УДК 669.046:621.783.001.57 DOI: 10.14529/met200408

ОБ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА СЛЯБОВ В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

В.И. Панферов[1, 2], С.В. Панферов[1]

[1] Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,
[2] Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия

Введение. В условиях повышения требований к качеству нагрева металла перед прокаткой задача создания и совершенствования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) методических печей является вполне актуальной. **Цель исследования:** рассмотреть задачу физической обусловленности и параметрической настройки так называемой экспоненциальной модели, часто применяемой для описания нагрева слябов в методических печах прокатного производства. Выясняется вопрос о том, насколько экспоненциальная модель соответствует физике процесса нагрева, какая точность описания при этом может быть достигнута. **Материалы и методы.** Производится сравнение как структур моделей – физической модели на основе уравнения теплопроводности и экспоненциальной модели, так и результатов расчета среднемассовой температуры металла по этим моделям. **Результаты.** Показано, что экспоненциальная модель в точности соответствует физике процесса нагрева только для термически тонких тел. Получено дифференциальное уравнение для ошибки расчета среднемассовой температуры термически массивных тел. При этом анализируются три режима нагрева: при постоянной температуре рабочего пространства и при линейном и экспоненциальном росте этой температуры. Приведено решение уравнения для ошибки расчета при нагреве при постоянной температуре рабочего пространства. Установлено, что экспоненциальная модель удовлетворительно описывает процесс, как правило, только для режима нагрева при постоянной температуре рабочего пространства. Найдено рациональное значение настраиваемого параметра экспоненциальной модели. Указывается достаточно простая схема перехода от параметров модели, ядром которой является дифференциальное уравнение теплопроводности, к параметрам упрощенной экспоненциальной модели для среднемассовой температуры. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании алгоритмического обеспечения АСУ ТП методических печей.

Ключевые слова: нагрев металла, методическая печь, автоматизированная система управления, экспоненциальная модель, ошибка расчета среднемассовой температуры, параметрическая настройка модели.

Постановка задачи

Известно, что удовлетворение современных требований к автоматизации нагревательных печей прокатного производства возможно только в рамках систем управления с обратной связью по температуре нагреваемого металла [1–3]. При этом следует иметь в виду, что при нагреве слябов в методических печах для непосредственного измерения доступна лишь температура их поверхности. Температура внутренних точек, так же как и среднемассовая (среднеобъемная) температура, не может быть принципиально измерена инструментальными средствами. Определяются они расчетным путем, либо напрямую по математической модели, либо по разработанным на ее основе алгоритмам контроля [4–6].

В литературе известно большое количество работ, посвященных моделированию и алгоритмизации процесса нагрева, расчету температурных полей нагреваемых заготовок [см., например, 1–8], однако безупречного решения проблемы до сих пор нет, требуются дальнейшие исследования и проработки, в частности, задачи выбора приемлемой структуры математической модели. Обуславливается это во многом тем, что температурные поля заготовок при нагреве в печах характеризуются наличием чрезвычайно большого количества особенностей, причем их детальный учет возможен только в рамках достаточно сложных структур моделей, а это при создании АСУ ТП и нереально, да и нецелесообразно, поскольку система должна работать в режиме реального времени, а *требуемая вычислительная мощность УВМ не должна быть слишком большой.* Кроме того, должная отработка (должное предотвращение) всех нежелательных особенностей температурных полей заготовок практически невозможна, да и не является абсолютно необходимой. Для этого потребуется серьезное усложнение как самой системы обогрева металла, так и технической и, естественно, алгоритмической структур АСУ ТП. Для управления технологическим процессом достаточно иметь некий интегральный показатель качества нагрева (температурного поля), в качестве такового часто используется так называемая среднемассовая температура металла. Для ее расчета в ряде случаев достаточно успешно применяют так называемые экспоненциальные зависимости (модели) [9–11]. Причем полагается, что процесс нагрева условно разбит на n участков, на каждом из которых параметры модели имеют свои собственные численные значения. Считается, что таким образом (с помощью кусочно-постоянной аппроксимации параметров) учитываются сложные нелинейные процессы внешнего и внутреннего теплообмена в печах. Однако при этом подчеркивается, что экспоненциальная структура таких моделей выбрана в основном из эвристических соображений, связь с физикой процесса никак не отмечается, указывается на статистический характер этих зависимостей [10]. Вместе с тем интересно было бы знать, насколько экспоненциальные модели соответствуют физике процесса нагрева, какая точность описания при этом может быть достигнута. Ведь хорошо известно, что чем точнее модель соответствует физике явления, тем больше допустимый диапазон ее применимости (работы).

В данной работе показано, что экспоненциальные модели обуславливаются (с некоторой погрешностью) самой физикой процесса нагрева, описываемой дифференциальным уравнением теплопроводности. Также указывается достаточно простая схема перехода от параметров модели, ядром которой является дифференциальное уравнение теплопроводности, к параметрам упрощенной модели для среднемассовой температуры.

Решение задачи

Для решения поставленной задачи опишем процесс нагрева слябов в методических печах на рассматриваемом участке расчета полностью линеаризованным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2},\ 0<x<L, \tau>0 \quad (1)$$

с начальным

$$t(x,0)=t^0(x),\ 0\le x\le L \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x}=0,\ \tau\ge 0; \quad (3)$$

$$\lambda\frac{\partial t\ (L,\tau)}{\partial x}=\alpha[t_{\Pi}(\tau)-t(L,\tau)],\ \tau\ge 0, \quad (4)$$

где $t(x,\tau)$ – температура в точке с пространственной координатой x в момент времени τ; a и λ – соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности; L – расчетная толщина заготовки, $t^0(x)$ – некоторая функция, описывающая начальное температурное поле заготовки; α – коэффициент теплоотдачи; $t_{\Pi}(\tau)$ – температура рабочего пространства печи.

Здесь полагается, что за счет разбиения процесса на n расчетных участков, на каждом из которых параметры указанной модели имеют свои собственные численные значения, удается должным образом учитывать сложные нелинейные процессы внешнего и внутреннего теплообмена в печах.

Отметим, что описание процесса в линеаризованной форме соответствует вышеупомянутой концепции кусочно-постоянной аппроксимации параметров при моделировании сложного нелинейного процесса нагрева.

Очевидно, что при одностороннем нагреве L равно действительной толщине сляба, а при симметричном нагреве L равно половине фактического сечения заготовки. Кроме того, как показано в работе [12], за счет выбора уставок (заданий) регуляторам температуры нижних зон при фактически несимметричном нагреве температурное поле заготовки можно тоже сделать симметричным, поэтому и в этих случаях под L следует понимать половину толщины сляба. Следует заметить, что результаты работы [12] можно рассматривать как теоретическую основу допустимости описания процесса в симметричной форме, это во многих случаях приводит к существенному упрощению решения задач – проблема выбора расчетной толщины заготовки автоматически снимается, а при оптимизации управления печами это позволяет в два раза уменьшить размерность искомого вектора управления.

Проинтегрируем уравнение (1) по координате x в пределах от 0 до L и разделим обе его части на L, тогда получим

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{a}{L}\left[\frac{\partial t(L,\tau)}{\partial x} - \frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x}\right], \qquad (5)$$

где $\bar{t} = \frac{1}{L}\int_0^L t(x,\tau)\,dx$ – среднее значение температуры заготовки (среднемассовая температура).

Подставим соотношения (3) и (4) в уравнение (5), тогда получим

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{a\,\alpha}{\lambda\,L}\left[t_{\Pi}(\tau) - t(L,\tau)\right]. \qquad (6)$$

Описание нагрева металла с помощью экспоненциальных моделей означает, что дифференциальное уравнение процесса имеет вид

$$\frac{d\,\bar{t}_{\mathrm{P}}(\tau)}{d\tau} = \theta\left[t_{\Pi}(\tau) - \bar{t}_{\mathrm{P}}(\tau)\right], \qquad (7)$$

где θ^{-1} – некоторая постоянная времени, это единственный параметр экспоненциальной модели, который, как это понятно, должен быть определен по реальным данным. Здесь через $\bar{t}_P(\tau)$ обозначено вычисляемое по экспоненциальной модели значение среднемассовой температуры металла.

Сравнивая вышеприведенные уравнения (6) и (7), нетрудно увидеть, что экспоненциальная модель полностью бы соответствовала физике процесса нагрева, если бы среднемассовая температура тела не отличалась от температуры его поверхности. Однако в реальных условиях это не так, поэтому для уменьшения погрешности расчета по модели (7) необходимо отыскивать оптимальное значение параметра θ, прямое приравнивание $\theta = \frac{a\,\alpha}{\lambda\,L}$, очевидно, годится только для случая термически тонких тел (это когда температура поверхности $t(L,\tau)$ тела равна его среднемассовой температуре $\bar{t} = \frac{1}{L}\int_0^L t(x,\tau)\,dx$).

Примем следующее начальное условие для дифференциального уравнения (7)

$$\bar{t}_{\mathrm{P}}(0) = \frac{1}{L}\int_0^L t^0(x,\tau)\,dx \qquad (8)$$

и проанализируем ошибку расчета среднемассовой температуры по модели (7), (8). Вычитая (7) из (6) с учетом начальных условий, получим, что ошибка расчета среднемассовой температуры $\delta\bar{t}(\tau) = \bar{t}(\tau) - \bar{t}_P(\tau)$ удовлетворяет следующему дифференциальному уравнению первого порядка

$$\frac{d\delta\bar{t}(\tau)}{d\tau} = \theta\left[\varphi(\tau) - \delta\bar{t}(\tau)\right] \qquad (9)$$

с начальным условием

$$\delta\bar{t}(0) = 0, \qquad (10)$$

где $\varphi(\tau) = (\frac{a\,\alpha}{\lambda\,L\theta} - 1)t_{\Pi}(\tau) - \frac{a\,\alpha}{\lambda\,L\theta}t(L,\tau) + \bar{t}(\tau).$

Известно, что решение дифференциального уравнения (9) с начальным условием (10) представляется в виде

$$\delta\bar{t}(\tau) = \theta\exp(-\theta\tau)\int_0^{\tau}\exp(\theta\tau)\,\varphi(\tau)\,d\tau. \qquad (11)$$

Подставляя в уравнение (11) конкретное значение $\varphi(\tau)$, найдем, как изменяется ошибка расчета среднемассовой температуры. Понятно, что эта величина будет разной в различных случаях. Конечно, предварительно необходимо определить $\varphi(\tau)$ для конкретного режима нагрева.

Решение уравнений (1)–(4) для произвольной функции $t_\Pi(\tau)$, описывающей изменение температуры рабочего пространства печи во времени, известно [13]. Поэтому, используя это решение, найдем общее выражение для $\varphi(\tau)$:

$$\varphi(\tau)=\sum_{i=1}^{\infty}\left\{\frac{2}{L}\cdot\frac{\mu_i}{\mu_i+\sin\mu_i\cdot\cos\mu_i}\cdot\int_0^L[t^0(x)-t_\Pi(0)]\cdot\cos\mu_i\frac{x}{L}\cdot dx-\right.$$

$$\left.-\frac{2\sin\mu_i}{\mu_i+\sin\mu_i\cdot\cos\mu_i}\cdot\int_0^\tau\exp(\mu_i^2\frac{a\tau}{L^2})\cdot\frac{d\,t_\Pi(\tau)}{d\tau}\cdot d\tau\right\}\cdot\frac{\sin\mu_i-\mu_i\dfrac{a\alpha}{\lambda L\theta}\cos\mu_i}{\mu_i}\exp(-\mu_i^2\frac{a\tau}{L^2}), \qquad (12)$$

где μ_i $(i=1,2,...)$ – корни уравнения $\dfrac{\mu_i\lambda}{\alpha L}=\operatorname{ctg}\mu_i$.

При нагреве слябов в методических печах температура рабочего пространства в зонах обычно поддерживается на постоянном уровне, только в неуправляемой (неотапливаемой) методической зоне температура линейно растет к началу первой сварочной зоны. Поэтому прежде всего следует проанализировать особенности первого режима нагрева, возможность его описания экспоненциальной моделью.

Для этого режима нагрева установлено, что величина ошибки прямо пропорциональна разности начальной температуры металла и температуры рабочего пространства на данном участке расчета [14]. Эта характеристика (особенность) вполне понятна и объяснима, так как разность указанных температур прямо пропорциональна градиенту температурного поля на поверхности заготовки (см. уравнение (4)), а чем больше его величина, тем значительнее неравномерность температуры по ее сечению и тем сильнее среднемассовая температура заготовки отличается от температуры ее поверхности.

Далее, при нагреве при постоянной температуре рабочего пространства с увеличением времени среднемассовая температура обязательно приближается к температуре поверхности, поэтому величина ошибки тоже в пределе стремится к нулю, следовательно, для удаленных моментов времени описание нагрева с помощью экспоненциальных моделей становится более оправданным. А поэтому и наиболее рациональное значение параметра θ в этом случае должно стремиться к $\dfrac{a\alpha}{\lambda L}$, т. е. $\theta\to\dfrac{a\alpha}{\lambda L}$. Однако для начальных моментов времени расчетного участка нагрева эта разность температур, как правило, велика.

При $t_\Pi(\tau)=t_\Pi(0)=\text{const}$ и $t^0(x)=t^0=\text{const}$ формула для определения ошибки расчета имеет вид

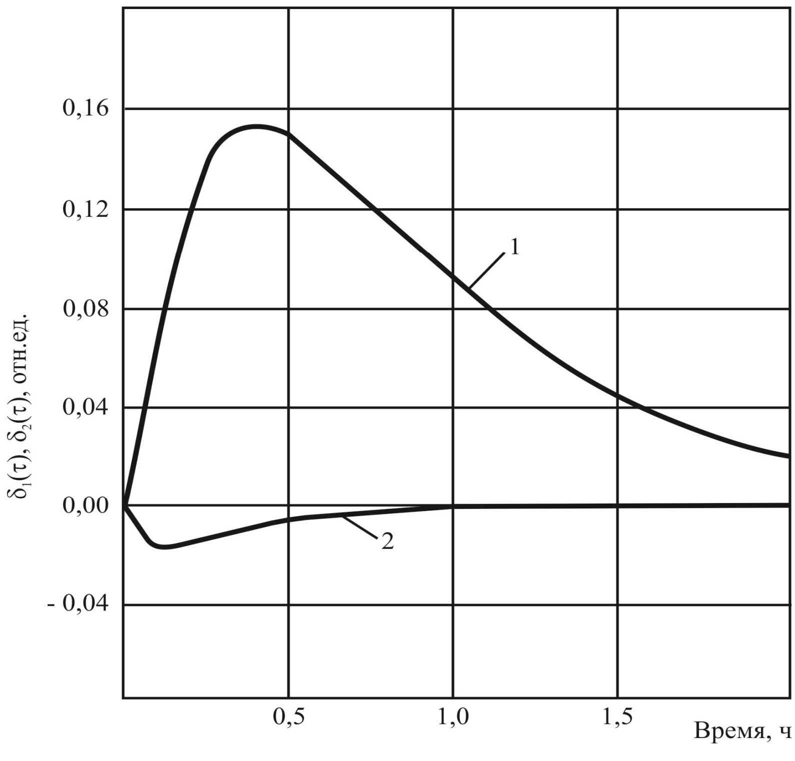
$$\delta\bar{t}(\tau)=\theta[t^0-t_\Pi(0)]\sum_{i=1}^{\infty}\left\{\frac{L^2}{\theta L^2-\mu_i a}\cdot\frac{2\sin\mu_i(\sin\mu_i-\mu_i\dfrac{a\alpha}{\lambda L\theta}\cos\mu_i)}{\mu_i(\mu_i+\sin\mu_i\cdot\cos\mu_i)}\cdot[\exp(-\mu_i^2\frac{a\tau}{L^2})-\exp(-\theta\tau)]\right\}. \qquad (13)$$

Из формулы (13) отчетливо видно, что если бы $\theta=\dfrac{\mu_i a}{L^2}$ для любого $\forall\ i$, то ошибка расчета была бы в точности равна нулю для любого момента времени и, следовательно, экспоненциальная модель абсолютно точно соответствовала бы физике процесса нагрева, описываемой дифференциальным уравнением теплопроводности. Однако это совершенно не возможно, параметр θ не может быть равен одновременно различным числам. При этом, однако, выясняется, что при $\theta\to\dfrac{\mu_i a}{L^2}$ в формуле (13) слагаемое, соответствующее данному значению i, становится равным нулю. Заметим, что при выяснении этого факта приходится по правилу Лопиталя раскрывать неопределенность вида $0/0$ и учитывать соотношение $\dfrac{\mu_i\lambda}{\alpha L}=\operatorname{ctg}\mu_i$. Поэтому вполне очевидно, что за счет выбора числового значения параметра θ следует обнулить самое большое слагаемое в сумме (13), а это, как известно, имеет место для $i=1$ [15–17], т. е. разумно полагать, что $\theta=\mu_1^2\dfrac{a}{L^2}$, где μ_1 – первый корень уравнения $\dfrac{\mu\lambda}{\alpha L}=\mathrm{ctg}\,\mu$, что в принципе согласуется с теорией регулярного теплового режима [15–17], допускающей описание нагрева первым членом ряда, представляющего решение системы (1)–(4). Таким образом, настроенное на физику процесса нагрева уравнение (7) будет иметь вид

$$\frac{d\,\overline{t}_{\mathrm{P}}(\tau)}{d\tau}=\mu_1^2\frac{a}{L^2}\left[t_{\Pi}(\tau)-\overline{t}_{\mathrm{P}}(\tau)\right], \tag{14}$$

Из уравнения (14) вытекает достаточно простой способ перехода от физической модели (1)–(4) к экспоненциальной модели (14) (или (7)): a и L определить по характеристикам заготовки, а μ_1 найти из решения уравнения $\dfrac{\mu\lambda}{\alpha L}=\mathrm{ctg}\,\mu$. При этом, конечно, предварительно из решения задачи параметрической идентификации модели (1)–(4) следует найти значение наиболее трудно определяемого коэффициента теплоотдачи α.

На рисунке приведены кривые изменения во времени первого слагаемого соотношения (13) ($\delta_1(\tau)$ – кривая 1) и суммы всех остальных слагаемых ($\delta_2(\tau)$ – кривая 2) для относительной ошибки расчета $\delta\bar{t}(\tau)/[t^0-t_{\Pi}(0)]$ при $\theta=\dfrac{a\alpha}{\lambda L}=3{,}00\ \text{ч}^{-1}$. Здесь рассматривался нагрев углеродистой заготовки с толщиной $L=0{,}1\ \text{м}$ при числе Био $\mathrm{Bi}=1{,}5$. Заметим, что в данном случае наиболее рациональное значение параметра $\theta=\mu_1^2\dfrac{a}{L^2}=1{,}95308\ \text{ч}^{-1}$, при этом вся относительная ошибка будет удовлетворять следующему неравенству: $\delta\bar{t}(\tau)/[t^0-t_{\Pi}(0)]<0{,}02$. При разности начальной температуры металла и температуры печи на данном участке расчета в $1000\ ^\circ\mathrm{C}$ абсолютная величина ошибки расчета в этом случае не будет превосходить $20\ ^\circ\mathrm{C}$, что часто вполне приемлемо для практики [18–20].



Изменение во времени первого слагаемого и суммы всех остальных слагаемых для относительной ошибки расчета

Как видно из рисунка, первое слагаемое действительно является основным по величине в сумме (13).

Далее отметим, что линейное изменение температуры рабочего пространства приводит к возникновению дополнительной по сравнению с 1-м режимом ошибки расчета, причем с увеличением времени она стремится к некоторому установившемуся значению, определяемому характеристиками системы. Если же температура рабочего пространства изменяется по экспоненте, то дополнительная ошибка расчета растет с течением времени уже неограниченно [14]. Таким образом, применение экспоненциальных моделей для случаев линейного и экспоненциального изменения температуры рабочего пространства вряд ли допустимо.

Выводы

Показано, что экспоненциальная модель нагрева слябов в методических печах обуславливается (с некоторой погрешностью) самой физикой процесса нагрева, описываемой дифференциальным уравнением теплопроводности. Указывается достаточно простая схема перехода от параметров модели, ядром которой является дифференциальное уравнение теплопроводности, к параметрам упрощенной модели для среднемассовой температуры. Результаты работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании алгоритмического обеспечения АСУ ТП методических печей.

Литература

1. Торопов, Е.В. Некоторые проблемы построения АСУ ТП нагревательных печей / Е.В. Торопов, В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 93–96.

2. Панферов, В.И. Алгоритмическое обеспечение АСУ ТП методических печей / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 59–62.

3. Панферов, В.И. Некоторые проблемы автоматизации колпаковых печей / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 4. – С. 42–45.

4. Панферов, В.И. Инструментально-расчетный контроль температуры металла в АСУ ТП методических печей / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 8. – С. 63–66.

5. Панферов, В.И. Методы контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 10. – С. 57–61.

6. Парсункин, Б.Н. Контроль прогрева металла / Б.Н. Парсункин, В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 10. – С. 127–129.

7. Исследование температурного режима нагревательных печей прокатных станов при изменении сортамента нагреваемого металла / С.И. Гинкул, А.Н. Лебедев, Ю.В. Подобед, Ю.М. Сапронова // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 12 (177). – С. 201–206.

8. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко – Киев: Наукова думка, 2008. – 243 с.

9 . Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович и др. – М.: Металлургия, 1981. – 196 с.

10. Вольфман, И.Б. Статистические модели нагрева металла и проверка их адекватности / И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович, М.Д. Климовицкий // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1978. – № 9. – С. 157–159.

11. Анисимов, Е.Ф. Численное исследование алгоритмов идентификации модели нагрева / Е.Ф. Анисимов, Н.В. Борковская, И.Б. Вольфман // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 9. – С. 113–117.

12. Панферов, В.И. Выбор уставок регуляторов температуры нижних зон методических печей / В.И. Панферов, Е.В. Торопов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 6. – С. 78–80.

13. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н.Ю. Тайц – М.: Металлургиздат,1950. – 450 с.

14. Панферов, В.И. К теории моделирования нагрева металла в печах / В.И. Панферов, Е.В. Торопов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1992. – № 3. – С. 79–82.

15. Кондратьев, Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев – М.: Гостехтеориздат,1954. – 408 с.

16. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М.: Высш. шк., 2001. – 550 с.

17. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.

18. Прядкин, Л.Л. Автоматизация проходных нагревательных печей прокатного производства / Л.Л. Прядкин // Сталь. – 1986. – № 2. – С. 103–106.

19. Kehlbery, E. Optimization of reheat furnace operation / E. Kehlbery // ABB Rev. – 1992. – No. 3. – P. 13–18.

20. Li, G.J. The simplified method to calculate two-dimensional heat conduction equations of heating slab / G.J. Li, X.T. Li, H.G. Chen // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – Vol. 79. – P. 105–110.

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет; профессор кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; panferovsv@susu.ru.

Поступила в редакцию 24 января 2020 г.

DOI: 10.14529/met200408

ABOUT AN EXPONENTIAL MODEL OF HEATING SLABS IN METHODICAL FURNACES

V.I. Panferov[1, 2], *tgsiv@mail.ru*,
S.V. Panferov[1], *panferovsv@susu.ru*
[1] *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*
[2] *Russian Air Force Military Educational and Scientific Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin", Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation*

Introduction. In conditions of increasing requirements for the quality of metal heating before rolling, the task of creating and improving the algorithmic support of automated process control systems (ACS TP) of methodical furnaces is quite relevant. **Aim.** Consider the problem of physical conditioning and parametric tuning of the so-called exponential model, which is often used to describe the heating of slabs in rolling mill furnaces: the question arises of how much the exponential model corresponds to the physics of the heating process, and what accuracy of the description can be achieved. **Materials and methods.** A comparison is made of both the structures of the models – the physical model based on the heat equation and the exponential model, and the results of calculating the mass average temperature of the metal using these models. **Results.** It is shown that the exponential model exactly corresponds to the physics of the heating process only for thermally thin bodies. A differential equation is obtained for the error in calculating the mass-average temperature of thermally massive bodies. In this case, three heating modes are analyzed: at a constant temperature of the working space and with a linear and exponential increase in this temperature. The solution of the equation for the calculation error during heating at a constant temperature of the working space is given. It is established that the exponential model satisfactorily describes the process, as a rule, only for the heating mode at a constant temperature of the working space.

The rational value of the tunable parameter of the exponential model is found. A rather simple scheme of the transition from the parameters of the model, the core of which is the differential heat equation, to the parameters of the simplified exponential model for the mass-average temperature, is indicated. **Conclusion.** The results of the work can be used in the development and improvement of the algorithmic support of automated process control systems of methodological furnaces.

Keywords: metal heating, methodical furnace, automated control system, exponential model, error in calculating the mass-average temperature, parametric adjustment of the model.

References

1. Toropov E.V., Panferov V.I. [Some problems of creating automated process control systems for heating furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1991, no. 2, pp. 93–96. (in Russ.)

2. Panferov V.I. [Algorithmic support of automatic control systems for technological process of continuous furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 2001, no. 2, pp. 59–62. (in Russ.)

3. Panferov V.I. [Some problems of automation of hoods]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 2002, no. 4, pp. 42–45. (in Russ.)

4. Panferov V.I. [Instrumental and calculation control of metal temperature in the process control system of continuous furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1996, no. 8, pp. 63–66. (in Russ.)

5. Panferov V.I. [Metal temperature control techniques in automation of continuous furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 2002, no. 10, pp. 57–61. (in Russ.)

6. Parsunkin B.N., Panferov V.I. [Control of metal heating]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1981, no. 10, pp. 127–129. (in Russ.)

7. Ginkul S.I., Lebedev A.N., Podobed Ju.V., Sapronova Ju.M. [Investigation of the temperature regime of heating furnaces of rolling mills with a change in the range of the heated metal]. *Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tehnicheskogo universiteta. Serija "Metallurgija".* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series "Metallurgy"], 2010, vol. 12 (177), pp. 201–206. (in Russ.)

8. Tkachenko V.N. *Matematicheskoye modelirovaniye, identifikatsiya i upravleniye tekhnologicheskimi protsessami teplovoy obrabotki materialov* [Mathematical modeling, identification and control of technological processes of heat treatment of materials]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008. 243 p.

9. Buglak L.I., Wolfman I.B., Efroimovich S.Yu., Zakharov G.K., Klimovitsky M.D, Segal A.M. *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechey* [Automation of methodical furnaces]. Moscow, Metallurgy Publ., 1981. 196 p.

10. Wolfman I.B., Efroimovich S.Yu., Klimovitsky M.D. [Statistical models of metal heating and checking their adequacy]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1978, no. 9, pp. 157–159. (in Russ.)

11. Anisimov E.F., Borkovskaya N.V., Wolfman I.B. [Numerical study of the heating model identification algorithms]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1987, no. 9, pp. 113–117. (in Russ.)

12. Panferov V.I., Toropov E.V. [The choice of the settings of the temperature regulators of the lower zones of the methodological furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1991, no. 6, pp. 78–80. (in Russ.)

13. Thayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow, Metallurgizdat, 1950. 450 p.

14. Panferov V.I., Toropov E.V. [To the theory of modeling of metal heating in furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The news of high schools. Ferrous metallurgy], 1992, no. 3, pp. 79–82. (in Russ.)

15. Kondratiev G.M. *Regulyarnyy teplovoy rezhim* [Regular thermal regime]. Moscow, Gostekhteorizdat, 1954. 408 p.

16. Kartashov Je.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in the theory of the thermal conductivity of solids]. Moscow, High School Publ., 2001. 550 p.

17. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, High School Publ., 1967. 599 p.

18. Pryadkin L.L. [Automation of continuous heating furnaces of rolling production]. *Stal'* [Steel], 1986, no. 2, pp. 103–106. (in Russ.)

19. Kehlbery E. Optimization of reheat furnace operation. *ABB Rev.*, 1992, no. 3, pp. 13–18.

20. Li G.J., Li X.T., Chen H.G. The simplified method to calculate two-dimensional heat conduction equations of heating slab. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, vol. 79, pp. 105–110.

Received 24 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панферов, В.И. Об экспоненциальной модели нагрева слябов в методических печах / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 67–75. DOI: 10.14529/met200408

FOR CITATION

Panferov V.I., Panferov S.V. About an Exponential Model of Heating Slabs in Methodical Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 67–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200408