

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ РЕКУПЕРАТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО КОЛОДЦА

Челибийский Д. А., магистрант; Гавриленко Б. В., проф., к.т.н., доц.
(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

В задачу отделения нагревательных колодцев входит получение нагретых до температуры прокатки и равномерно прогретых по сечению слитков, а также обеспечение гибкой связи между двумя последовательными этапами технологической линии получения металла, имеющими агрегаты периодического действия: между сталеплавильными и прокатными цехами.

Нагревательные колодцы являются печами садочного типа периодического действия с распределенными во времени тепловым режимами. Цикл делится на два этапа. В первый период – период нагрева – происходит нагрев наиболее быстро греющейся части – поверхности слитка до заданной температуры, что фиксируется датчиком температуры. В этот период в колодец подается максимальное количество топлива. Во втором периоде – периоде выдержки – расход топлива все время уменьшается, так как основной задачей периода является повышение температуры середины и других медленно греющихся частей слитка при сохранении на постоянном уровне температуры поверхности, так как превышение ее приводит к пережогу и оплавлению слитков.

Общая задача управления процессом нагрева заключается в выборе и обеспечении теплового режима работы колодца, необходимого для получения металла с заданной температурой поверхности и допустимым перепадом температур по сечению слитка при максимальной производительности и минимальных удельном расходе топлива и угаре металла. Несоблюдение теплового режима при нагреве слитков приводит к повышению процента брака, что негативно сказывается на экономических показателях предприятий.

Таким образом, роль автоматизации рекуперативных нагревательных колодцев заключается в повышении качества прогрева слитков, снижении трудоемкости обслуживания, а также в обеспечении безопасности ведения работ и снижении травматизма. Автоматическое управление тепловыми режимами колодца является, основной задачей системы автоматизации данных технологического объекта [1, 2].

Поскольку добиться высокого качества протекания технологических процессов в рекуперативном нагревательном колодце возможно только путем внедрения системы автоматического управления (САУ), то возникает необходимость предварительно проверить качество обеспечиваемого управления и осуществить своевременную корректировку параметров системы. Данные действия целесообразно реализовывать путем имитационного моделирования работы объекта в составе разрабатываемой САУ.

Адекватная математическая модель колодца дает возможность осуществлять в реальном масштабе времени автоматический расчетный контроль технологических параметров, недоступных для прямого инструментального контроля; прогнозировать будущее поведение управляемых объектов как реакцию их на те или иные возмущающие и управляющие воздействия; проектировать оптимальные технологические режимы; оценивать ожидаемый технико-экономический эффект конструктивных и режимных усовершенствований нагревательных устройств.

Для создания модели процесса нагрева слитков в нагревательных колодцах наиболее приемлем метод формирования уравнений математического описания на основе применения известных физических законов.

Комплекс процессов, происходящих в рабочем пространстве промышленной печи (в нашем случае рекуперативного колодца), подверженных влиянию окружающей среды и приводящих, в конечном счете, к изменению энтальпии обрабатываемого материала, часто

обозначают термином "тепловая работа печи". В указанный комплекс входят в зависимости от типа печи различные процессы: движение газов и жидкостей, горение топлива либо другие процессы теплогенерации, процессы внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи и на поверхности обрабатываемого материала, процессы внутреннего теплообмена в этом материале, различные виды массообмена. Все перечисленные процессы теснейшим образом взаимосвязаны и подвержены взаимному влиянию, что и определяет сложность проблемы комплексного расчета тепловой работы промышленной печи, т.е. проблемы разработки ее математической модели.

В рамках металлургической теплотехники внутренним теплообменом обычно называют процесс распространения тепла и подвергаемом тепловой обработке материале. Поскольку в нагревательных и термических печах таким материалом является твердый металл, задача внутреннего теплообмена для них формулируется в виде уравнения теплопроводности с соответствующими краевыми условиями. Термином "внешний теплообмен" в металлургической теплотехнике обозначают процессы переноса тепла, происходящие в рабочем пространстве печи и приводящие, в конечном итоге, к поступлению тепла на поверхность нагреваемого материала или к отводу тепла от этой поверхности в случае охлаждения.

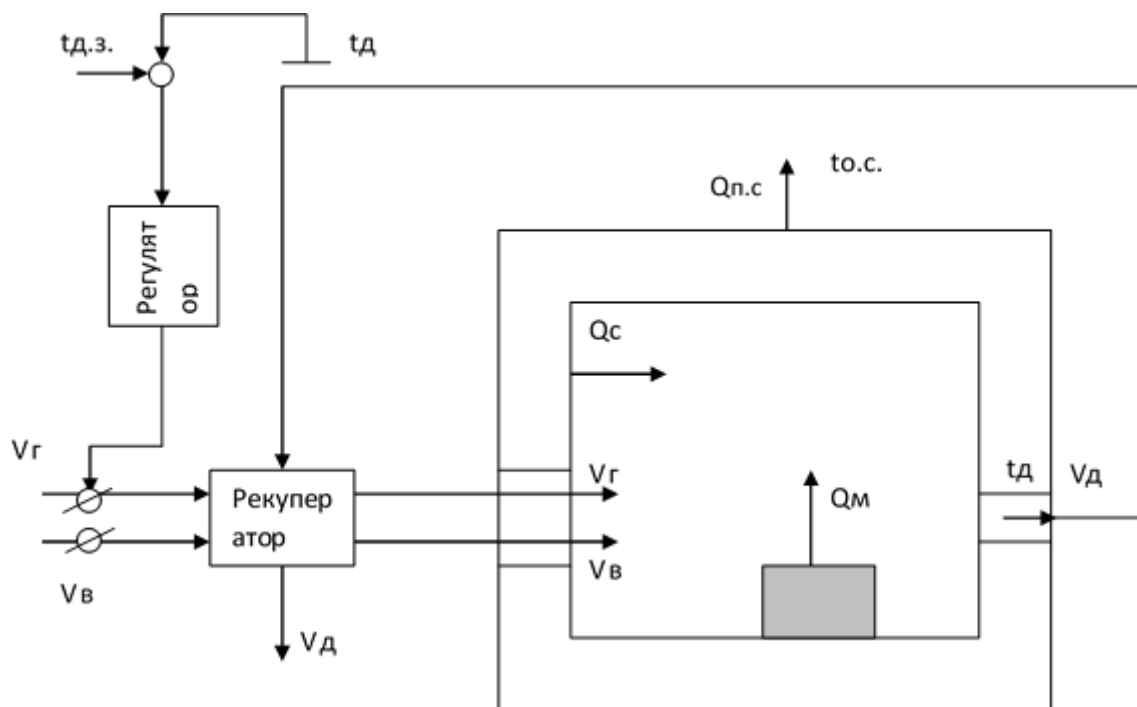
Параметрами математической модели теплообмена являются: размеры нагреваемого слитка, характеристики горения топлива (низшая теплота сгорания, теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания единицы топлива, коэффициент расхода воздуха, состав продуктов сгорания, коэффициент теплопроводности, теплоемкость металла, удельная теплоемкость продуктов сгорания, степени черноты металла и кладки.

В данном исследовании в качестве входных переменных математической модели приняты производительность колодца и общий расход топлива на колодец. В качестве выходных переменных, значения которых определяются в результате расчета, приняты температура поверхности слитка и перепад температур по его сечению на выходе из печи, а также температура продуктов сгорания, покидающих рабочее пространство.

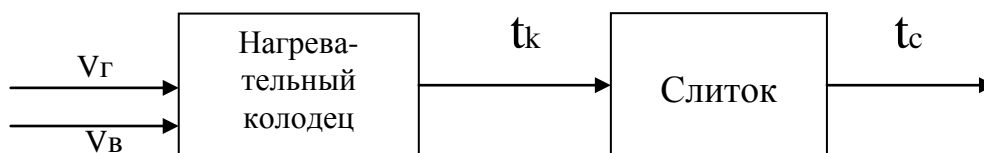
При разработке модели наложены следующие ограничения и допущения:

- скорость увеличения температуры рабочего пространства колодца в период подъема температуры ограничена тепловой мощностью ячейки:
- максимальная температура рабочего пространства ограничена стойкостью огнеупорной кладки колодца:
- предельная температура поверхности слитков не должна превышать температуры пережога данной марки стали:
- температура металла, футеровки и дымовых газов постоянны по ширине колодца;
- плотность потока тепловых потерь через футеровку печи примерно равна плотности потока конвективной теплоотдачи от дымовых газов к внутренней поверхности футеровки, поэтому лучистую составляющую результирующего теплового потока на этой поверхности можно считать равной нулю;
- для всех поверхностных зон коэффициент конвективной теплоотдачи имеет постоянное значение;
- состав продуктов сгорания постоянен по всему рабочему пространству печи, их удельная теплоемкость не зависит от температуры.

На рис.1 приведены структурная модель рекуперативного колодца (а) и упрощенная расчетная схем (б). На рисунке приняты следующие условные обозначения: $V_{г}$ – расход газообразного топлива; $V_{в}$ – расход воздуха; $V_{д}$ – выход дымовых газов; $Q_{м}$ – тепло, излучаемое металлом во внутреннюю среду колодца; $Q_{с}$ – тепло, вносимое продуктами сгорания в колодец; $Q_{пс}$ – тепло, теряемое колодцем в окружающую среду вместе с продуктами сгорания; $t_{к}$ – температура среды в колодце; $t_{с}$ – температура слитка; $t_{д}$ – температура дымовых газов; $t_{дз}$ – заданная уставка температуры дымовых газов, $t_{о.с}$ – температура окружающей среды.



а)



б)

Рисунок 1 – Структурная модель (а) и расчетная схема (б)

Исследования, проведенные на одном из металлургических заводов [3], показали, что температуру поверхности $\Psi_{нов}(t)$ и среднюю интегральную температуру слитков $\Psi_{cp}(t)$ можно рассчитать по температуре рабочего пространства ячейки $\Psi_{я}(t)$, решая упрощенное дифференциальное уравнение [3]:

$$T \cdot \frac{d\Psi_{cp}(t)}{dt} + \Psi_{cp}(t) = \Psi_{я}(t), \quad (1)$$

где T – постоянная времени нагрева, равная 100-200 мин, возрастает с увеличением садки и размеров слитков и определяется экспериментально.

При этом накладываем следующие ограничения:

- скорость подъема температуры ячейки в начальный момент ограничена тепловой мощностью ячейки;
- граничная температуры поверхности слитков не должна превышать температуру перерасхода данной марки стали.

На основании этих данных определим передаточные функции нагревательного колодца по каналам расхода топлива и регулирования давления в рабочем пространстве.

Приняв за основу уравнение (1), введем замену :

$$\Psi_{cp}(t) \rightarrow Y(p); \Psi_{я}(t) \rightarrow X(p); \frac{d}{dt} \rightarrow p. \quad (2)$$

Тогда получим:

$$TpY(p) + Y(p) = X(p). \quad (3)$$

Значит, передаточная функция нагревательного колодца по каналу управления температурой слитка по изменению температуры внутри ячейки будет иметь вид апериодического звена первого порядка:

$$W(p) = \frac{1}{Tp+1}. \quad (4)$$

В свою очередь температура среды внутри ячейки определяется температурой дымовых газов, получаемых при сгорании газообразного топлива, и регулируется расходами топлива и дутьевого воздуха. На основании полученной передаточной функции (4) разработана структурная схема системы управления тепловыми режимами колодца и проведено исследование ее работы путем моделирования в среде MatLab при ступенчатом входном управляющем воздействии. На рис. 2 представлена структурная схема синтезируемой системы управления температурой слитков по контуру управления по расходу топлива (при постоянном расходе воздуха) в среде Simulink.

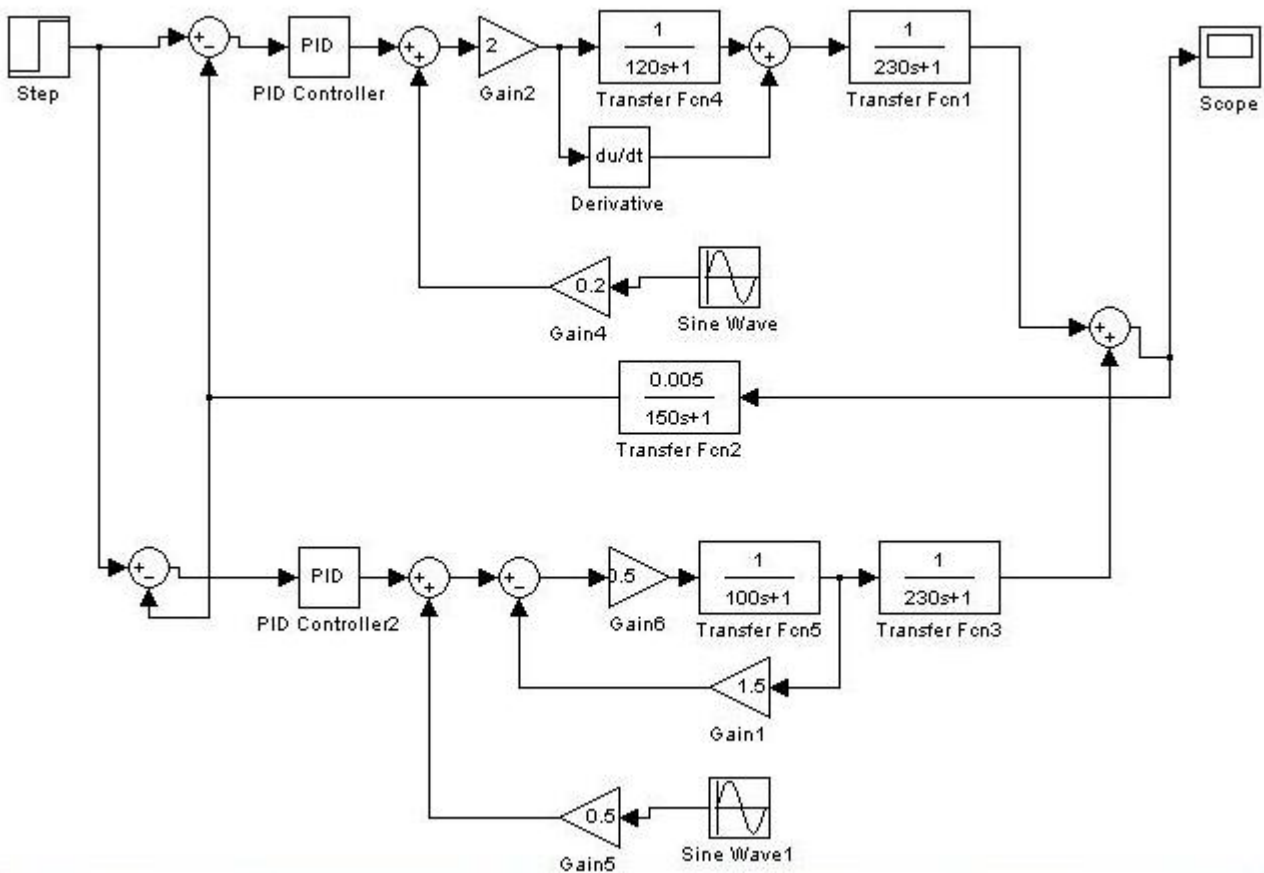


Рисунок 2 – Структурная схема модели рекуперативного нагревательного колодца в пакете Simulink

На рисунке 3 приведены графики переходных процессов по изменению температуры слитка при различных видах управления и при наличии/отсутствии возмущающих воздействий. Исходя из характеристики 1 при отсутствии ПИД-регулятора и наличии внешних возмущений переходный процесс системы неустановившийся, и, следовательно, отсутствует возможность достижения требуемой температуры слитка.

При применении ПИД-регулятора (характеристика 2) без внешних возмущающих воздействий (внешние присосы воздуха, изменение внешней температуры окружающей среды) система работает с незначительным перерегулированием $\sigma = 2,5\%$, а установившееся

значение температуры $T_{уст} = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается за время регулирования $t_p = 200 \text{ мин.}$ При введении в модель имитации по внешним возмущениям (характеристика 3) получаем переходный процесс с перегуливанием $\sigma = 12,5\%$, время регулирования при этом равно $t_p = 380 \text{ мин.}$, что удовлетворяет технологическим требованиям по нагреву слитков.

Исходя из полученных значения показателей качества переходных процессов системы по характеристикам 2-3 можно сделать вывод, что разработанная система автоматического управления обеспечивает приемлемое качество управления тепловым режимом колодца.

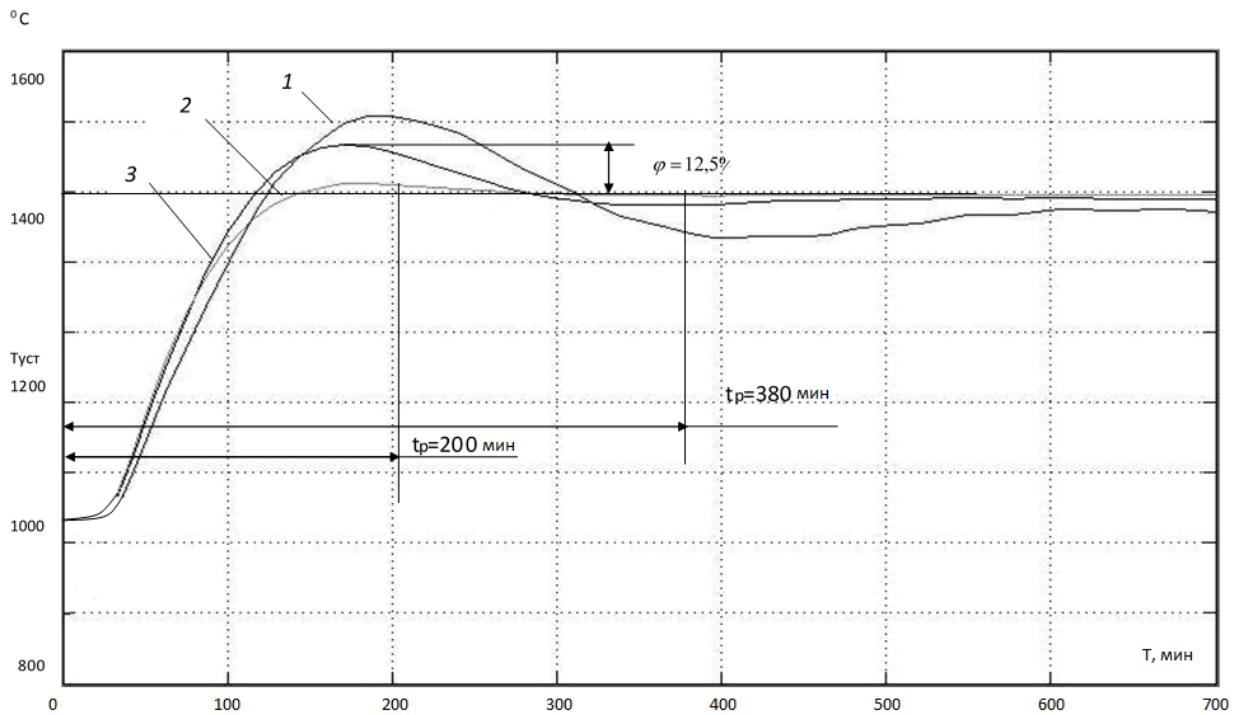


Рисунок 3 – Графики переходных процессов системы управления тепловыми режимами нагревательного колодца: 1) без ПИД- регулятора с внешними возмущениями; 2) с ПИД-регулятором без внешних возмущений; 3) с ПИД-регулятором с внешними возмущениями

Таким образом, в данной статье рассмотрели рекуперативный нагревательный колодец как объект автоматизации, выдвинули требования к его эффективному и безаварийному функционированию и, в соответствии с ними, разработали систему автоматического управления тепловыми режимами данного объекта. Для оценки эффективности предложенной системы провели исследование ее качественных показателей в среде Simulink MatLab путем имитационного моделирования. Для этого была разработана модель системы управления рекуперативным нагревательным колодцем через динамические звенья, которая позволяет исследовать изменение температуры слитков при управлении по расходу топлива. Полученные динамические характеристики переходных процессов подтверждают высокую эффективность разрабатываемой САУ.

Перечень ссылок

1. Техническая термодинамика : учеб. для машиностроит. спец. Вузов / В. И. Крутов [и др.] ; под. ред. В. И. Крутова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1991. – 384 с. : ил.
2. Ревун, М. П. Автоматическое управление нагревом металла / М. П. Ревун. – Киев : Техника, 1973. – 138 с.
3. Арутюнов, В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов. – Москва : Металлургия, 1990. – 239 с.