

УДК 669.046

Изотов Б.В.¹, Шаламов Ю.Н.², Безчерев А.С.³

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ИМПУЛЬСНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ

Разработана математическая модель тепловой работы методической печи с импульсной системой отопления. Введено понятие коэффициента использования мощности горелок. Определены основные параметры импульсного отопления методической печи.

Системы импульсного отопления нагревательных печей начали активно разрабатываться начиная с 70-х годов XX столетия [1 – 3] и применялись в печах камерного типа, в первую очередь, нагревательных колодцах. Позже импульсное отопление получило своё развитие в термических печах [4]; также были рассмотрены режимы импульсно-скоростного нагрева [5]. В то же время тепловая работа методических печей с импульсным отоплением и нагрев в них металла освещены мало; некоторые специфические особенности не раскрыты и требуют дальнейшего изучения.

В 2008 г. в Российской Федерации на стане 2000 ОАО «ММК» и Украине на стане 1700 ОАО «ММК им. Ильича» введены в строй методические печи типа “Digit@l” конструкции фирмы “Stein Heurtey” (ныне “Fives Stein”) с импульсной системой отопления.

Методическая печь стана 1700 представляет собой печной агрегат с шагающими балками длиной 51,7 м, шириной “в свету” 11,15 м и максимальной производительностью на холодном всаде 350 т/час. Печь имеет плоский свод. Отопление только боковое: в стенах печи установлены 44 горелки с широкой разверткой факела регулируемой длины. Горелки располагаются над и под уровнем балок и объединены в 22 зоны автоматического регулирования (11 верхних и 11 нижних). Методическая печь работает в режиме импульсного отопления. Температура в зоне регулируется путём изменения продолжительности импульсов включения горелок при постоянном периоде включения. Температурный профиль по длине сляба (ширине печи) регулируется за счёт изменения длины факела путём подачи первичного или вторичного воздуха для горения топлива (природного газа или природно-доменной смеси). Воздух нагревается в металлическом трубчатом рекуператоре до 500 – 550 °С.

С пуском и эксплуатацией печи возникла задача: разработка и оптимизация режимов тепловой работы при импульсном отоплении.

Целью настоящей работы является определение основных характеристик методической печи с импульсным отоплением:

- коэффициента использования мощности горелок в зоне β_z ;
- продолжительности импульса для каждой зоны $\tau_{имп}$;
- графика работы горелок в импульсном режиме;
- температурно-расходного режима нагрева металла.

Предложены основные термины импульсного отопления.

Импульс – отрезок времени, в течение которого горелка работает при максимальном расходе топлива.

Пауза – отрезок времени между двумя последовательными импульсами, в течение которого топливо на горелку не подаётся.

Период включения – отрезок времени между началами двух последовательных импульсов.

¹ОАО “ММК им. Ильича”, инж.

²ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

³ОАО “ММК им. Ильича”, канд. техн. наук

Коэффициент использования мощности горелок в зоне z – отношение длительности импульса к периоду включения, выраженное в процентах:

$$\beta_z = \frac{\tau_{\text{имп}}}{\tau_{\text{периода}}} * 100 = \frac{B_z}{B_z^{\text{уст}}} * 100, \% \quad (1)$$

где $\tau_{\text{периода}}$ – период включения, с,

$\tau_{\text{имп}}$ – продолжительность одного импульса, с,

B_z – средний расход топлива в зоне, $\text{м}^3/\text{с}$,

$B_z^{\text{уст}}$ – установленный расход топлива на зону, $\text{м}^3/\text{сек}$.

Температурно-расходный режим нагрева металла в методической печи с импульсным отоплением – графическое изменение температуры печи, металла и коэффициента использования мощности горелок по длине печи.

На первом этапе потребовалось создание математической модели тепловой работы печи как “инструмента” для реализации поставленной цели. Её структура представлена на рис.1. Основа математической модели печи – модель нагрева металла. Нагрев металла рассматривается как двухсторонний нагрев твёрдого непрозрачного тела, имеющего форму пластины бесконечной длины толщиной δ . Нагрев происходит за счёт излучения и конвекции с преобладанием доли лучистого теплового потока. Допускаем, что в методической зоне температура печи линейно возрастает, а в отапливаемых зонах постоянна по объёму зоны (рис. 2).

Коэффициент приведенной степени черноты в каждой зоне рассчитывается по формуле В.Н. Тимофеева:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{м}} \cdot \varepsilon_{\text{д.г.}} \cdot \frac{\frac{1}{\omega} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{д.г.}}) + 1}{\frac{1}{\omega} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{д.г.}}) \cdot (\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{д.г.}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})) + \varepsilon_{\text{д.г.}}} \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{м}}$, $\varepsilon_{\text{д.г.}}$ – степень черноты металла и дымовых газов соответственно;

ω – степень развития кладки

$$\omega = \frac{F_{\text{кл}}}{F_{\text{м}}} \quad (3)$$

где $F_{\text{кл}}$, $F_{\text{м}}$ – площади металла и кладки в зоне соответственно.

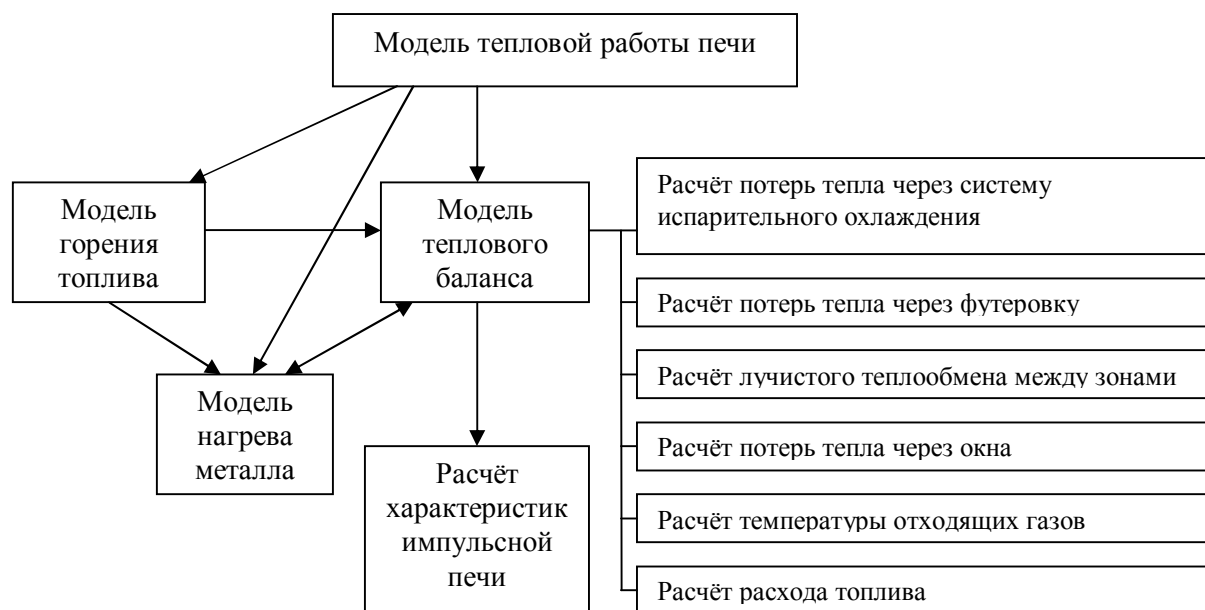


Рис. 1 – Структура математической модели тепловой работы импульсной методической печи

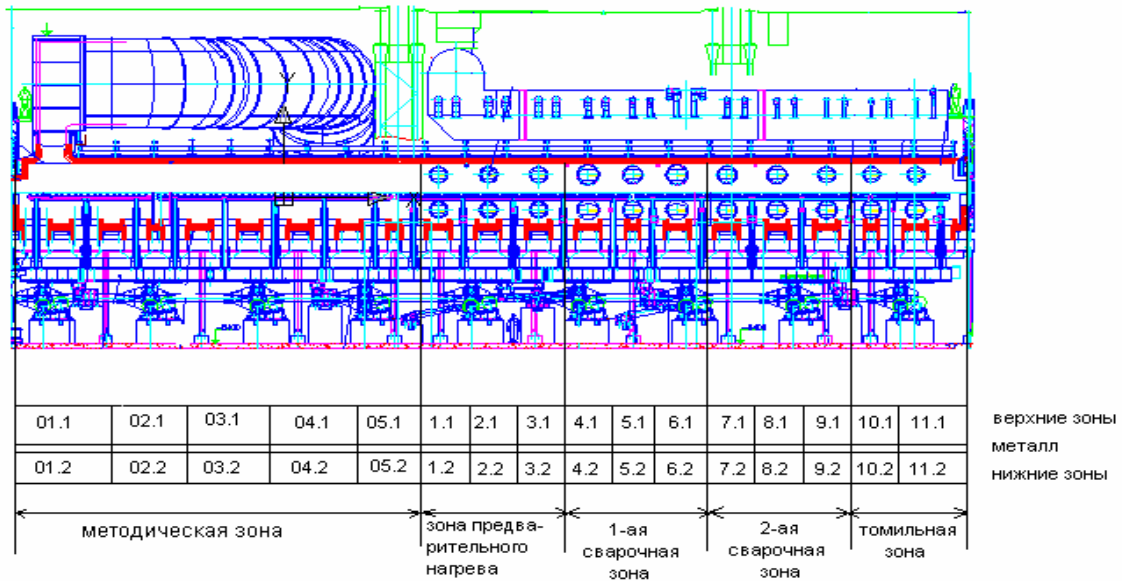


Рис. 2 – Схема разбивки печи на расчётные зоны (цифрами указаны номера расчётных зон)

По толщине сляб нагревается за счет теплопроводности материала. Дифференциальное уравнение теплопроводности в случае зависимости теплофизических свойств от температуры имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (c(T)\rho(T)T) = \lambda(T) \frac{d^2 T}{dx^2}, \quad (4)$$

где T – температура, K ;

c – удельная массовая теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$;

ρ – плотность металла, $кг/м^3$;

λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot K}$.

Для решения уравнения (4) используем явную разностную схему, заменяя непрерывную функцию $T(x;\tau)$ дискретной сеточной функцией T_i^k , где x – координата, τ – время, k – дискретная точка во времени, $i = 1..N$ – дискретная координата по толщине сляба. Температура поверхности сляба в момент времени $(k+1)$ рассчитывается по формуле:

$$T_N^{k+1} = 2 \cdot f_{N-} \cdot T_{N-1}^k + (1 - 2 \cdot f_{N-} (1 + B)) \cdot T_N^k + 2 f_{N-} \cdot B \cdot T_{печи}, \quad (5)$$

а по толщине

$$T_i^{k+1} = T_i^k + f_{i+} (T_{i+1}^k - T_i^k) - f_{i-} (T_i^k + T_{i-1}^k), \quad (6)$$

где $T_{печи}$ – температура печи, K ,

f_{i+} , f_{i-} – аналоги числа Фурье.

$$f_{i+} = \frac{\lambda_{i+} \cdot \Delta \tau}{c_i \cdot \rho_i \cdot \Delta x^2}, \quad (7)$$

$$f_{i-} = \frac{\lambda_{i-} \cdot \Delta \tau}{c_i \cdot \rho_i \cdot \Delta x^2}, \quad (8)$$

где Δx – расстояние между узловыми точками, $м$,

λ_{i+} , λ_{i-} – коэффициент теплопроводности при температурах.

$$T_{i+}^k = \frac{T_i^k + T_{i+1}^k}{2}, \quad (9)$$

$$T_{i-}^k = \frac{T_i^k + T_{i-1}^k}{2}, \quad (10)$$

соответственно, B – аналог числа Био.

Средний расход топлива в зоне z рассчитывается из условий теплового баланса

$$B_z = \frac{Q_M^z + Q_{\text{фут}}^z + Q_{\text{СИО}}^z + Q_{\text{окна}}^z + Q_{\text{неучт}}^z - Q_{\text{тр}}^z - Q_{\text{луч}}^z}{Q_{\text{н}}^p + q_{\text{ф.в.}} - q_{\text{ух.д}}^z}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (11)$$

где Q_M^z – количество теплоты, затрачиваемое на нагрев металла в зоне в единицу времени, Вт ;
 $Q_{\text{фут}}^z$, $Q_{\text{СИО}}^z$, $Q_{\text{окна}}^z$, $Q_{\text{неучт}}^z$ – потери теплоты через футеровку, СИО, излучением через окна и неучтённые в единицу времени соответственно, Вт ;

$Q_{\text{тр}}^z$ – количество теплоты, вносимое в зону транзитными дымовыми газами, в единицу времени, Вт ;

$Q_{\text{н}}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$;

$q_{\text{ф.в.}}$ – удельное количество теплоты, вносимое подогретым воздухом, $\text{Дж}/\text{м}^3$ смешанного газа;

$q_{\text{ух.д}}^z$ – удельное количество теплоты, уходящее с дымовыми газами, $\text{Дж}/\text{м}^3$ смешанного газа;

$Q_{\text{луч}}^z$ – количество теплоты, вносимое в зону излучением от дымовых газов других зон, в единицу времени, Вт ,

$$Q_{\text{луч}}^z = \sum_{i=0}^{11} Q_{iz}, \quad (12)$$

$$Q_{iz} = \sigma_0 \varepsilon_i \varepsilon_z (1 - \varepsilon_{i+1})(1 - \varepsilon_{i+2}) \dots (1 - \varepsilon_{z-1}) \varphi_{iz} (T_i^4 - T_z^4) F, \quad (13)$$

где ε_i , ε_z , ε_{i+1} , ε_{z-1} – степень черноты дымовых газов в зонах i , z , $(i+1)$, $(z-1)$ соответственно,

φ_{iz} – угловой коэффициент излучения,

T_i , T_z – температура в зонах i , z , К ,

F – площадь поперечного сечения печи, м^2 .

Температура дымовых газов на выходе из методической зоны также рассчитывается из условий теплового баланса.

Коэффициент использования мощности горелок зоны z составляет

$$\beta_z = \frac{B_z}{B_z^{\text{уст}}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

а продолжительность одного импульса

$$\tau_{\text{имп}} = \frac{\tau_{\text{периода}} \cdot \beta_z}{100\%}. \quad (15)$$

Для адаптации к реальным производственным условиям определены настроечные коэффициенты для каждой расчётной зоны. Эти коэффициенты представляют собой отношение расчётной температуры печи $T_{\text{печи}}$ к измеренной температуре печи $T_{\text{печи}}^{\text{изм}}$. При настройке модели использованы результаты опытного нагрева сляба толщиной 200 мм из стали марки 08пс в нагревательной печи стана 1700 ОАО «ММК им. Ильича», полученные с помощью автономного регистратора температуры «DataPaq». Модель, настроенная вышеописанным способом, позволила достаточно точно описать изменение температуры металла в процессе нагрева: погрешность расчёта среднemasсовой температуры сляба на выдаче составила 7 °С, в процессе нагрева – до 20 °С.

Температурно-расходный режим нагрева сляба низкоуглеродистой стали толщиной 200 мм за 3,2 часа, разработанный с помощью вышеописанной модели приведен на рис. 3.

Получены основные параметры импульсного отопления при нагреве вышеуказанного сляба с периодом включения 60 с:

зона:	предварительного нагрева	1-ая сварочная	2-ая сварочная	томильная
β , %	26 – 37	62 – 77	74 – 99	62 – 88
$\tau_{\text{имп}}$, с	16 – 22	37 – 46	44 – 60	37 – 53

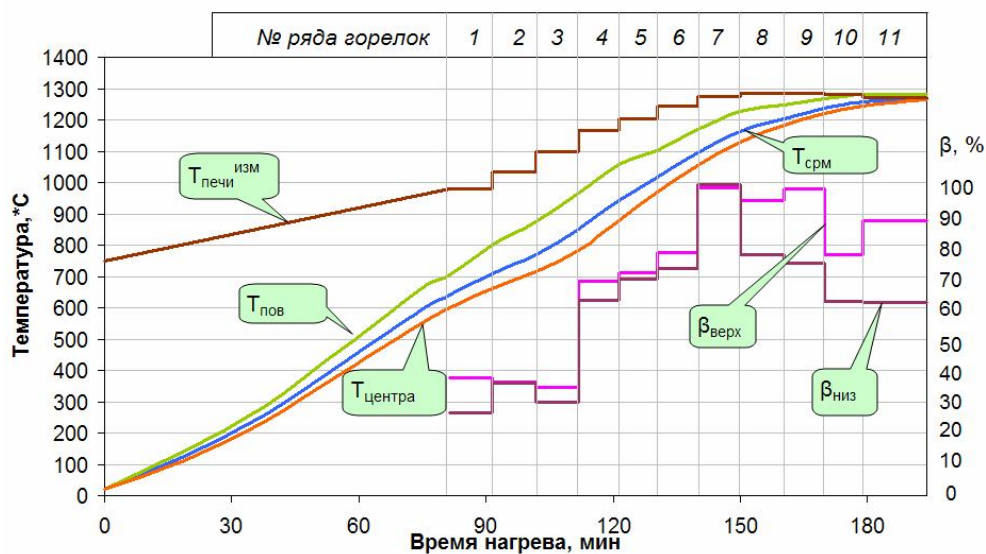


Рис. 3 – Температурно-расходный режим нагрева металла в методической печи с импульсным отоплением ($T_{пов}$, $T_{срм}$, $T_{центра}$ – температуры верхней поверхности сляба, среднемаховая и в центре сляба соответственно; $\beta_{верх}$, $\beta_{низ}$ – коэффициенты использования мощности горелок верхних и нижних зон печи соответственно)

Выводы

1. С использованием разработанной математической модели тепловой работы методической печи с импульсным отоплением определены основные параметры режима импульсного отопления при нагреве слябов низкоуглеродистых марок сталей в условиях стана 1700 ОАО "ММК им. Ильича".
2. Для оптимизации технологии нагрева металла в методической печи с импульсным отоплением необходимо продолжить исследования распределения температуры по сечению слябов и в рабочем пространстве агрегата при различных размерном, марочном, температурном сортаменте нагреваемого металла и производительности печи с уточнением математической модели.

Перечень ссылок

1. Исследование теплового режима нагревательного колодца с одной верхней горелкой при импульсном отоплении / М.А. Глинков, В.Ю. Каганов, Ш. Энекем, Б. Габор, Т. Сарка // Сталь. – 1973. – № 2. – С. 171 – 173.
2. Работа нагревательных колодцев с верхней горелкой при пульсирующей факеле / Е.А. Капустин, Ю.Н. Шаламов, А.М. Кулаков, П.Т. Кривенко, А.И. Киселев // Сталь. – 1980. – № 2. – С. 1105 – 1107.
3. Ревун М.П. Интенсификация работы нагревательных печей // М.П. Ревун, В.И. Гранковский, А.Н. Байбуз. – К.: Техніка, 1987. – 136 с.
4. Ревун М.П. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей / М.П. Ревун, Е.Н. Баршанко, А.И. Чепрасов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 97 – 100.
5. Прибытков И.А. О распределении тепловой нагрузки при импульсно-скоростном нагреве металла / И.А. Прибытков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 7. – С. 66 – 69.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 23.01.2009