

Построение моментальных тепловых балансов печи при помощи метода математического моделирования как элемент АСУ ТП

БИРЮКОВ А.Б., КРАВЦОВ В.В.

Донецкий национальный технический университет

Предложен концептуальный подход, позволяющий в реальном времени проводить построение моментального теплового баланса работающего агрегата при помощи метода математического моделирования на основании замера температуры продуктов сгорания, покидающих агрегат, что позволяет определять среднее значение плотности теплового потока, падающего на поверхность материала, коэффициенты лучистой и конвективной теплоотдачи и, таким образом, создает предпосылки для динамического доисследования процесса и выбора рациональных параметров технологии

Запропоновано концептуальний підхід, що дозволяє в режимі реального часу проводити побудову моментального теплового балансу агрегату, що працює, за допомогою метода математичного моделювання на базі замірів температури продуктів згоряння, що покидають агрегат, що дозволяє визначати середнє значення щільності теплового потоку, що падає на поверхню матеріалу, коефіцієнти промінистої та конвективної тепловіддачі і, таким чином, надає передпосилання для динамічного поглибленого дослідження процесу і вибору раціональних параметрів технології.

Conceptual method that allows working aggregate heat balance in real time construction with the help of mathematical simulation method on the base of waste gases leaving aggregate temperature measurement is proposed, which allows determining average heat flux density falling on material surface, radiant and convective heat transfer coefficients that makes precondition for dynamic deep research of the process and rational technology parameters choice

Постановка проблемы исследования. Для реализации автоматического управления процессами в любой современной технологии используются системы АСУ ТП, которые все в большей мере взаимодействуют с математическими моделями технологических процессов. Важнейшей возможностью таких систем является функция диагностики работы управляемого агрегата (технологии).

Анализ состояния вопроса. Для нагрева и охлаждения материалов в печах важнейшей величиной для реализации диагностики является температура поверхности тел, подвергающихся тепловой обработке [1]. Использование анализа изменения этой величины в качестве основы проведения диагностики имеет ряд преимуществ, так как, в конечном итоге нормируемым показателем качества нагрева является тепловое состояние нагреваемых тел. Также при определенном подходе к установке датчиков есть возможность исследования несимметричности теплообмена внутри камеры печи. Следует отметить, что измерение температуры поверхности нагреваемых тел в камере печи при помощи пирометров, представляет собой достаточно трудоемкую техническую задачу.

Принципиально различают следующие виды взаимодействия математических моделей технологических процессов с системами АСУ ТП:

- использование математического моделирования только в гносеологических целях (полное отсутствие взаимодействия);
- выработка рекомендаций для определения рациональных параметров функционирования систем АСУ ТП;
- прямое использование в системах АСУ ТП.

На каждом из этих уровней к математическим моделям предъявляются различные требования в плане сложности, быстродействия, устойчивости и т.д.

Современные системы АСУ ТП характеризуются все большим уровнем интеграции в них математических моделей.

Изложение основного материала. В данной работе предложена концепция моментальной диагностики усредненного теплового баланса печи с использованием математической модели процесса на основании замера температуры газов, покидающих камеру печи.

Математическая модель нагрева материалов в печах реализуется в результате одновременного рассмотрения внутренней и внешней задач теплообмена [2]. Первая представлена дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности, выбор системы координат для записи которого и пространственная размерность определяются параметрам нагреваемых тел, печного агрегата и технологии нагрева. Так, для параллелепипеда дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности записывается в прямоугольной системе координат как:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

где x , y , z – координаты, отсчитываемые вдоль одноименных осей в прямоугольной декартовой системе координат.

Внешняя задача теплообмена учитывает особенности лучистого и конвективного теплообмена нагреваемых тел с греющей средой. Решается на каждом шаге во времени при помощи зональных методов совместно с внутренней задачей [2-3]. Возможно решение внешней задачи в результате начальной настройки, которая может быть выполнена в результате обработки результатов замеров температуры реальных тел в процессе нагрева, решения обратной задачи теплообмена с использованием методов регуляризации решения [1].

Также начальную настройку можно провести на основании значений, приведенных коэффициентов излучения, определенных при помощи

соответствующих зависимостей из аналитических методов.

Так, для камерных печей периодического действия для определения приведенных коэффициентов излучения взаимодействующих систем тел могут быть использованы следующие зависимости:

$$C_{\partial} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_M}{\varepsilon_2 + \varphi_{KM} \cdot \varepsilon_M \cdot (1 - \varepsilon_2)}$$

$$C_{печь, M} = C_0 \cdot \frac{\varepsilon_M}{1 - \varphi_{MM} \cdot (1 - \varepsilon_M)},$$

$$C_{KM} = C_0 \cdot \varepsilon_M$$

где $C_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε_2 , ε_M – степени черноты продуктов сгорания и поверхности материала соответственно; φ_{KM} , φ_{MM} – угловые коэффициенты для систем тел кладка-материал и материал-материал соответственно;

$$\bar{q} = \frac{\bar{V}_m \cdot Q_n^p \cdot d\tau - \bar{Q}_{пот} \cdot d\tau - \bar{V}_m \cdot V_{y\partial} \cdot c^{t_{yx}} \cdot \bar{t}_{yx} \cdot (1 - k_r) \cdot d\tau - V_k \cdot c^{t_{yx}} \cdot \Delta \bar{t}_k}{F_M \cdot d\tau}, \quad (2)$$

где \bar{q} – текущее значение средней плотности теплового потока, падающего на поверхность материала, Вт/м²; \bar{V}_m – текущий расход топлива, м³/с; Q_n^p – теплота сгорания топлива, Дж/м³; V_k – объем газов, заполняющих рабочую камеру, м³; F_M – поверхность материала, воспринимающая тепло, м²; $\Delta \bar{t}_k$ – изменение средней температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи, °С; $Q_{пот}$ – текущее значение теплопотерь (через футеровку, излучением в пламенное окно, с охлаждающей водой и т.д.), Вт; $V_{y\partial}$ – объемный расход продуктов сгорания, покидающих печь, м³/с; $c^{t_{yx}}$ – теплоемкость продуктов сгорания при их температуре, Дж/(м³·К); k_r – текущее значение коэффициента рекуперации.

Величина тепловых потерь камеры печи рассчитывается при помощи математической модели в реальном времени на основании заданных параметров технологии с учетом измеренных значений t_{yx} и $\Delta \bar{t}_k$.

В случае достаточно равномерного температурного поля в камере печи возможно уменьшение числа датчиков. Их минимальное количество – один датчик в районе рабочего окна, через которое продукты сгорания покидают камеру печи. В этом случае принимаем $t_{yx} = \bar{t}_k$.

Коэффициент рекуперации определяется как

$$k_r = \frac{V_6 \cdot c_6 \cdot \Delta t_6}{\bar{V}_m \cdot V_{y\partial} \cdot c^{t_{yx}} \cdot \bar{t}_{yx}}$$

где Δt_6 – повышение температуры воздуха в результате нагрева в рекуператоре.

Величина Δt_6 определяется в результате замеров температуры холодного воздуха и его температуры в раздающем коробе перед горелками.

Предложенное дифференциальное уравнение представляет собой моментальный тепловой баланс камеры печи, который уравнивается в результате

Для задания граничных условий третьего рода необходимо, определив плотность лучистого теплового потока $q_{л}$ по следующей зависимости вычислить значение лучистой составляющей коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{л} = \frac{q_{л}}{t_{\partial} - t_n}$$

Моментальная диагностика усредненного теплового баланса печи периодического действия

Сущность подхода заключается в использовании математического выражения для определения средней плотности теплового потока, падающего на поверхность материала, в течение краткого периода времени dt в зависимости от результатов замера характерных температур продуктов сгорания

определения текущего значения средней плотности теплового потока \bar{q} .

Итоговый коэффициент теплоотдачи к поверхности нагреваемого материала определяется как:

$$\bar{\alpha}_{\Sigma} = \frac{\bar{q}}{\bar{t}_{yx} - \bar{t}_{нов}},$$

где $\bar{t}_{нов}$ – средняя температура поверхности нагреваемого материала в течение рассматриваемого периода времени dt .

Величина $\bar{t}_{нов}$ определяется при помощи математической модели нагрева материала при задании граничных условий второго рода. Причем на некотором «i» шаге по времени рассчитываются параметры теплообмена $\bar{t}_{нов}$ и $\bar{\alpha}_{\Sigma}$, на основании замеров величины t_{yx} , определенных на шаге «i-1». Таким образом, есть смещение на один шаг по времени (на величину dt) между ходом процесса и его расчетом в темпе реального времени.

Наличие этого комплекса информации позволяет также определять текущие значения коэффициента использования топлива, к.п.д. печи.

Предложенный подход содержит в себе возможность экспериментальной проверки влияния различных параметров технологии на эффективность нагрева.

Поскольку итоговый коэффициент теплоотдачи представляет собой сумму лучистой и конвективной составляющих, зная одну из них и, определив при помощи предложенной системы величину $\bar{\alpha}_{\Sigma}$, находим величину неизвестной составляющей.

В случае, если неизвестной является лучистая составляющая, ее определение позволит получить зависимость приведенного коэффициента излучения от температуры на основании следующего выражения:

$$\alpha_{\text{л}} = \bar{\alpha}_{\Sigma} - \alpha_{\text{к}} = \frac{C_{np}(\bar{t}_{yx}) \cdot \left(\left(\frac{\bar{t}_{yx} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{t}_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4 \right)}{\bar{t}_{yx} - \bar{t}_{\text{пов}}}$$

Для решения этой задачи необходимо воспользоваться итерационной процедурой.

Для случая известной зависимости приведенного коэффициента излучения от температуры и соответственно лучистой составляющей итогового

$$\bar{q}_1 = \frac{\bar{V}_1^m \cdot Q_n^p \cdot d\tau + \bar{V}_1^m \cdot V_{603}^{y\delta} \cdot \bar{t}_B^{\text{под}} - \bar{Q}_1^{\text{ном}} \cdot d\tau - \bar{V}_1^m \cdot V_{\delta}^{y\delta} \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_1^{\text{yx}} \cdot d\tau}{F_1^M \cdot d\tau}, \tag{3}$$

$$\bar{q}_2 = \frac{\bar{V}_2^m \cdot Q_n^p \cdot d\tau + \bar{V}_2^m \cdot V_{603}^{y\delta} \cdot \bar{t}_B^{\text{под}} + \bar{V}_1^m \cdot V_{\delta}^{y\delta} \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_1^{\text{yx}} \cdot d\tau - \bar{Q}_2^{\text{ном}} \cdot d\tau - (\bar{V}_1^m + \bar{V}_2^m) \cdot V_{\delta}^{y\delta} \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_2^{\text{yx}} \cdot d\tau}{F_2^M \cdot d\tau}, \tag{4}$$

$$\bar{q}_i = \frac{\bar{V}_i^m \cdot Q_n^p \cdot d\tau + \bar{V}_i^m \cdot V_{603}^{y\delta} \cdot \bar{t}_B^{\text{под}} + \left(\sum_{j=1}^{i-1} \bar{V}_j^m \cdot V_{\delta}^{y\delta} \right) \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_{i-1}^{\text{yx}} \cdot d\tau - \bar{Q}_i^{\text{ном}} \cdot d\tau - \left(\sum_{j=1}^i \bar{V}_j^m \cdot V_{\delta}^{y\delta} \right) \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_i^{\text{yx}} \cdot d\tau}{F_i^M \cdot d\tau}, \tag{5}$$

$$\bar{q}_n = \frac{\bar{V}_i^m \cdot Q_n^p \cdot d\tau + \bar{V}_i^m \cdot V_{603}^{y\delta} \cdot \bar{t}_B^{\text{под}} + \left(\sum_{j=1}^{n-1} \bar{V}_j^m \cdot V_{\delta}^{y\delta} \right) \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_{n-1}^{\text{yx}} \cdot d\tau - \bar{Q}_n^{\text{ном}} \cdot d\tau - \left(\sum_{j=1}^n \bar{V}_j^m \cdot V_{\delta}^{y\delta} \right) \cdot c^{t_{yx}^{\text{yx}}} \cdot \bar{t}_n^{\text{yx}} \cdot d\tau}{F_n^M \cdot d\tau} \tag{6}$$

коэффициента теплоотдачи появляется возможность определения конвективной составляющей:

$$\alpha_{\text{к}} = \bar{\alpha}_{\Sigma} - \alpha_{\text{л}}.$$

Получив сведения о значениях $\alpha_{\text{к}}$ для разных параметров технологии появляется возможность определения значения коэффициентов критериального уравнения, описывающего конвективный теплообмен в конкретном агрегате.

Моментальная диагностика усредненного теплового баланса печи непрерывного действия

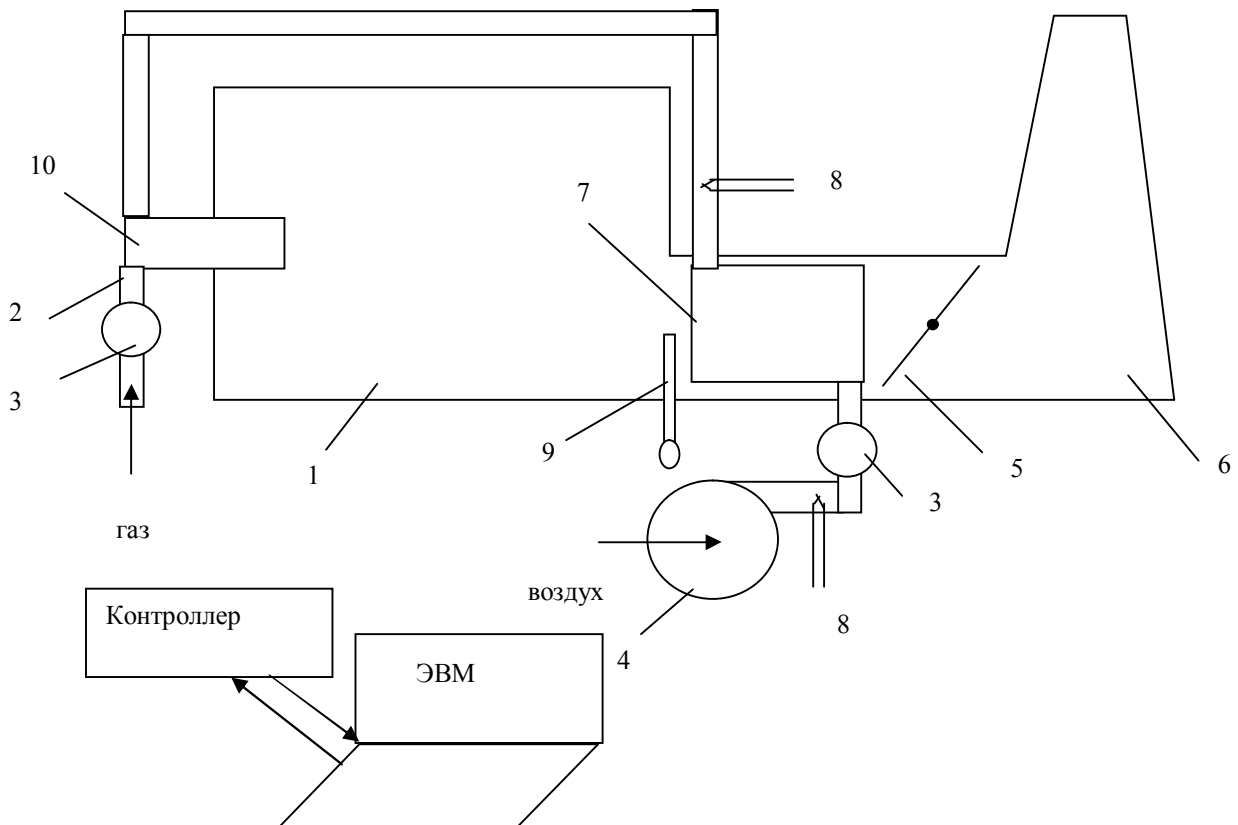


Рис. 1. Схема аппаратной реализации предложенной концепции диагностики тепловых балансов (1 – камера печи; 2 – подвод газа к горелке; 3 – расходомеры для газа и воздуха; 4 – дутьевой вентилятор для подачи воздуха на горелку; 5 – дымовой клапан; 6 – дымовая труба; 7 – рекуператор; 8 – термопары для замера температуры воздуха до и после подогрева; 9 – отсасывающая термопара для замера температура продуктов сгорания на выходе из рабочей камеры; 10 – газовая горелка)

конвективного теплообмена в каждой из зон агрегата. Для агрегата условно состоящего из n разработана следующая система выражений (3-6). При составлении выражений диагностики теплового баланса для многозонного агрегата использованы те же обозначения, что для камерных печей периодического действия с учетом индексации зон. Некоторой особенностью составленных выражений является отсутствие слагаемого, учитывающего изменение теплосодержания газового объема зоны $V_k \cdot c^{t_{yx}} \cdot \Delta \bar{t}_k$, так как для агрегата непрерывного действия полагаем, что обновление продуктов сгорания при их движении к одному из концов агрегата происходит по всему сечению камеры.

Таким образом, изменение температуры продуктов сгорания по длине печи учитывается как разница их теплосодержания на входе рассматриваемых участков печного агрегата и выходе :

$$\left(\sum_{j=1}^{i-1} \bar{V}_j^m \cdot V_{\partial}^{y\partial} \right) \cdot c^{t_{i-1}^{yx}} \cdot \bar{t}_{i-1}^{yx} \cdot d\tau - \left(\sum_{j=1}^i \bar{V}_j^m \cdot V_{\partial}^{y\partial} \right) \cdot c^{t_i^{yx}} \cdot \bar{t}_i^{yx} \cdot d\tau .$$

Использование концепции моментальной диагностики теплового баланса для управления работой печи в режиме реального времени

В основе реализации этой концепции лежит создание эталонной диаграммы конкретных операций тепловой обработки садки материала с заданными параметрами в конкретной печи. Эта задача может быть решена при помощи аналитических методик или математической модели, базирующейся на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. При этом возможна реализация метода прострела, когда исследуя влияние варьирования параметров нагрева с определенным шагом на динамику температурного поля материала, добиваемся наилучшего результата согласно заданным критериям оценки (температура нагрева, изменение температурного перепада по сечению тел в течение нагрева, динамика темпа изменения температуры). Помимо изменения температур характерных точек нагреваемых тел, температур греющих сред (дыма, кладки, печи) для совместного анализа на тепловой диаграмме должно быть представлено изменение суммарного теплового потока, падающего на

поверхность материала в течение нагрева и количества тепла, усвоенного материалов за произвольный промежуток времени.

На основании сигналов технических средств диагностики моментальных балансов печи сравниваем для каждого анализируемого периода времени Δt количество тепла, которое должно было быть поглощено материалом и реально усвоенным количеством тепла. В случае рассогласования вносится корректировка в параметры нагрева, снятые с эталонной диаграммы. Величина корректировки может быть определена при помощи реального ПИД регулятора или аналогичного виртуального компонента контроллера.

Выводы

В данной работе предложена концепция моментальной диагностики усредненного теплового баланса печи на основании замера температур продуктов сгорания, покидающих камеру печи (возможны замеры и в камере печи). Ее использование позволяет определить моментальное количество тепла, усваиваемого материалом, значение итогового коэффициента теплоотдачи (и его составляющих), а также отследить соответствие реального хода процесса эталонной диаграмме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Том 13. Серия «Задачи и методы: математика, механика. Кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
2. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование промышленных печей: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 239с.
3. Лисиенко В.Г., Волков, В.В., Гончаров А.Л. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах. – Киев: Наукова думка, 1984. – 232с.

