента L_c , максимальной температуры T_{max} . Далее задается количество топлива

в долях от массы прокаленного углеродного материала dG_m . Расчет производится от конца печи (за начало принято место ввода углеродного материала в печь). Температура углеродного материала и дымовых газов в конце печи принимается соответственно $T_k=T_{np}$ и $T_z=T_{max}$, которые соответствуют $L=0$. Далее производится расчет первой секции печи, для чего дается приращение dL величины L . Таким образом, первая секция печи представляет собой участок длиной dL от конца печи.

Температуры углеродного материала T_k и газа T_z в конце первой секции рассчитываются, исходя из материального и теплового балансов. Далее текущее значение L сравнивается с длиной печи L_n , и если L меньше L_n производится расчет последующей второй секции и т.д. Все выходные параметры i -ой секции являются входными параметрами $i+1$ -ой секции. В такой последовательности производится расчет до тех пор, пока L не станет равным L_n . Температура углеродного материала последней секции T_k сравнивается с заданным значением температуры углеродного материала на входе в печь T_3 . В зависимости от того, что больше T_3 или T_k , отрицательное или положительное приращение получает количество топлива. Если абсолютное значение разницы между заданными значениями T_3 и текущим значением T_k (температуры углеродного материала на входе в печь) больше 2 К, расчет повторяется при новом значении количества топлива. Такой итерационный расчет заканчивается, когда будет удовлетворено условие $|T_k-T_3| < 2$ К и выводятся результаты расчета. Математическая модель опробована при различных режимах работы барабанной печи.

Далее приведены результаты расчетов барабанной печи на модели при приведенных ранее параметрах.

На рисунке 3 представлены зависимости угара гранул углеродного материала от коэффициента избытка воздуха (сплошные линии) и удельного расхода топлива (пунктирные линии) для различных конечных температур углеродного материала (1150, 1200, 1300, 1400, 1500 °С).

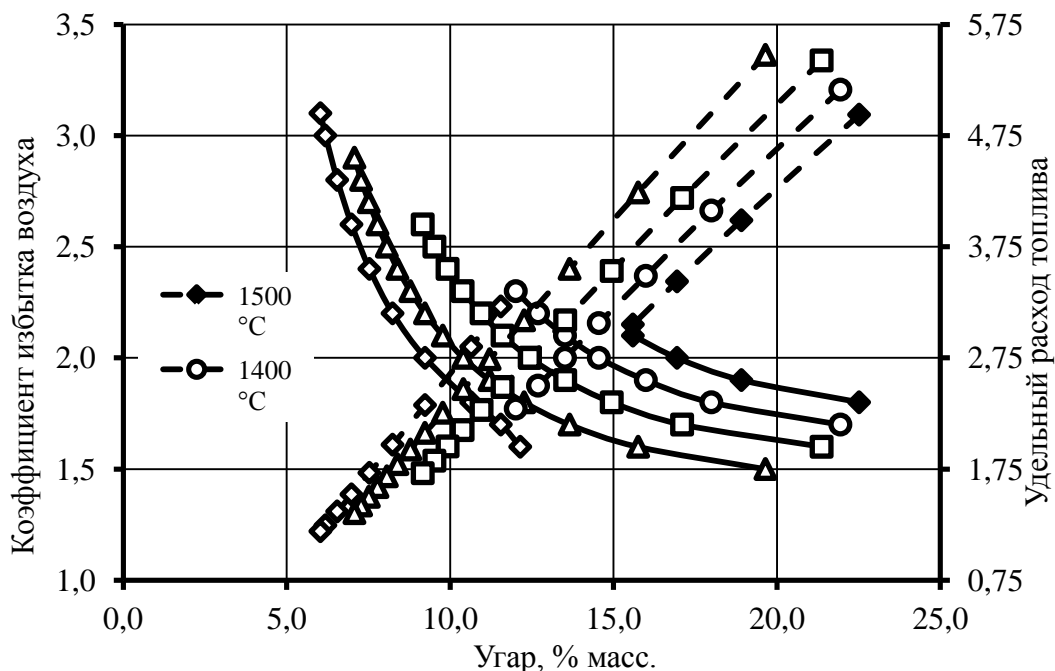


Рисунок 3. Зависимость угара углеродного материала от коэффициента избытка воздуха (сплошные линии) и удельного расхода топлива (пунктирные линии) для различных конечных температур активации

Расчеты проведены при следующих постоянных параметрах печи:

- количество активированного углеродного материала $G_{kn} = 0,14$ кг/с;
- диаметр печи $D = 2,2$ м;
- температура воздуха на входе в печь $T_e = 400$ °C;
- длина печи $L_n = 18$ м;
- время прокаливания $t_n = 27,8$ ч.

Как видно из рисунка 3, с уменьшением коэффициента избытка воздуха степень угара углеродного материала увеличивается. Для каждой температуры активации гранул углеродного материала соответствует свой диапазон изменения коэффициента избытка воздуха. Например, для температуры активации равной 1200 °C коэффициент избытка воздуха лежит в диапазоне 1,5 – 2,9. При дальнейшем увеличении коэффициента воздуха выше 2,9 температура дымовых газов становится равной или меньше температуры активации гранул углеродного материала. А при уменьшении ниже 1,5, система становится неустойчивой.

Увеличение угара углеродного материала требует увеличения удельного расхода топлива. Так, например, для температуры активации равной 1200 °C, увеличение угара с 7 до 20% удельный расход топлива увеличивается от 1,0 до 5,5.

На рисунке 4 показана зависимость влияния угара (сплошные линии) и степени заполнения печи (пунктирные линии) на удельный расход топлива при различных конечных температурах активации углеродного материала (1200, 1300, 1400 °C).

Расчеты проведены при следующих постоянных параметрах печи:

- температура воздуха на входе в печь $T_e = 400$ °С;
- диаметр печи $D = 2,2$ м;
- коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,9$;
- длина печи $L_n = 18$ м;
- степень заполнения от 10 до 50%.



Рисунок 4. Зависимость влияния угара (сплошные линии) и степени заполнения печи (пунктирные линии) на удельный расход топлива при различных конечных температурах активации углеродного материала (цифры на линиях, конечная температура активации углеродного материала)

Как видно из рисунка 4, с увеличением степени заполнения в рассмотренном интервале и увеличением конечной температуры активации дает возможность увеличивать угар гранул углеродного материала от 5 до 21%. И так же как на рисунке 3 увеличение угара требует увеличение удельного расхода топлива от 1,6 до 4,4%.

На рисунке 5 показаны зависимости изменения угара углеродного материала от количества подаваемого топлива (сплошная линия) и температуры нагрева воздуха (пунктирные линии) при различных конечных температурах активации углеродного материала (1200, 1300, 1400 °С).

Расчеты проведены при следующих постоянных параметрах печи:

- диаметр печи $D = 2,2$ м;
- длина печи $L_n = 18$ м;
- время активации $t_n = 27,8$ ч.

Как видно из рисунка 5, например, с увеличением температуры воздуха на входе в печь с 20 до 500 °С, при температуре активации 1200 °С, снижается удельный расход топлива с 4,0 до 2,6, при этом угар углеродного материала уменьшается 18 до 11%.

На рисунке 6 приведен график изменения состава дымовых газов по длине печи при температуре углеродного материала на выходе 1500 °С (сплошные линии для CO и H₂, пунктирные линии для H₂O, CH₄, CO₂ и O₂).

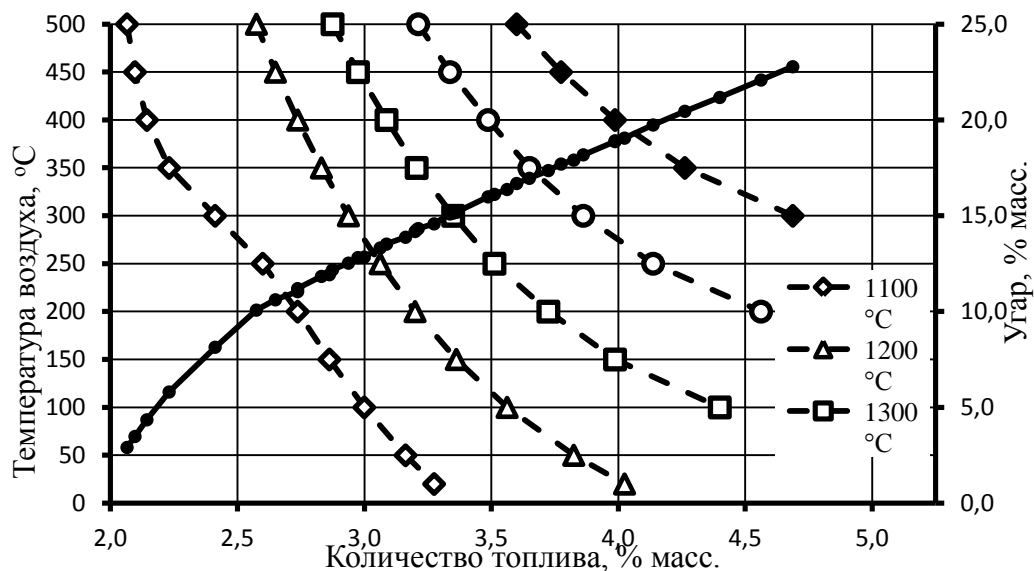


Рисунок 5. Зависимость угара углеродного материала (сплошная линия) и температуры нагрева воздуха (пунктирные линии) от удельного расхода топлива (цифры на линиях конечная температура активации углеродного материала)

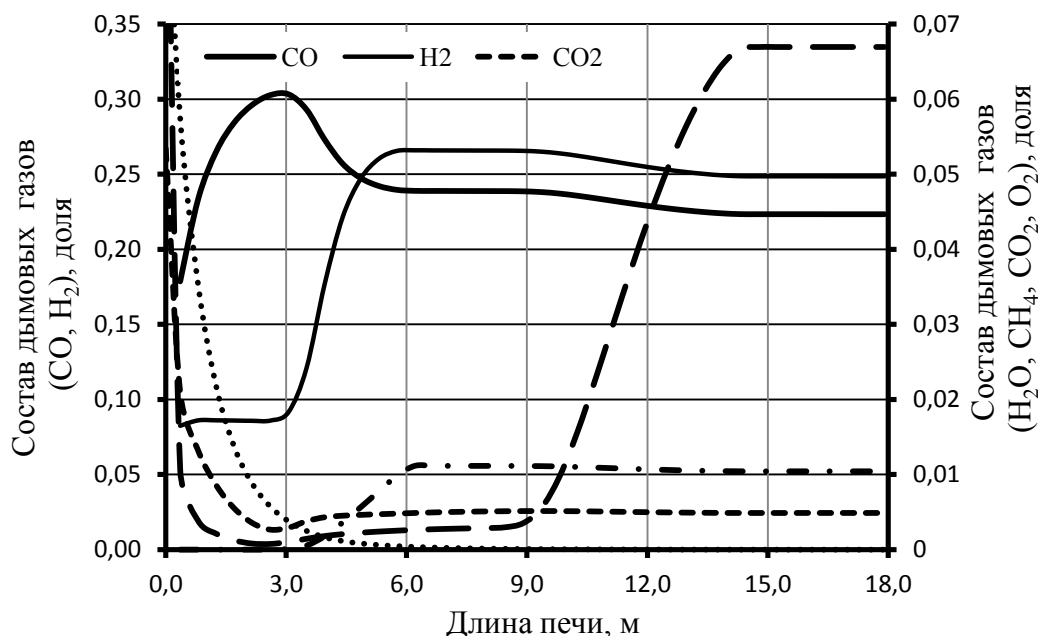


Рисунок 6. Изменение состава дымовых газов по длине печи при температуре углеродного материала на выходе 1500 °С (сплошные линии для CO и H₂, пунктирные линии для H₂O, CH₄, CO₂ и O₂)

Состав дымовых газов, рассчитанный на математической модели по длине печи изменяется. Например, максимум выхода в долях массовых: окиси углерода 0,3 достигается на расстояние 3 м от холодного конца, водород увеличивается с 0,08 до 0,27 начиная с 3 м, вода начинается выделяться с 9 м и достигает максимума 0,34 при 14 м. Расчеты состава дымовых газов при различных параметрах печи показали, что конечный состав газов меняется незначительно и содержит в долях массовых: окись углерода 0,22, водород 0,25, вода 0,07, метан 0,01, диоксид углерода 0,00, кислород 0,00, остальное азот.

На рисунке 7 приведены графики изменения температур углеродного материала и дымовых газов по длине печи при температуре углеродного материала на выходе 1500 °С. На рисунке видны зоны [3] подогрева, сушки, выделения летучих веществ, карбонизации и активирования.

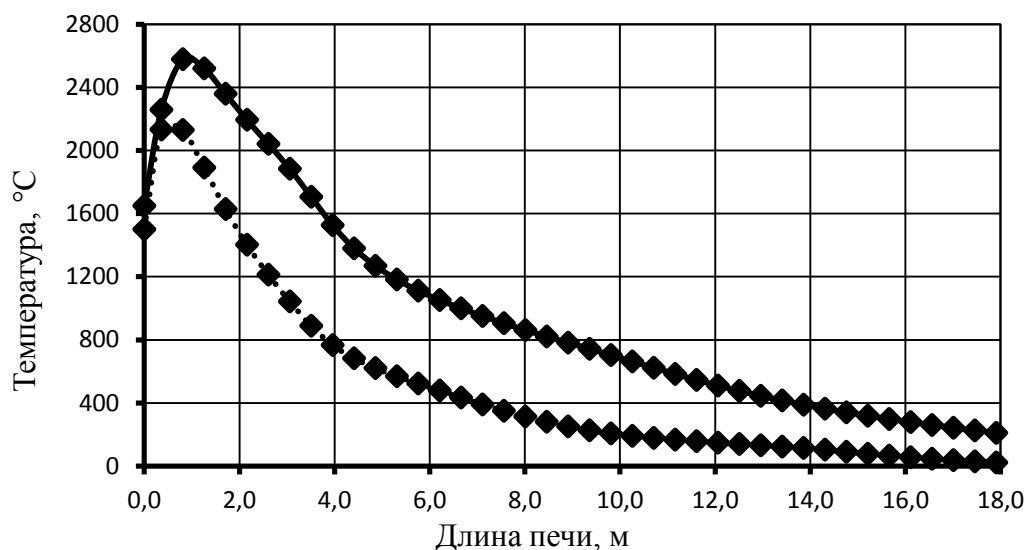


Рисунок 7. Изменение температуры дымовых газов и углеродного материала по длине печи при температуре углеродного материала на выходе из печи 1500 °С

На рисунке 8 показано изменение температуры дымовых газов и углеродного материала по длине печи при различных температурах углеродного материала на выходе.

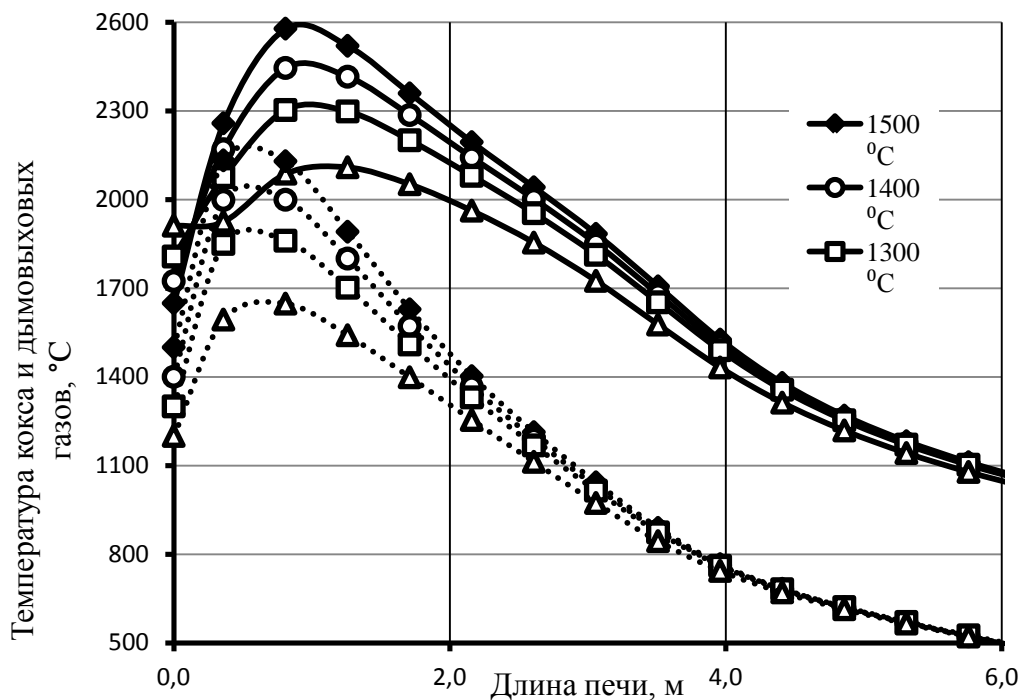


Рисунок 8. Изменение температуры дымовых газов (сплошные линии) и углеродного материала (пунктирные линии) по длине печи при различных температурах углеродного материала на выходе из печи

Из рисунка видно, что для всех режимов работы изменения температуры потоков незначительные начиная с 4 м уменьшаются начиная с 6 м для дымовых газов с 1100 °C и с 500 °C для твердой фазы.

Значения температур, особенно дымовых газов, на расстоянии от 1 до 2-х м достигают максимального значения. Например, для конечной температуры активирования углеродного материала 1500 °C достигает 2600 °C. Последнее необходимо учитывать при подборе материала футеровки, либо принимать технологические меры для снижения температуры, например, подавать дымовые газы в зону высоких температур.

Выводы

Проведенные исследования на математической модели показали, что, варьируя расходом топлива, коэффициентом избытка воздуха и температурой воздуха на входе в печь, можно выбрать различные степени угара гранул углеродного материала.

Литература

1. Жирнов Б.С. Кинетические исследования и моделирование промышленных химико-технологических процессов с участием углерода. Уфа: ГУП ИНХП РБ, 2010. 186 с.
2. Походенко Н.Т., Брозд Б.И. Получение и обработка нефтяного кокса. М.: Химия, 1986. 312 с.
3. Волошин Н.Д. Исследование свойств мелких фракций кокса замедленного коксования и разработка способа прокаливания их в печи с кипящим слоем: дис... канд. техн. наук. М. 1967.
4. Сюняев З.И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса. М.: Химия, 1973. 296 с.
5. Динамика активирования нефтяных коксов с целью получения носителей для катализаторов / Тагиров М.А. и др. // Кокс и химия. 2011. №10. С. 32-37.
6. Кислородные группы на поверхности нефтяных коксов / Волошин Н.Д. и др. // Доклады нефтехимической секции: сб/ БРП ВХО им. Д.И. Менделеева. Уфа, 1973. Вып. 10. С. 38.
7. Муртазин Ф.Р., Кинетические исследования и моделирование реакций углеродных материалов с активными газами: дис... канд. техн. наук. Уфа, 1993. С. 266.
8. Ахметов С.А., Сюняев З.И. Реакционная способность нефтяных коксов и вопросы оптимизации процессов их прокали. М.: ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1975. 85с.

MATHEMATICAL MODELING OF ROTARY DRUM FURNACES FOR ACTIVATED CARBON MATERIAL

M.A. Tagirov, B.S. Zhirnov, F.R. Murtazin, E.V. Gostkov
P.V. Cugatov, O.A. Baulin

Ufa State petroleum technical university, branch, Salavat
e-mail: marat_tagirov_4552@mail.ru

Abstract. In the article presented the results of mathematical simulation of rotating drum-type furnace to obtain activated porous carbonic material. In the article a method of furnace calculation and results of mathematical models are represented.

Based on obtained results is built a graph of coke-burnout degree versus excess air factor and versus fuel consumption at different temperatures of activation. Next are built the dependencies of burnout degree influence and furnace fill degree on fuel consumption at different final temperatures of carbonic material activation; a dependence of carbonic material burnout and temperature of air heat on fuel consumption; a dependence of combustion gas composition along a furnace.

Keywords: carbonic material, rotating drum-type furnace, mathematical model.

References

1. Zhirnov B.S. Kinetic studies and modeling of industrial chemical processes involving carbon. Ufa: SUE IPP RB, 2010. 186 s.
2. Pokhodenko N.T., Brozd B.I. Receipt and processing of petroleum coke. Khimiya, 1986. 312 p.
3. Voloshin N.D. Study of the properties of coke fines delayed coking and a method for baking them in the oven with a fluidized bed: dis ... cand. tech. science. M. 1967.
4. Sunyaev Z.I. Production, upgrading and use of petroleum coke. Khimiya, 1973. 296 p.
5. Dynamics of activation of petroleum coke to produce a catalyst support / Tagirov M.A. etc. // Coke and Chemistry. 2011. Number 10. Pp. 32-37.
6. Oxygen groups on the surface of petroleum cokes / Voloshin N.D. etc. // Reports of the petrochemical section: Sat / BRP WMO them. D.I. Mendeleev. Ufa, 1973. No. 10. C. 38.
7. Murtazin F.R., Kinetic studies and modeling of reactions of carbon materials with active gases: dis ... cand. tech. sci. Ufa, 1993. S. 266.
8. Akhmetov S.A., Sunyaev Z.I. The reactivity of petroleum cokes and the optimization of processes of their baking. M. TSNIITENEFTEHIM, 1975. 85c.

Сведения об авторах

Тагиров М. А., аспирант кафедры химико-технологических процессов, ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Салават.

M. A. Tagirov, postgraduate of the department « Chemical engineering processes », FSBEI USPTU, branch, Salavat.

Жирнов Б. С. д-р техн.наук, проф. кафедры химико-технологических процессов, ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Салават.

B. S. Zhirnov, dr. tech., prof. department of «Chemical engineering processes» , FSBEI USPTU, branch, Salavat.

Гостьков Е.В., аспирант кафедры химико-технологических процессов, ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Салават.

Y. V. Gostkov, postgraduate of the department « Chemical engineering processes », FSBEI USPTU, branch, Salavat.

Муртазин Ф. Р. аспирант кафедры химико-технологических процессов, ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Салават

F. R. Murtazin, postgraduate of the department « Chemical engineering processes », FSBEI USPTU, branch, Salavat.

Кугатов П. В., аспирант кафедры химико-технологических процессов, ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Салават

P.V. Cugatov, postgraduate of the department « Chemical engineering processes », FSBEI USPTU, branch, Salavat.

Баулин О. А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология нефти и газа» О.А.

Baulin, PhD. tech. , associate professor of the department "Technology of Oil and Gas", FSBEI USPTU