

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ТОПКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Токарев О. В., магистрант; Неежмаков С. В., доц., к.т.н., доц.

(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

В работе [1] была представлена блочная структура математической модели топki с низкотемпературным кипящим слоем (НТКС) в пакете Simulink (рис. 1), идея которой состоит в отдельной обработке каждого источника тепла с последовательным его суммированием и накоплением в аккумуляторе тепловой энергии «Блока топчного пространства», и преобразованием в температуру кипящего слоя.

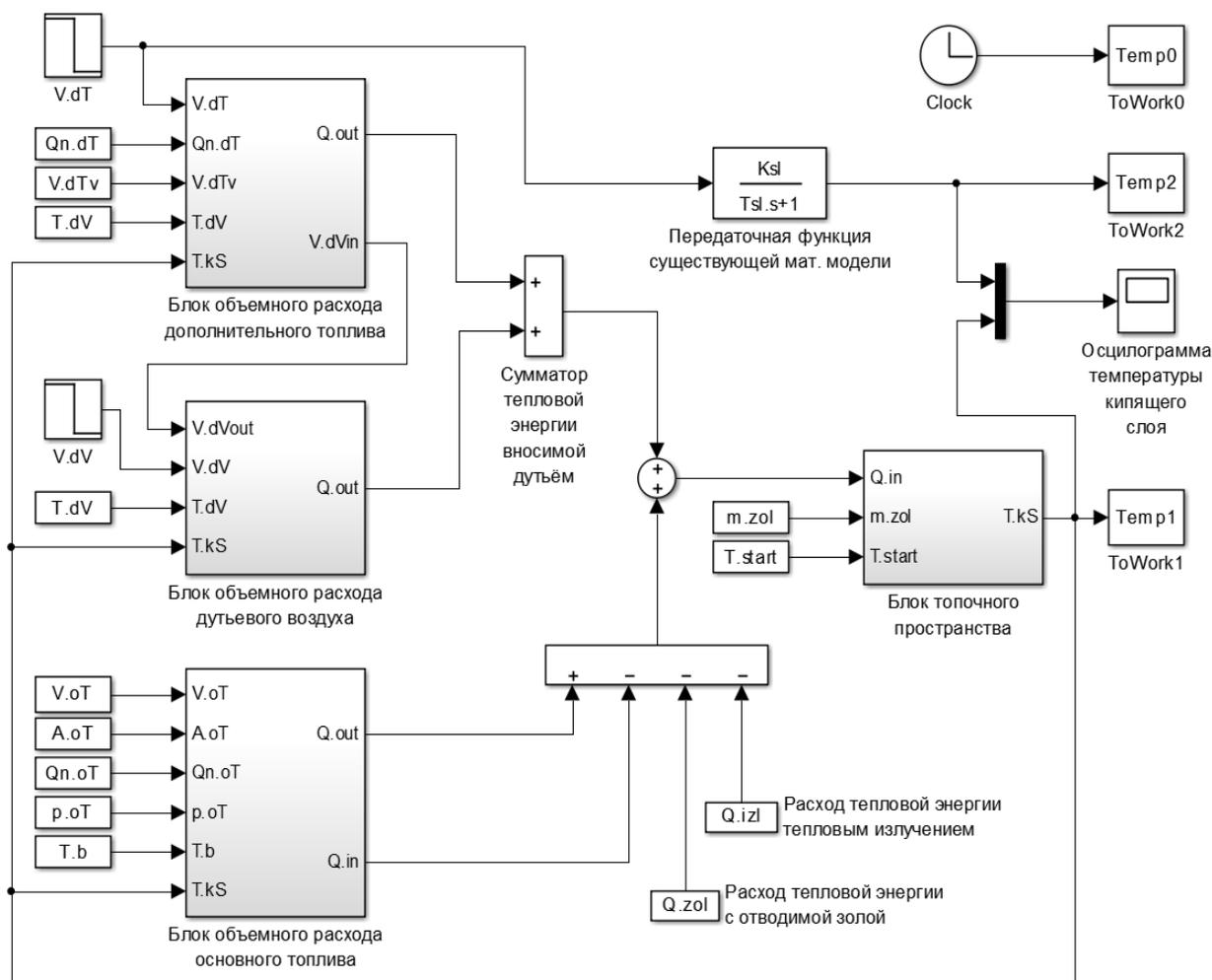


Рисунок 1 – Структура исследуемой математической модели в пакете Simulink

В качестве аккумулятора используется блок-интегратор, а накопленная в нем энергия преобразовывается в температуру по следующей формуле:

$$I_{zol}^{Tks} = \frac{Q_{\Sigma}}{m_{zol}}, \quad (1)$$

где  $I_{zol}$  – энтальпия 1 кг золы при температуре  $Tks$  (Дж/кг);  
 $Q_{\Sigma}$  – накопленная в аккумуляторе тепловая энергия (Дж);  
 $m_{zol}$  – масса золы в топчном пространстве (кг).

Однако в упомянутой математической модели, на момент её публикации, функционировали исправно только блоки «Объемного расхода дополнительного топлива», «Объемного расхода дутьевого воздуха» и «Топочного пространства». Основываясь на результатах исследований в [2], алгоритм работы блока «Объемного расхода основного топлива» был обоснован в работе [3] на уровне теоретических рассуждений и формул.

Продолжая работу в данном направлении, блок был собран в виде кода S-функции для одного диаметра топлива. Планировалось размножить код внутри подсистемы для разных диаметров, однако по результатам продолжительности циклической обработки массива в Simulink, занявшей несколько десятков минут только для одного диаметра, было принято решение отказаться от программного обеспечения «MATLAB» в пользу среды разработки программного обеспечения «Microsoft Visual Studio» и объектно-ориентированного языка программирования С#. В результате был сформулирован алгоритм функционирования блока «Объемного расхода основного топлива» (рис. 2).

При старте программы выполняется ввод исходных данных по аналогии с задающими блоками и параметрами в пакете Simulink. Далее программа выполняет подготовку к старту моделирования, на этапе которой создаются объекты, полностью повторяющие работу математической модели из [1] с использованием описанных там формул.

Подготовка к моделированию горения твердого топлива начинается с заполнения массива, с количеством элементов равным количеству групп диаметров твердого топлива, по следующим формулам, мм:

$$D_0 = \frac{D_{max}}{N_{ep} \cdot 2}, \quad (2)$$

где  $D_{max}$  – максимальный заданный диаметр частиц твердого топлива (мм);  
 $N_{ep}$  – количество групп диаметров.

$$D_i = D_{i-1} + \frac{D_{max}}{N_{ep}}, \quad i \in (1; N_{ep} - 1). \quad (3)$$

Каждая порция основного топлива проходит три этапа переработки в энергию посредством сжигания:

- нагрев – возрастающая аperiodическая характеристика температуры порции с отбором тепловой энергии из пространства топки;
- горение летучих – прямолинейная характеристика отдачи тепла из порции;
- горение коксового остатка – убывающая аperiodическая характеристика отдачи тепла из порции до её полного сжигания.

По причине существования нижней границы температуры воспламенения летучих и коксового остатка – на этапы влияет текущая температура кипящего слоя. Вследствие этого, обработчики этапов горения могут быть автоматически «выключенными» по причине слишком низких температур, продолжая накапливать не обработанную массу топлива, после его нагрева до температуры слоя. В остальных случаях горячая масса попадает к обработчикам горения после достижения температур воспламенения летучих и коксового остатка. Это необходимо для моделирования переходных процессов с большей точностью по отношению к тепловым процессам реального объекта.

Длительность этапа разогрева порций частиц одного диаметра, с:

$$\tau_{rt} = 5.3 \cdot 10^{14} \cdot T_{KS}^{-4} \cdot \left( \frac{D_i}{1000} \right)^{0.8}, \quad (4)$$

где  $T_{KS}$  – текущая температура кипящего слоя (К).

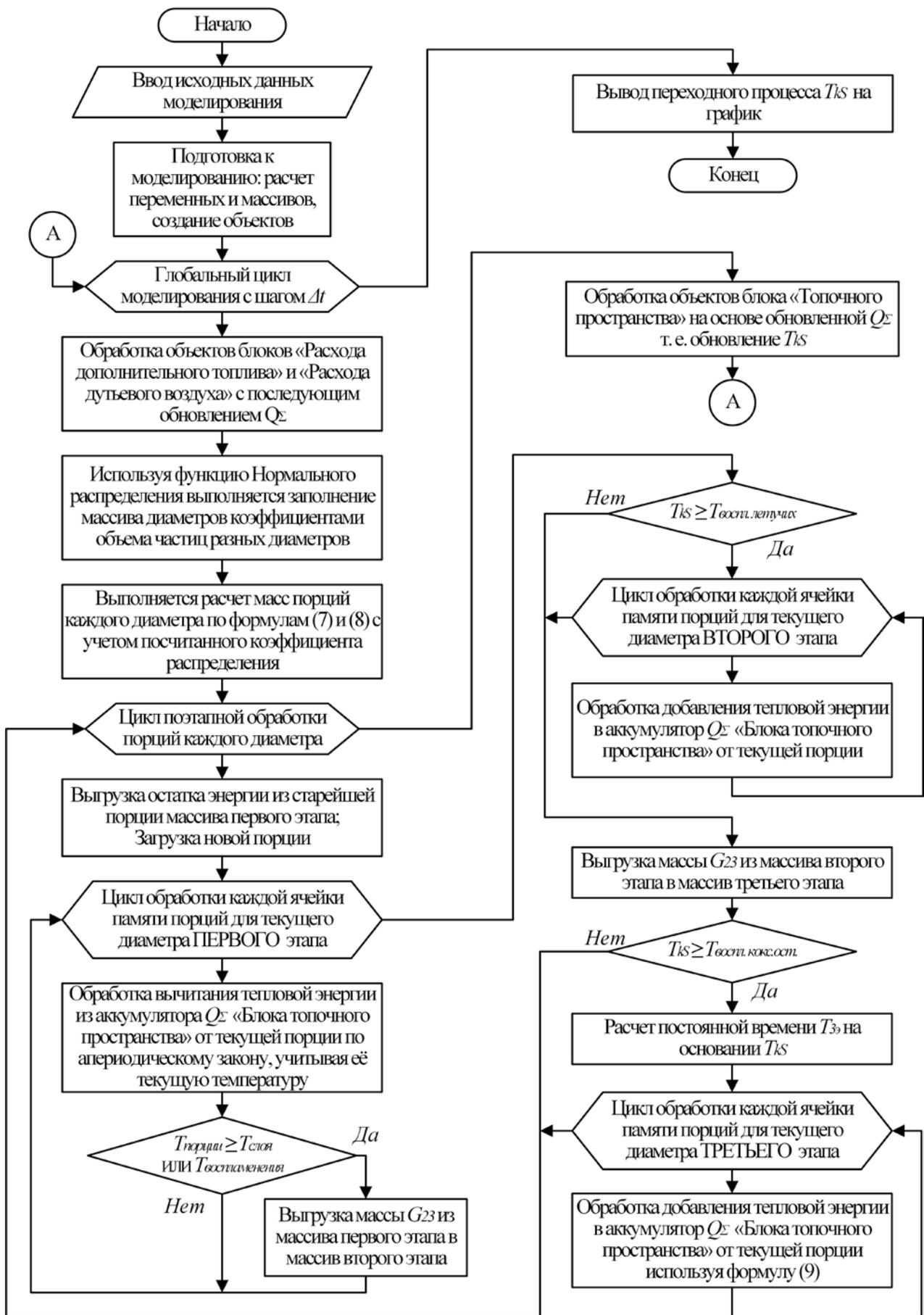


Рисунок 2 – Общий алгоритм программы моделирования тепловых процессов в топке низкотемпературного кипящего слоя

Длительность этапа горения летучих для порций частиц одного диаметра, с:

$$\tau_{lt} = 5 \cdot 10^5 \cdot K_{gl} \cdot \left( \frac{D_i}{1000} \right)^2, \quad (5)$$

где  $K_{gl}$  – коэффициент горения летучих.

Длительность этапа выгорания коксового остатка, с:

$$\tau_{kt} = \tau_{vm} \cdot \left( 1 - \delta R_s \cdot \frac{T_{ks} - T_v}{T_s - T_v} \right) \cdot \frac{D_i}{D_{max}}, \quad (6)$$

где  $\tau_{vm}$  – длительность стадии выгорания коксового остатка наибольшей частицы при минимальной температуре горения слоя (с);

$\delta R_s$  – относительное изменение интенсивности конверсии коксового остатка;

$T_v$  – температура воспламенения угольного топлива (К);

$T_s$  – температура спекания золы (К).

Согласно [2], объем поступивших в топку твердых частиц топлива подчиняется нормальному закону распределения по диаметрам. Используя преобразование Бокса – Мюллера, каждый глобальный цикл формируются коэффициенты распределения по диаметрам, для большей схожести поведения математической модели с реальным объектом. Данные коэффициенты, в последствии, используются для записи в память поступившего топлива в единицах массы. Полная масса для первого этапа, кг:

$$G_1 = V_{oT} \cdot \Delta t \cdot \rho_n \cdot \rho_p, \quad (7)$$

где  $V_{oT}$  – объемный расход основного топлива (м<sup>3</sup>/с);

$\Delta t$  – величина временного шага моделирования (с);

$\rho_n$  – насыпная плотность материала слоя (кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_p$  – плотность материала слоя (кг/м<sup>3</sup>).

Рабочая масса для второго, и третьего этапов, кг:

$$G_{23} = G_1 \cdot \frac{100 - A_t - W_t}{100}, \quad (8)$$

где  $A_t$  – зольность на сухую массу (%);

$W_t$  – рабочая влажность (%).

Следует отметить, что в обработчике сжигания коксового остатка, в каждом цикле и для каждой порции, учувствует формула (6). Перерасчет этой формулы необходим для определения постоянной времени горения коксового остатка, третьего этапа, с:

$$T_{3э} = k_{1p} \cdot \tau_{kt}, \quad (9)$$

где  $k_{1p}$  – коэффициент постоянной времени, определяющий условное завершение переходного процесса (на 99% от установившегося состояния).

Далее, используя рассчитанную постоянную времени  $T_{3э}$ , выполняется вычитание из порции и добавление в аккумулятор энергии от сжигания этой порции по формуле:

$$Q_{out} = Q_{mek} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{3э}}} \right), \quad (10)$$

где  $Q_{тек}$  – текущий объем энергии в порции текущей ячейки памяти (Дж).

После циклического выполнения алгоритма для всего времени моделирования, выводится график с показателями температуры кипящего слоя.

Для проверки работы «Блока расхода основного топлива» начальное состояние модели было выведено на рабочую температуру в 810°C и, на 6000 секунде, подача основного топлива была увеличена на 15%. Результат представлен на рисунке 3.

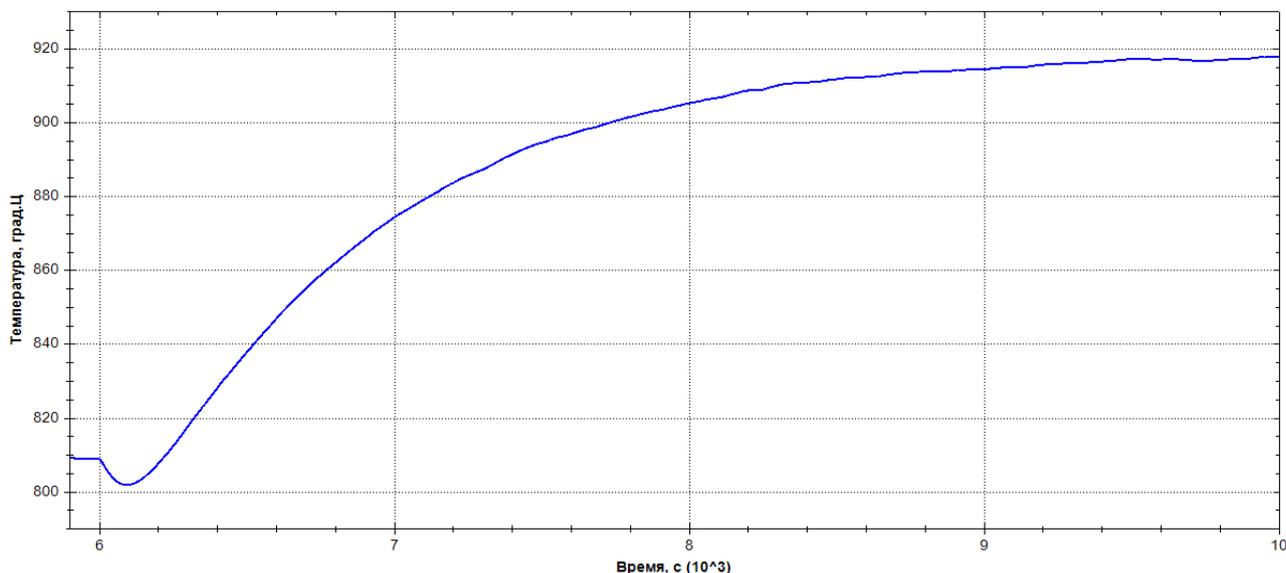


Рисунок 3 – График изменения температуры кипящего слоя

Анализируя переходной процесс видно, что первая реакция топки НТКС на увеличение расхода топлива – это уменьшение общей температуры слоя на некоторый период времени, после которого начинается прирост температуры. Это вызвано задержкой воспламенения крупных частиц топлива по причине не мгновенного их разогрева до температуры воспламенения и постепенного перехода к этапу сжигания коксового остатка, в котором находится основной запас энергии при сжигании. Рост температуры начался через 1,5 минуты. Так же по графику можно заметить слабые колебания переходного процесса случайного характера. Эти колебания вызваны неодинаковостью количественного объема частиц разных диаметров, засыпаемых в топку. Вследствие этого в разный момент времени горит не одинаковое количество топлива.

Результат исследования доказывает сложность топки НТКС как объекта автоматического управления. В дальнейшем планируется автоматизировать процесс розжига для топлива с реальным практическим разбросом характеристик зольности и влажности.

#### Перечень ссылок

1. Токарев, О. В. Исследование тепловых процессов на начальном этапе розжига топки низкотемпературного кипящего слоя / О. В. Токарев, С. В. Неежмаков // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVI научно-технической конференции аспирантов и студентов / Донец. нац. техн. ун–т. – Донецк, 2016. – С. 213–217.

2. Неежмаков, С. В. Исследование математической модели топки кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя / С. В. Неежмаков // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. – Мелитополь, 2008. – Вип. 8. ; Т. 10. – С. 173–180.

3. Токарев, О. В. Математическое моделирование процесса горения твердого топлива в псевдоожиженном слое / О. В. Токарев, С. В. Неежмаков, С. В. Дубинин // Материалы XVI международной научно-технической конференции / Донец. нац. техн. ун–т. – Донецк, 2016. – С. 48–51.