

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТОПКИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ШАХТНОГО АВТОНОМНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

*Гавриленко Б.В., доц., к.т.н., Неежмаков С.В., асс.
Донецкий Национальный Технический Университет, г. Донецк, Украина*

Разработана математическая модель топki кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя. Найденные зависимости позволили получить переходные характеристики топki при переменных параметрах топлива и режимах работы. Проведенные исследования дают возможность перейти к синтезу системы автоматического управления топкой кипящего слоя.

Розроблено математичну модель топki киплячого шару шахтного автономного повітропідігрівника. Знайдені залежності дозволили одержати перехідні характеристики топki при змінних параметрах палива й режимах роботи. Проведені дослідження дають змогу перейти до синтезу системи автоматичного управління топкою киплячого шару.

The mathematical model of a furnace of a fluidized bed of a mine independent air heater is designed. The retrieved relations have allowed to receive surge characteristics of a furnace at variable parameters of fuel and operational modes. The conducted researches allow to proceed to synthesis of an automatic control system of a spongy fluidized bed.

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время весьма актуальна проблема экономии энергетических ресурсов, и одним из вариантов ее решения является использование нетрадиционных технологий, например таких, как сжигание высокосольного твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое (НТКС). В частности, топка НТКС может быть использована как источник теплоносителя для автономного газоздушного воздухоподогревателя, предназначенного для обогрева ствола в зимний период [1]. Однако одним из сдерживающих факторов внедрения подобных установок является несовершенство системы автоматизированного управления данным технологическим объектом, которая представляет собой ряд обособленных контуров управления, выполненных на основе устаревших регуляторов типа Р-25. Одним из необходимых условий для синтеза качественно новой системы автоматизации является установление математических зависимостей топki кипящего слоя.

Состояние вопроса и анализ основных исследований. К настоящему времени имеется значительное количество работ, посвященных данной тематике. Обзор и анализ исследований, выполненных до 1989 года [2], а также

более поздних работ [3,4,5] позволили выявить следующие недостатки существующих математических моделей:

- предполагается известной величина массового расхода топлива, тогда как в настоящее время технически реализуемо только объемное дозирование;

- параметры топлива: зольность, влажность, распределение частиц топлива по размерам предполагают заранее известными и для получения динамических характеристик системы необходимо производить каждый раз новый цикл вычислительных операций;

- не учитывается наличие термического разрушения и механического истирания частиц топлива в кипящем слое;

- сложность корректировки параметров модели при получении новых экспериментальных данных или ее использования для различных марок топлива ограничивает область применения полученных зависимостей.

Цель исследований и задачи. Таким образом, целью работы является синтез на основе существующих аналитических зависимостей математической модели топки НТКС с решением следующих задач:

- учет особенностей технологического оборудования и условий окружающей среды;

- возможность изменения основных характеристик топлива непосредственно в процессе моделирования как в ручную, так и по заранее заданному алгоритму.

Изложение основного материала. В случае рассмотрения топки как объекта автоматизации в первую очередь вызывают интерес динамические свойства системы, которые далее используются для управления. При традиционном подходе к рассмотрению данного вопроса скорость отклика объекта на динамические возмущения оценивается с помощью уравнения теплового баланса [2]:

$$\frac{dT_{сл}}{dt} S_{сл} \rho_{сл} c_{сл} H = j_T Q_T S_{сл} (1 - q_3 - q_4) - S_{сл} \rho_g c_g U_o (T_{сл} - T_o) - I_3 - I_L, \quad (1)$$

где $c_g, c_{сл}$ – теплоемкость газа и материала слоя;

$\rho_g, \rho_{сл}$ – плотность газа и насыпная плотность материала слоя;

$S_{сл}$ – площадь зеркала горения;

$H_{сл}$ – высота слоя ;

$T_{сл}, T_o$ – температура слоя и газа;

Q_T – теплота сгорания топлива;

j_T – расход топлива на 1 м² площади зеркала горения, (кг/м²*с);

U_o – скорость газа через слой;

q_3, q_4 – доля химического и механического недожега;

I_3, I_L – потери теплоты с отводимой золой и излучением.

Однако такой подход имеет целый ряд недостатков:

- величины c_g и c_{cl} при изменениях T_{cl} в пределах существования слоя не являются константами, а следовательно имеет смысл вместо теплоемкостей пользоваться удельными энтальпиями;

- расход теплоты при прогреве твердого топлива не учитывается;

- при определении теплоты, выносимой из слоя смесью газов, не учитывается химический состав поступающей в слой и исходящей из слоя смеси;

- массовое дозирование топлива возможно только в лабораторных условиях, а в реальных условиях применимо лишь объемное дозирование;

- при изменении расхода топлива не учитывается, что мгновенное значение теплоты, получаемое от сгорания, существенно зависит от его гранулометрического состава.

Для разрабатываемой математической модели принимаются следующие допущения:

- масса инертного материала M_{cl} , находящегося в слое, является постоянной величиной, с учетом непрерывно работающей системы золоудаления;

- топливо, поступающее в слой, имеет полидисперсный состав, который подчиняется нормальному закону распределения, переменной составляющей которого является математическое ожидание эквивалентного диаметра частиц d_{mo} [6];

- исходящая из слоя смесь газов имеет температуру, равную T_{cl} [7];

- при работе котлоагрегата НТКС возможен переход с одной марки топлива на другую с изменением основных параметров (зольности, влажности и т.д.)

Исходя из изложенного, уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\frac{dI_{cl}}{dt} M_{cl} = Q_{gt} + Q_v + (Q_{T1} + Q_{T2})(1 - q_3 - q_4) - Q_{Tn1} - Q_{Tn2} - Q_{Tn1} - Q_{Tn2} - Q_{H2O} - Q_{d1} - Q_{d2} - Q_{dgt} - Q_{vo} \quad (2)$$

где I_{cl} – удельная энтальпия инертного материала слоя, ккал/кг.

В свою очередь, зависимости $I_{cl}=f(T_{cl})$ и $T_{cl}=f(I_{cl})$ при моделировании задаются массивом данных.

Рассмотрим последовательно все составляющие правой части выражения (2).

Количество теплоты в единицу времени – Q_{gt} , получаемое от сгорания жидкого топлива при розжиге:

$$Q_{gt} = V_{gt} * \rho_{gt} * Q_{gt}^n, \quad (3)$$

где V_{gt} - объемный расход жидкого топлива ;

ρ_{gt} - плотность жидкого топлива;

Q_{gt}^n - низшая теплота сгорания жидкого топлива, ккал/кг.

Количество теплоты в единицу времени - Q_v , вносимое в топку дутьевым воздухом:

$$Q_v = I_v * Q_{dv} * \frac{273}{273 + T_v}, \quad (4)$$

где T_v - температура дутьевого воздуха, гр. С;

Q_{dv} - производительность дутьевого вентилятора;

I_v - удельная энтальпия воздуха, $I_v = f(T_v)$ - массив данных.

Количество теплоты в единицу времени Q_{T1} , Q_{T2} и Q_{Tn1} , Q_{Tn2} , вносимое в топку при сгорании сухой горючей массы топлив 1 и 2, и забираемое при нагреве этих масс до температуры слоя соответственно.

Подробнее рассмотрим определение величин Q_{T1} и Q_{Tn1} . Для величин Q_{T2} , и Q_{Tn2} алгоритм определения будет аналогичным. С целью упрощения выражений индексы топлив 1 и 2 опущены для всех переменных, кроме d_{t1} и d_{t2} – объемных долей соответствующих топлив в производительности забрасывателя. Первоначально определяется массовый расход сухой горючей составляющей топлива:

$$G_t = \rho_u * V_z * d_{t1} \left(1 - \frac{A_p * \rho_u}{\rho_p - A_p * \rho_p - A_p * \rho_u} \right), \quad (5)$$

где ρ_u - плотность сухой горючей массы;

ρ_p - плотность породы;

V_z - объемная производительность забрасывателя;

A_p - зольность топлива.

При моделировании предполагается, что сухая горючая масса распределяется по ряду ячеек, каждая из которых соответствует определенному диапазону диаметров частиц $d_{max}, \dots, d_j, \dots, d_{min}$. Нумерация ячеек производится начиная с минимального диаметра. Текущий массовый расход для каждой ячейки определяется, как:

$$G_{tj} = G_t \frac{\int_{d_{j+1}}^{d_j} F(d, d_{mo}) dd}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} F(d, d_{mo}) dd}, \quad (6)$$

где $F(d, d_{mo})$ - функция распределения частиц по диаметрам в зависимости от текущего математического ожидания.

Полагается, что все частицы, попавшие в одну ячейку, имеют одинаковый расчетный диаметр:

$$d_{rj} = \frac{d_{j+1} - d_j}{2}. \quad (7)$$

Во время нахождения в j -ой ячейке частицы последовательно проходят следующие стадии: прогрев до температуры слоя, выход и горение летучих, выгорание коксового остатка до d_{rj-1} , после чего происходит переход коксового остатка в ячейку $j-1$ [2]. Отбор теплоты на прогрев горючей массы из одной ячейки и получение теплоты от горения летучих и коксового остатка определяются из выражений:

$$Q_{Tnj} = \frac{\int_0^{t_{rj}} G_{ij}(t) dt}{t_{rj}} I_m,$$

$$Q_{Tj} = \left(\frac{\int_0^{t_{rj}} G_{ij}(t) dt}{t_{lj}} + \left(\frac{\int_0^{t_{rj}-t_{lj}} (G_{ij}(t) - G_{trj}(t)) dt + \int_{t_{rj}-t_{lj}}^{t_{rj}} \sum_{j_{max}^{j+2}} G_{trj}(t) dt}{t_{gj}} \right) \cdot \frac{d_{rj}^3 - d_{rj-1}^3}{d_{rj}^3} \right) \cdot Q_n, \quad (8)$$

где t_{rj}, t_{lj}, t_{gj} - время пребывания частиц в каждой из стадий, значения задаются в виде массива данных по результатам экспериментальных исследований [2,8] и могут быть в дальнейшем скорректированы без изменения структуры модели;

Q_n - низшая теплота сгорания в пересчете на сухую горючую массу;

$G_{trj}(t)$ - массовый расход частиц, подвергнувшихся терморазложению или измельчению [4].

Далее определяется $Q_T = \sum Q_{Tj}$, и так далее для Q_{T2} , Q_{Tn1} и Q_{Tn2} .

Q_{Tn1} и Q_{Tn2} - количество тепла в единицу времени, отбираемое из топки на прогрев породы, определяются аналогично Q_{Tn1} и Q_{Tn2} .

Q_{H2O} количество тепла в единицу времени, отбираемое из топки на испарение и прогрев до температуры слоя содержащейся в топливе влаги. При этом предполагается, что данный процесс происходит мгновенно после попадания топлива в слой.

$Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{dgt}, Q_{vo}$ - количество тепла в единицу времени, отбираемое из топки продуктами горения твердых и жидкого топлив, а также не прореагировавшим остатком дутьевого воздуха. С учетом того, что массы выгорающих в единицу времени топлив известны, определение значений $Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{dgt}, Q_{vo}$ не составляет сложности.

Таким образом, имеется возможность определения из выражения [2] текущей энтальпии слоя, а следовательно, и его температуры, т.е. основного технологического параметра. Предложенная математическая модель реализована в прикладном пакете MATLAB.

Результаты исследований. На рис. 1а и 1в приведены полученные в

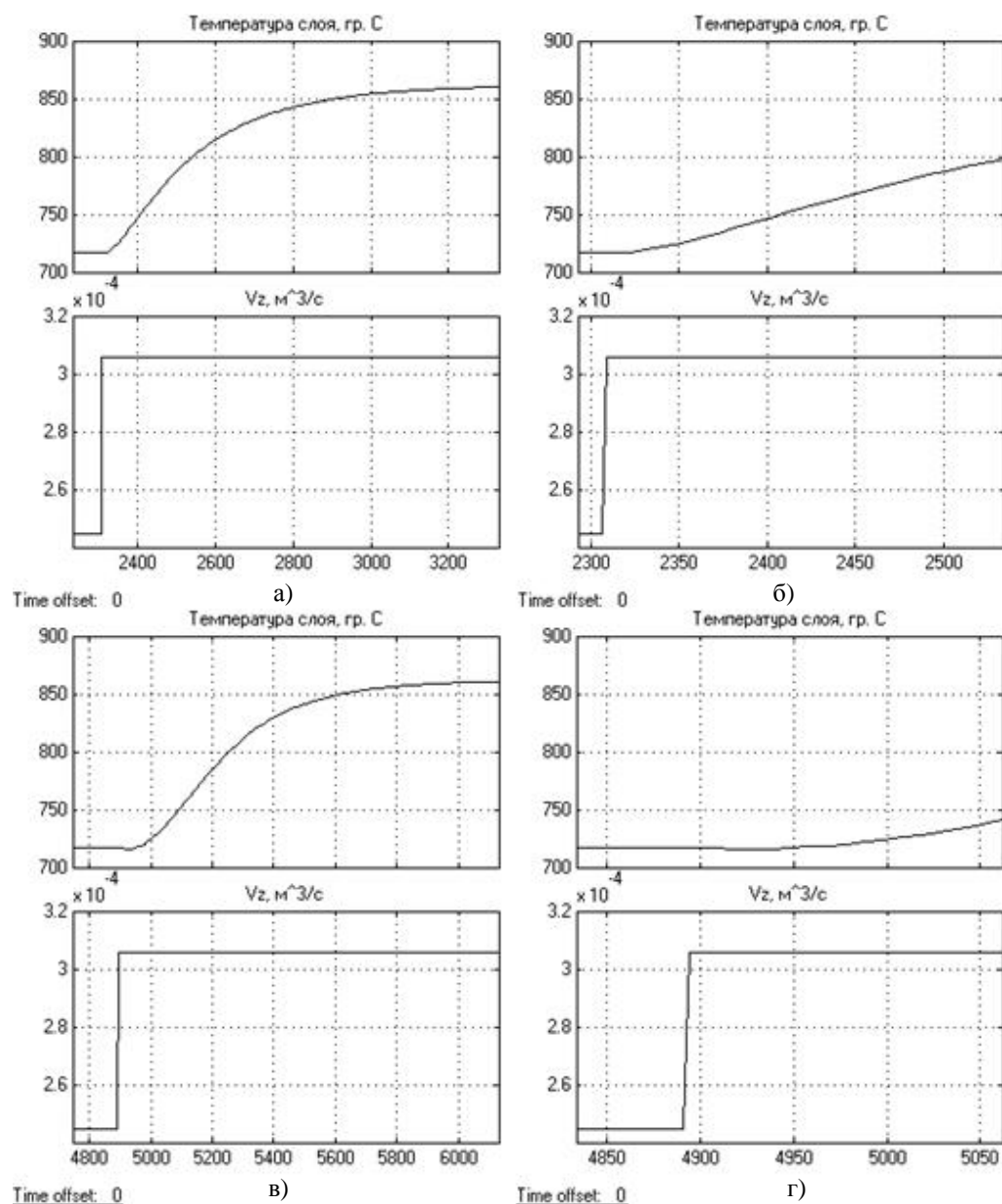


Рисунок 1 – Результаты моделирования переходных процессов

разработанной математической модели реакции температуры слоя на ступенчатое изменение производительности забрасывателя для $d_{mo}=3$ мм и

$d_{mo}=10$ мм соответственно. Моделирование производилось для следующих исходных данных: высота кипящего слоя $H=0,4$ м, площадь $S=2$ м², зольность топлива $A=50\%$, влажность $W=8\%$, производительность вентилятора $Q_{vd}=2,5$ м³/с, марка угля – жирный. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что передаточная функция топки НТКС по контуру "топливо" имеет вид:

$$W(p) = \frac{K}{pT + 1} e^{-p\tau}, \quad (9)$$

причем длительность запаздывания τ прямопропорционально зависит от математического ожидания диаметров частиц d_{mo} , что хорошо видно на рис. 1б и 1г, на которых укрупнено показано начало переходных процессов.

Выводы. Разработанная математическая модель позволяет получить переходные характеристики топки кипящего слоя при переменных параметрах топлива и режимах работы, а также в дальнейшем осуществить синтез системы автоматического управления топочными процессами.

Литература.

1. Ж.В. Вискин и др. Сжигание угля в кипящем слое и утилизация его отходов. – Донецк: «Новый мир», 1997 г. – 284 с.
2. Махорин К.Е., Хинкис П.А. Сжигание топлива в псевдоожиженном слое. –К.: Наукова думка, 1989. – 204 с.
3. Корчевой Ю.П., Пацков В.П., Редькин В.Б., Майстренко А.Ю. Расчет выгорания частиц твердого топлива в кипящем слое с учетом внутрислоевого реагирования// Теплообмен ММФ-92. Теплообмен в дисперсных системах: Т.5.-Минск. АНК"ИТМО им. А.В. Пылова", АНБ.-1992.-С. 168-170.
4. Бубенчиков А.М., Старченко А.В., Стрпус В.В. Математическое моделирование аэродинамики и теплопереноса в устройствах с циркулирующим кипящим слоем // Теплоэнергетика. – 1995. - № 9. – с. 37-41.
5. Рохман Б.Б., Шрайбер А.А., Чернявский Н.В. Инженерная методика расчета горения твердых топлив в реакторе с циркулирующим кипящим слоем применительно к пилотной установке по технологии фирмы "Лурги" // Пром. теплотехника. – 2004. – т. 26. - № 4. – с. 40-47.
6. Бородуля В.А., Гупало Ю.П. Математические модели химических реакторов с кипящим слоем. - Мн.: Наука и техника, 1976, 208 с.
7. Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном (кипящем) слое. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 488 с.
8. Бородуля В.А., Пальченко Г.И., Васильев Г.Г., Дрябин В.А., Галерштейн Д.М. Теплообмен и кинетика горения твердого топлива в кипящем слое // Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива. Материалы международной школы-семинара. Минск, 1988, ч. 2. – с. 3-23.