

УДК 681.5.08

Е.В. Чернецкий, канд. техн. наук

(Украина, г. Днепропетровск, Украинский государственный химико-технологический университет)

Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало, д-р техн. наук

(Украина, г. Донецк, Донецкий национальный технический университет)

О.Ю. Олейник, канд. техн. наук, Е.С. Черная

(Украина, г. Днепропетровск, Украинский государственный химико-технологический университет)

ОТРАБОТКА ПОВЕДЕНИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Общая постановка проблемы

Проходные (туннельные) печи находят широкое применение в горной промышленности при сушке, обжиге руд. Обжиг иногда совмещают со спеканием руды или концентрата с активными добавками (сода, мел и др.) или компонентами шихты (обжиг с окускованием для облегчения последующей переработки). Туннельные печи также широко используются в технологическом процессе полукоксования горючего сланца.

На данный момент при проектировании промышленных туннельных печей, а также исследовании особенностей их работы часто применяется математический аппарат теории стационарного теплообмена. При этом режим работы туннельных печей приближенно можно считать установившимся, а внутренний теплообмен – стационарным.

Однако возникает вопрос: как поведет себя модель при резком изменении температуры, вызванным усадкой холодной продукции, а также при соответствующем изменении расхода топлива, вызванным отработкой регулятором возмущения.

Постановка задач исследования

- Промоделировать периодическое изменение температуры в первой по ходу заготовок зоне теплового агрегата.
- Установить зависимость изменения расхода топлива, вызванную отработкой регулятора.
- Изучить поведение модели тепловой работы печи, используя установленную зависимость расхода.

Решение задач и результаты исследований

Моделирование периодического изменения температуры в первой зоне теплового агрегата

Промоделируем периодическое колебание температуры на 117 °С согласно ПИД-закону в 25-й зоне печи (рис. 1) с использованием формулы [1]

$$T_{per}(t) = \frac{\left(\frac{0,25 \cdot 3600 - t + \text{floor}\left(\frac{t}{0,25 \cdot 3600}\right) \cdot 0,25 \cdot 3600}{590} \right)}{0,7}, \quad (1)$$

где t – переменная времени; floor – функция в пакете MathCAD, которая округляет дробное число до ближайшего меньшего целого числа.

Установление зависимости изменения расхода топлива

Определим параметры ПИД-закона регулирования согласно работе [2]: $\Delta t = 500$; $\tau_M = 0,55$; коэффициенты: пропорциональный $K_p = \frac{0,95}{1 \cdot \frac{\tau_M}{\Delta t}}$; интегральный $T_i = 2,4 \Delta t$; дифференциальный $T_d = 0,4 \Delta t$. Температура

в 25-й зоне печи изменяется согласно кривой на рис. 1.

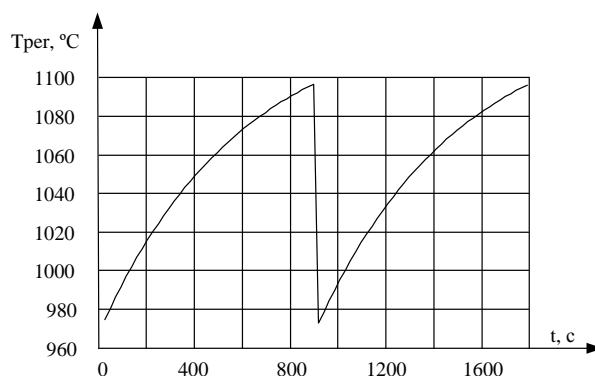


Рис 1. Кривая температуры в 25-й зоне печи

Тогда выражение для определения мощности тепловыделения в 25-й зоне примет следующий вид:

$$W(t) = K_p \left[\text{razn}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \text{razn}(t) dt + T_d \left(\frac{d \text{razn}(t)}{dt} \right) \right],$$
 где $\text{razn}(t) = 1098 - T_{per}(t)$, а выражение для определения расхода топлива – $B_{T25}(t) = W(t) / Q_{нр}$, где $Q_{нр}$ – низшая теплота сгорания топлива.

При этом расход топлива $B_{T25}(t)$ будет изменяться согласно кривой на рис. 2. При работе регулятора температуры в соответствии с ПИД-законом регулирования, расход топлива вначале скачкообразно увеличивается, а затем плавно понижается (рис. 2).

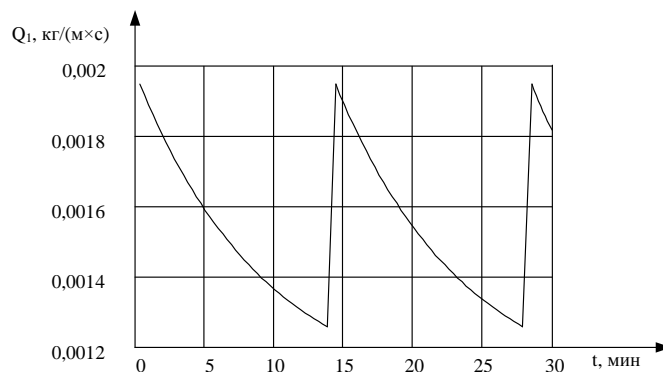


Рис. 2. Зависимость расхода газа в 25-й зоне печи при применении ПИД регулятора

Построение математической модели тепловой работы туннельной печи

Все пространство печи делится на совокупность поверхностных и объемных зон (рис.3). Затем для одних зон устанавливают распределение температур, а для других – распределение тепловых потоков. После этого проводят совместное итерационное решение сопряженной задачи теплообмена [3].

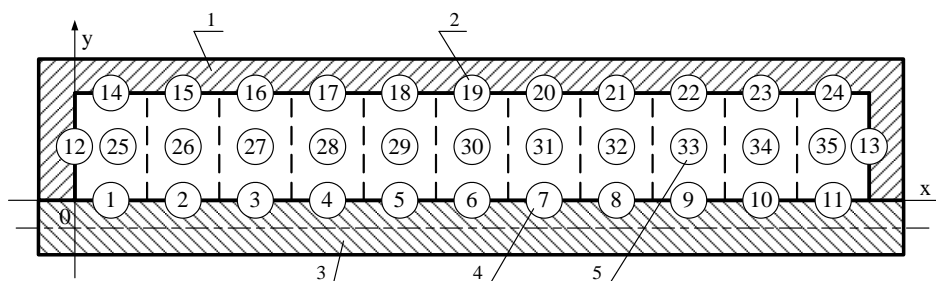


Рис. 3. Модель разбиения пространства печи

На рис. 3 приняты такие обозначения: 1 – кладка печи; 2 – поверхностные зоны кладки печи (номера 12...24); 3 – нагреваемый материал, представленный в виде непрерывного слоя; 4 – поверхностные зоны нагреваемого материала (номера 1...11); 5 – объемные газовые зоны (номера 25...35). Зоны 1...11 можно отнести к первому роду, для которых заданы температуры T_i или потоки собственного излучения Q_i^p , а искомыми являются результирующие тепловые потоки Q_i^p [3]. Зоны 12...24 можно отнести ко второму роду, для которых заданы значения потоков результирующего излучения Q_i^p , имеющих смысл потоков тепловых потерь, а искомыми являются температуры T_i . Зоны 25...35 также можно отнести ко второму роду, для которых известны значения результирующих тепловых потоков \tilde{Q}_i , соответствующих мощностям тепловыделения. Требуется определить температуры T_i .

Алгоритм определения температур внутреннего пространства проходной печи можно представить в виде последовательности решения задач внешнего и внутреннего теплообмена (см. рис. 4.).

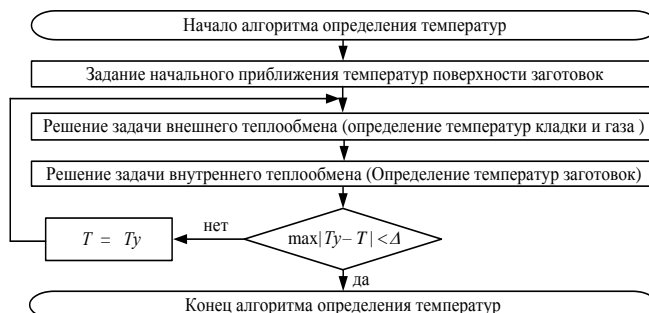


Рис. 4. Алгоритм определения температур внутреннего пространства проходной печи

На рис. 4 обозначены: T и T_u – совокупности предыдущих и последующих значений температур; Δ – величина, определяющая погрешность расчета.

Задачу внешнего теплообмена решаем при помощи итерационного метода Ньютона, а задачу внутреннего теплообмена при помощи явной разностной схемы решения.

Таким образом, используя различные методы моделирования можно получить более достоверную информацию о температурных режимах различных зон печи. Для получения достоверной информации и анализа проводим моделирование по двум алгоритмам (внешнего и внутреннего теплообмена) и по полученным результатам строим график (рис. 5).

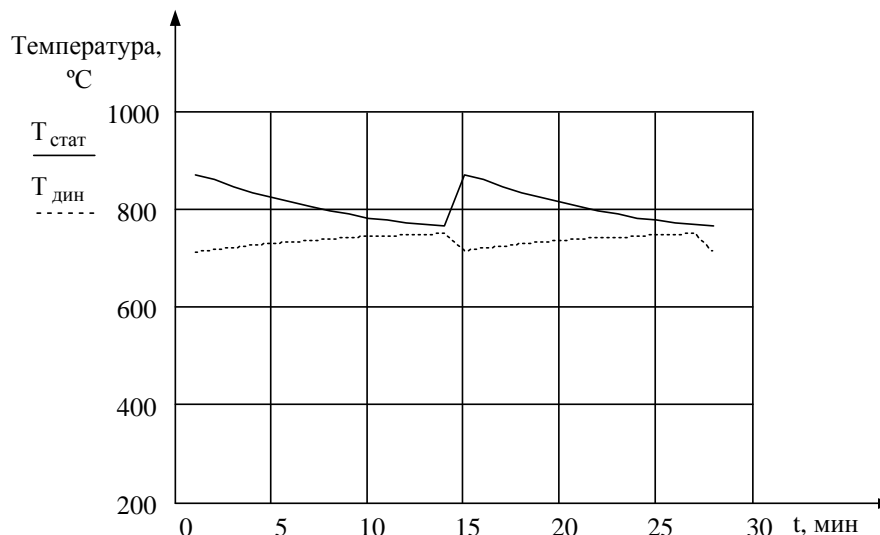


Рис. 5. Кривая поведение температур в 25-й объемной зоне при работе ПИД-регулятора

При моделировании тепловых процессов температурных зон будем использовать исходные данные, которые соответствуют параметрам реальной печи, установленной на предприятии. Полученные таким образом данные можно сравнить с результатами замеров на реальной печи. После проверки адекватности модели и ввода поправочных коэффициентов получим наиболее достоверную модель для определения температурных режимов печи.

Подставляя мгновенные значения расхода топлива 25-й зоны в описанную математическую модель работы агрегата можно получить результаты, аналогичные решению задачи [4].

На рис. 5 изображена кривая температуры в 25-й газовой объемной зоне при работе регулятора температуры с ПИД-законом регулирования. Здесь $T_{стат}$ и $T_{дин}$ – температуры в зоне, соответствующие статической и динамической моделям.

Значения температур в зоне, полученные по динамической модели, будут постепенно увеличиваться. Это обусловлено тем, что объект обладает инерционностью и постепенный рост температуры связан с резким увеличением подачи топлива.

Соответственно значения температуры, полученные по статической модели, будут уменьшаться, так как эта модель определяет мгновенные значения температур теплового агрегата для мгновенных значений расхода топлива. Таким образом, изменение объема расхода топлива согласно ПИД-закону регулирования предусматривает его резкое увеличение в начальный момент времени и потом его плавное уменьшение.

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что для точного определения температурных режимов зон печи нельзя использовать только какую-то одну модель (статическую или динамическую), как это делали раньше. Необходимо проводить совместное моделирование двух режимов и определять результирующее значение путем введения в модель поправочных коэффициентов на основании сравнения результатов моделирования и прямых инструментальных замеров. Такая модель в большей степени соответствует поведению температуры в реальном объекте управления.

Разработанная математическая модель тепловой работы туннельной печи, адекватность которой проверена на реальном объекте, позволит сократить количество датчиков температуры в печи и при этом получать достоверные данные о температурных режимах различных зон печи. Это в свою очередь даст возможность выпускать более качественную продукцию при сушке, обжиге руд в проходных печах, широко использовать печи в других технологических процессах, где выдвигаются к температуре жесткие требования.

Выводы

1. В туннельной печи при работе регулятора температуры в соответствии с ПИД-законом происходит резкое увеличение объема подачи газа к горелкам, а затем – его плавное уменьшение.
2. Модель стационарного теплообмена требует в каждый момент времени мгновенные значения расхода газа, которые оказываются завышенными.
3. Значения температур газовой зоны туннельной печи, полученные по статической и динамической моделям, вначале процесса регулирования сильно различаются. По мере наступления теплового равновесия эти значения приближаются друг к другу.
4. Целесообразно использовать комбинированную математическую модель тепловой работы туннельной печи, учитывающую совместное моделирование двух режимов и определять результирующее значение путем введения в модель поправочных коэффициентов.

Список литературы

1. Настройка параметров ПИД-закона в регуляторах температуры МкРА [Электронный ресурс] / Режим доступа к ресурсу: <http://my.elvisti.com/show/tune1.html>. – Название с экрана.
2. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов [Электронный ресурс] / Режим доступа к ресурсу: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf>. – Название с экрана.
3. Арутюнов В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников – М.: Металлургия, 1990. — 241 с.
4. Томилин Е.М. Методология определения температурного состояния проходных печей: Монография / Е.М Томилин, Н.И Чичикало. — Донецк: Ноулидж, 2011. — 223 с.
5. Крылова Л.С. Автоматизированное проектирование камерных печей. / Л.С. Крылова, В.В. Бухмиров, С.В. Носова, меж вуз. сб. научн. трудов. Магнитогорск: 2003. — С 172-176.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Віноградовим Б.В.