

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОЗЖИГА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Гавриленко Д. А., студент,

Гавриленко Б.В., канд. техн. наук, доц. (Ph.D.)

Донецкий национальный технический университет,

Проведено моделирование процесса розжига низкотемпературного кипящего слоя с использованием плазменно-топливной системы и коррекции измерений температуры.

В практике математического моделирования процесса горения угля сложился системный многоуровневый подход, суть которого состоит в построении последовательности моделей различных физических уровней и разной степени детализации.

Общая схема, принятая для большинства моделей, включает уравнения теплового и материального балансов для единичных топливных частиц, фаз кипящего слоя, и для топки в целом. Отличительными чертами, определяющими степень детализации модели топки кипящего слоя, являются принятые при ее разработке: гидродинамическая модель слоя, модель течения газа в фазах кипящего слоя, модель движения частиц, модель выхода летучих при вводе топлива в кипящий слой, кинетика горения летучих и углеродного остатка, учет уноса, учет горения над слоем.

В упрощенной формулировке Дэвидсона и Харисона двухфазная модель предполагает наличие у пузырей замкнутых линий тока газа. В качестве основного параметра модели используется средний диаметр пузырей [1].

Динамические характеристики камеры сгорания представляют собой очень важный элемент для разработки автоматизированных систем контроля и регулирования.

Скорость отклика системы на динамические возмущения можно оценить с помощью уравнения теплового баланса слоя [1]:

$$c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\tilde{e}} \cdot H \cdot \frac{dT_{\tilde{n}\tilde{e}}}{dt} = j_T \cdot Q_T \cdot S_{\tilde{n}\tilde{e}} \cdot (1 - q_3 - q_4) - \rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\tilde{e}} \cdot (\dot{O}_{\tilde{n}\tilde{e}} - \dot{O}_0) - h_\omega \cdot S_\omega \cdot (T_{\tilde{n}\tilde{e}} - \dot{O}_f) - (I_3 + I_{\tilde{e}}) \quad (1)$$

где: $S_{\text{сл}}$, S_w - поверхность слоя и наружного теплообменника; C_s , C_g - теплоемкость материала слоя и газа; ρ_p , ρ_g - плотность частиц и

газа; $H_{\text{сл}}$, $T_{\text{сл}}$ – высота и температура слоя; j_T – расход топлива на 1 м^2 кипящего слоя; Q_T – низшая теплота сгорания топлива; q_3 , q_4 – тепловые потери за счет химической и механической неполноты сгорания; U_0 – скорость восходящего потока газа на полное сечение; T_0 , T_f – температуры дутьевого воздуха и теплоносителя; h_w – коэффициент теплопередачи поверхности нагрева; I_3 и I_l – потери теплоты с отводимой золой и излучение через поверхность кипящего слоя.

Расход твердого топлива для топки определяется из выражения:

$$\hat{A} = j_T \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \quad (2)$$

При розжиге погрешностью вычислений потерь теплоты с отводимой золой можно пренебречь, с учетом этого уравнение материального баланса (1) примет вид:

$$\begin{aligned} c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H \cdot \frac{dT_{\tilde{n}\ddot{e}}}{dt} = & B \cdot Q_T \cdot (1 - q_3 - q_4) - \\ & - \rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} \cdot (\dot{O}_{\tilde{n}\ddot{e}} - \dot{O}_0) - h_w \cdot S_w \cdot (T_{\tilde{n}\ddot{e}} - \dot{O}_f) \end{aligned} \quad (3)$$

При отсутствии возмущений в стационарном состоянии наблюдается равенство тепловыделений и теплоотвода, следовательно:

$$\hat{A}_0 \cdot Q_T \cdot (1 - q_3 - q_4) - \rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} \cdot (\dot{O}_{\tilde{n}\ddot{e}0} - \dot{O}_0) - h_w \cdot S_w \cdot (T_{\tilde{n}\ddot{e}0} - \dot{O}_f) = 0 \quad (4)$$

Вычитая (4) из (3) и обозначив $x = \hat{A} - \hat{A}_0$, и $y = T_{\tilde{n}\ddot{e}} - T_{\tilde{n}\ddot{e}0}$, считая, что температура дутьевого воздуха и теплоносителя постоянна в некотором интервале времени, после преобразования получаем:

$$c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H \cdot \frac{dy(t)}{dt} = X(t) \cdot Q_T \cdot (1 - q_3 - q_4) - (\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_w \cdot S_w) \cdot y(t) \quad (5)$$

$$y(t) + \frac{c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H}{(\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_w \cdot S_w)} \cdot \frac{dy(t)}{dt} = X(t) \cdot \frac{Q_T \cdot (1 - q_3 - q_4)}{(\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_w \cdot S_w)} \quad (6)$$

Допустим, что до приложения внешнего воздействия система находилась в покое и все начальные условия равны нулю, тогда используя правило линейности и дифференцирования, получаем алгебраическое уравнение в изображении Лапласа:

$$Y(p) + \frac{c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H}{(\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_w \cdot S_w)} \cdot p \cdot Y(p) = X(p) \cdot \frac{Q_T \cdot (1 - q_3 - q_4)}{(\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_w \cdot S_w)} \quad (7)$$

Используя уравнение (7) получим передаточную функцию кипящего слоя по контуру твердого топлива:

$$W_T(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_T}{1 + T_T \cdot p} \quad (8)$$

где:

- коэффициент передачи кипящего слоя по контуру твердого топлива

$$k_T = \frac{Q_T \cdot (1 - q_3 - q_4)}{(\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_\omega \cdot S_\omega)} \quad (9)$$

- постоянная времени кипящего слоя по контуру твердого топлива

$$T_T = \frac{c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H}{(\rho_g \cdot c_g \cdot U_0 \cdot S_{c\ddot{e}} + h_\omega \cdot S_\omega)} \quad (10)$$

Розжиг и подогрев кипящего слоя осуществляется плазменно-топливной системой (ПТС). На выходе из муфеля, имеет место поток горячей аэросмеси, содержащий большое количество активных частиц [2]. Используя выражение (3) составим уравнение теплового баланса для данного случая с допущением, что угольная пыль в процессе розжига сгорает полностью:

$$c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H \cdot \frac{dT_{\tilde{n}\ddot{e}}}{dt} = \hat{A} \cdot Q_T - h_\omega \cdot S_\omega \cdot (T_{\tilde{n}\ddot{e}} - \dot{O}_f) \quad (11)$$

При отсутствии возмущений в стационарном состоянии наблюдается следующее:

$$\hat{A}_0 \cdot Q_T - h_\omega \cdot S_\omega \cdot (T_{\tilde{n}\ddot{e}} - \dot{O}_f) = 0 \quad (12)$$

Действуя по аналогии получения выражения (6) имеем

$$y(t) + \frac{c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H}{h_\omega \cdot S_\omega} \cdot \frac{dy(t)}{dt} = X(t) \cdot \frac{Q_T \dot{O}}{h_\omega \cdot S_\omega} \quad (13)$$

В изображении Лапласа уравнение (13) примет вид:

$$Y(p) + \frac{c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\ddot{e}} \cdot H}{h_\omega \cdot S_\omega} \cdot p \cdot Y(p) = X(p) \cdot \frac{Q_T}{h_\omega \cdot S_\omega} \quad (14)$$

Используя (14) находим передаточную функцию кипящего слоя по контуру ПТС

$$W_T(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k_{i \dot{O}\tilde{N}}}{1 + T_{i \dot{O}\tilde{N}} \cdot p} \quad (15)$$

где:

- коэффициент передачи кипящего слоя по контуру ПТС

$$k_{i \dot{O}\tilde{N}} = \frac{Q_T}{h_w \cdot S_w} \quad (16)$$

- постоянная времени кипящего слоя по контуру ПТС

$$T_{i \dot{O}\tilde{N}} = \frac{c_s \cdot \rho_p \cdot S_{\tilde{n}\hat{E}} \cdot H}{h_w \cdot S_w} \quad (17)$$

Находим передаточные функции кипящего слоя по контуру твердое топливо и ПТС для котла ДКВР-10-13 (параметры: $H=1,2$ м; $S_{\tilde{n}\hat{E}} = 13,5 \hat{i}^2$; $\rho_g = 1,293 \hat{e}\tilde{a} / \hat{i}^3$; $\rho_\delta = 1400 \hat{e}\tilde{a} / \hat{i}^3$; $S_w = 277 \hat{i}^2$; $h_w = 275 \hat{A}\hat{e} / \hat{i}^2 \tilde{n}\hat{E}$; $c_s = 800 \hat{A}\hat{e} / \hat{e}\tilde{a} \cdot \hat{E}$; $c_g = 1000 \hat{A}\hat{e} / \hat{e}\tilde{a} \cdot \hat{E}$; $Q_T = 20 \hat{I} \hat{A}\hat{e} / \hat{e}\tilde{a}$; $q_3 = 0,02$; $q_4 = 0,1$; $U_0 = 0,37 \hat{i} / \tilde{n}$):

$$W_T(p) = \frac{213}{220 \cdot p + 1} \quad W_{i \dot{O}\tilde{N}}(p) = \frac{262}{238 \cdot p + 1} \quad (18)$$

Исследование характеристик работы котлоагрегата НТКС с использованием (18) произведено в среде Matlab пакете Simulink (рис.1).

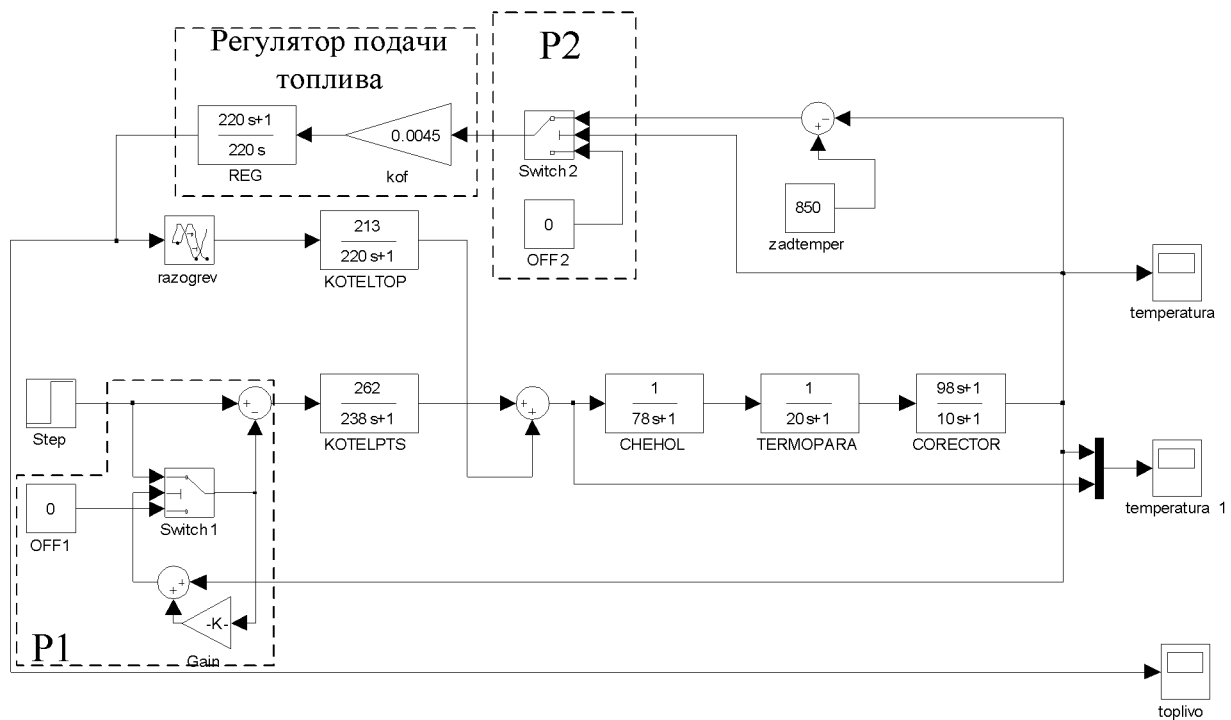


Рисунок 1 – Структурная схема моделирования процесса розжига низкотемпературного кипящего слоя в среде Matlab пакете Simulink.

Расход угольной пыли в ПТС устанавливается в блоке Step ($B=2\text{кг/с}$).

В блоке задания температуры *zadtemper* устанавливается текущее значение температуры в низкотемпературном кипящем слое.

Блок P1 реализует отключение ПТС при достижении температуры слоя 700 C^0 , а блок P2 реализует включение подачи твердого топлива в топку при достижении температуры слоя 450 C^0 .

Блок *razogrev* осуществляет видержку времени на разогрев крупных частиц топлива до температуры воспламенения, $t_{\text{раз}}=15\text{с}$ [1]. Данная величина для топливных частиц с высоким содержанием летучих веществ изменяется в зависимости от скорости реакции пиролиза, структуры угля и интенсивности процессов тепло- и массообмена

Согласно [3] термометр и защитный чехол в системе автоматического управления описываются инерционными звеньями первого порядка. Время тепловой инерции термопары принимается из паспортных характеристик [4], инерционность чехла рассчитана аналитически с учетом его материала и конструкции. С целью компенсации значительной инерционности измерения температуры в цепь введена электрическая коррекция сигнала на основе пропорционально-дифференцирующего (ПД) регулятора, а также защита от высокочастотных помех. Изменение действительной и

измеренной скорректированной температуры кипящего слоя в процессе розжига котла приведено на рис. 2.

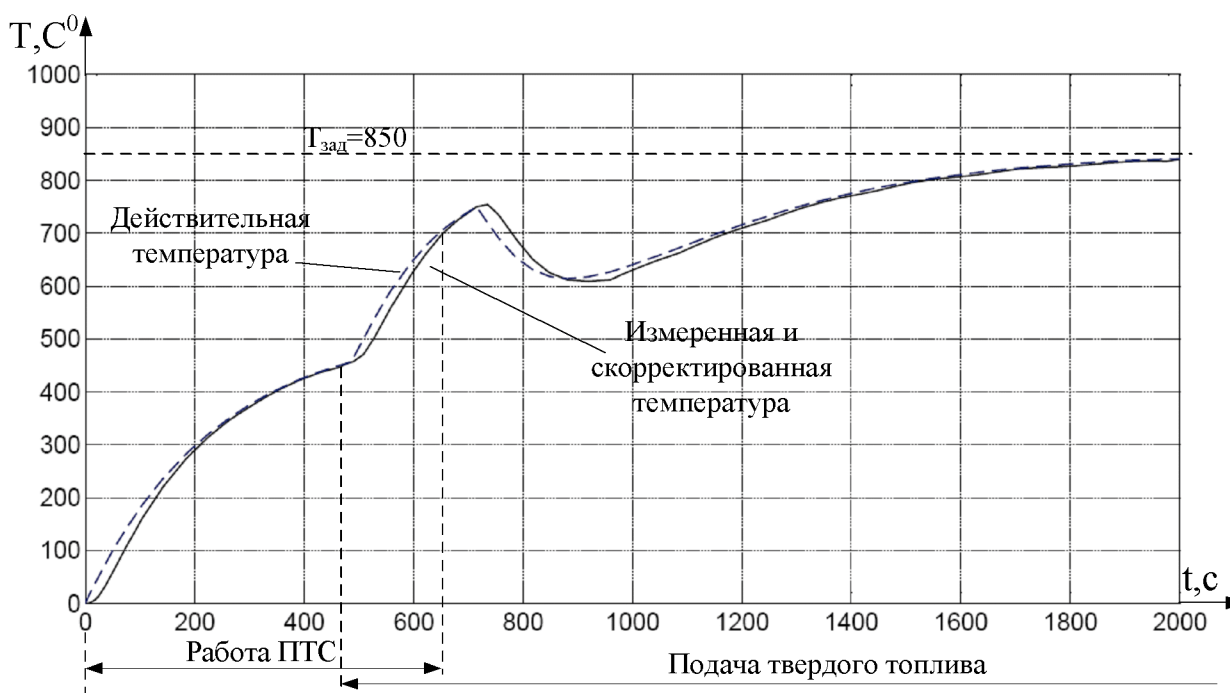


Рисунок 2 – Действительная и измеренная температура котла.

Отрицательный градиент температуры (рис.2) вызван мгновенным отключением ПТС при достижении $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ вследствие уменьшения количества тепла вносимого в кипящий слой.

Регулятор подачи топлива, в соответствии с величиной температуры и характером ее изменения выполняет оптимальное регулирование расхода твердого топлива в топку по пропорционально-интегральному закону (рис. 3).

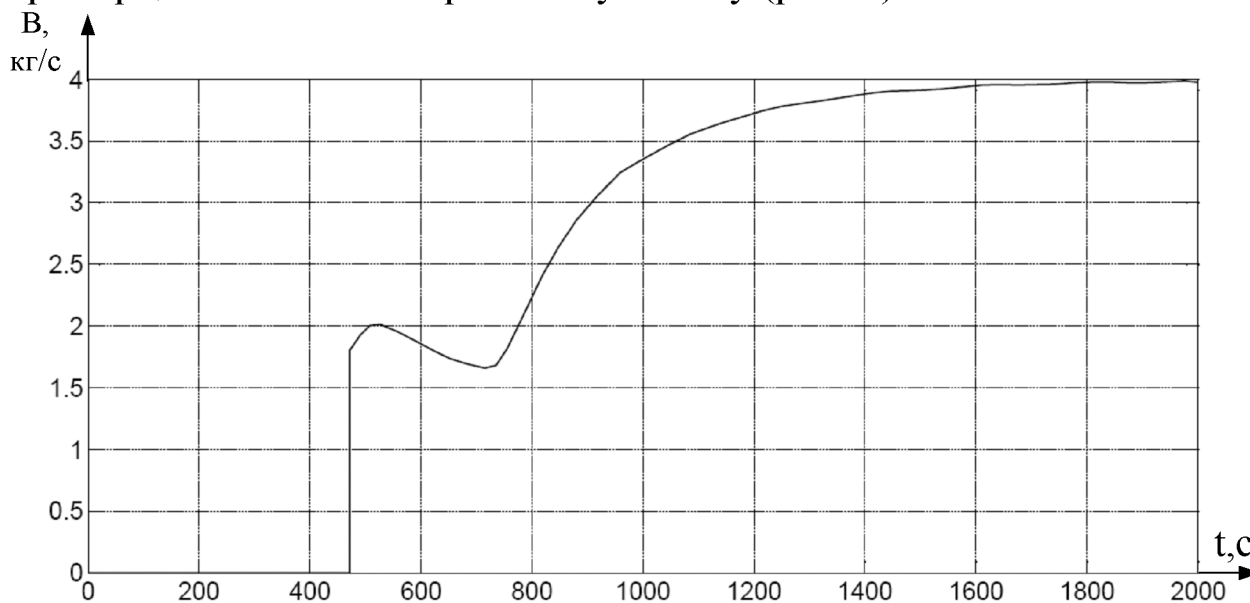


Рисунок 3 – Изменение расхода топлива при розжиге

Таким образом, для обеспечения автоматического розжига НТКС необходимо производить отключение ПТС путем плавного изменения расхода угольной пыли. При выполнении этого условия розжиг котла осуществляется в безопасном режиме, исключается зашлаковка слоя и чрезмерный износ оборудования. Для повышения быстродействия измерительного канала температуры кипящего слоя необходимо вводить коррекцию сигнала с использованием ПД регулятора.

Список источников.

1. Сжигание топлива в псевдооживленном слое. Махорин К. Е., Хинкис П.А.; Киев:Наук. Думка, 1989 – 204с.
2. А.Н. Тимошевский, И.М. Засыпкин, С.П. Ващенко, Ю.Г. Векессер, В.К. Комарицын. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной.
3. Температурные измерения. Справочник / Геращенко О. А., Гордов А. Н., Еремина А. К. и др. – Киев: Наук. Думка, 1989 – 704 с.
4. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.