УДК 536.68 DOI: 10.14529/ctcr180116

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ МАССИВНОГО ТЕЛА ПО ИЗМЕРЯЕМЫМ ВЕЛИЧИНАМ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

В.И. Панферов, Н.А. Тренин, С.В. Панферов

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

Рассматривается решение задачи оценки температурного поля заготовки по измеряемым (наблюдаемым) величинам процесса нагрева – температурам поверхностей и температурам сред, омывающих эти поверхности. Необходимым условием разрешимости этой задачи является наличие настроенной на «реальный процесс» модели нестационарного теплообмена. Приводятся конкретные алгоритмы решения задачи, также определено влияние погрешностей измерения температуры на точность оценки. Таким образом, показано, что температурное поле заготовки может быть достаточно точно определено по результатам текущих измерений совершенно независимо от предыстории процесса нагрева. Следовательно, непрерывный контроль температуры по ходу процесса нагрева с самого его начала не является в принципе абсолютно необходимым для того, чтобы иметь возможность определять температурное поле сляба в какие-то ответственные моменты времени. Результаты работы могут быть использованы при построении автоматизированных систем управления методическими нагревательными печами прокатного производства.

Ключевые слова: температурное поле заготовки, алгоритм оценки, измеряемые величины, наблюдаемость процесса, автоматизированные системы управления, нагревательные печи.

Постановка задачи

Известно, что удовлетворение современных требований к системам автоматизации нагревательных печей возможно только в рамках АСУ ТП с обратной связью по температуре нагреваемого металла [1–3]. Причем при нагреве массивных заготовок в печах для непосредственного измерения доступна лишь температура их поверхности. Температура внутренних точек также как и среднемассовая (среднеобъемная) температура не могут быть принципиально измерены инструментальными средствами, определяются они расчетным путем либо непосредственно по математической модели, настроенной на реальный процесс, либо по разработанным на ее основе алгоритмам контроля [4–5]. В связи с этим при построении АСУ ТП нагревательных печей возникает задача разработки приемлемых алгоритмов оценки температурного поля металла по доступным для измерения величинам процесса. Принципиальная возможность такой оценки определена в работе [6], в которой показано, что температурное поле заготовки в некоторый момент времени может быть однозначно определено по результатам измерения температуры печи и температуры поверхности металла на конечном отрезке времени. Левой границей отрезка должен быть момент времени, для которого определяется температурное поле заготовки.

В работе [7] предложен и опробован алгоритм оценки для случая, когда температурное поле металла определяется в классе многочленов второго порядка. В данной работе проведены исследования по оценке температуры металла многочленом нулевого порядка, иначе говоря, некоторым числом, характеризующим все температурное поле. Данные исследования дополняют результаты работы [7], но алгоритм выгодно отличается от алгоритма [7] с точки зрения количества необходимых вычислений. Последнее может быть важным при построении АСУ ТП, работающей в реальном масштабе времени. Погрешность оценки температурного поля будет при этом достаточно приемлемой величиной хотя бы для задачи определения неизвестной (из-за неконтролируемости процесса охлаждения перед посадом в печи) начальной температуры слябов горячего посада, так как по нашим расчетам [4–5] погрешность определения начальной среднемассовой температуры металла в 30 и более градусов практически уже через 10 минут не сказывается на точности расчета температурного поля. Длительность же нагрева слябов в неотапливаемых методических зонах в любом случае больше этого времени, следовательно, к моменту начала управляемого процесса нагрева погрешность расчета температуры металла, обусловленная неточностью оценки начальной температуры, будет незначительной.

Отметим также, что алгоритмы оценки температуры металла по наблюдаемым величинам процесса нагрева разработаны для условий описания процесса теплообмена в конвективной форме и постоянства теплофизических свойств металла. Однако это не является препятствием для их применения в случае лучистого или лучисто-конвективного теплообмена и зависимости теплофизических свойств металла от температуры. Дело в том, что для оценки температурного поля достаточно иметь небольшую (порядка десяти минут) длительность отрезка наблюдения, а при малой длительности, вследствие небольшого диапазона изменения температур, можно описать процесс линеаризованным уравнением теплопроводности и всегда можно найти удовлетворительные значения параметров модели внешнего теплообмена, записанной в конвективной форме, каким бы ни был реальный теплообмен, лучистым или лучисто-конвективным.

Решение задачи

Следуя, например [8, 9], опишем процесс нагрева металла в печи полностью линеаризованным уравнением теплопроводности

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

с начальным

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

и граничными условиями:

$$-\lambda\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x}=\alpha_1[t_{\Pi 1}(\tau)-t(0,\tau)],\ \ \tau\ge 0; \qquad (3)$$

$$\lambda\frac{\partial t(L,\tau)}{\partial x}=\alpha_2[t_{\Pi 2}(\tau)-t(L,\tau)],\ \ \tau\ge 0, \qquad (4)$$

где $t(x,\tau)$ – температура в точке с пространственной координатой x в момент времени τ, a и λ – соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, L – расчетное сечение заготовки, $t^0(x)$ – некоторая функция, описывающая начальное температурное поле заготовки, α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи с разных сторон обогрева металла, имеющих температуры сред $t_{\Pi 1}(\tau)$ и $t_{\Pi 2}(\tau)$ соответственно.

Известно, например [10], что решение задачи (1)–(4) представляется в виде

$$t(x,\tau)=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\psi_k(x)}{\|\psi_k\|^2}\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})\int_0^L t^0(x)\psi_k(x)\,dx+a\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\psi_k(x)}{\|\psi_k\|^2}\times$$

$$\times\int_0^{\tau}\exp[-\mu_k^2\frac{a}{L^2}(\tau-\xi)]\times[\mu_k h_1 t_{\Pi 1}(\xi)+(\mu_k\cos\mu_k+h_1 L\sin\mu_k)h_2 t_{\Pi 2}(\xi)]d\xi, \qquad (5)$$

где

$$\psi_k(x)=\mu_k\cos\mu_k\frac{x}{L}+h_1 L\sin\mu_k\frac{x}{L},\ \ k=1,2,\ldots; \qquad (6)$$

$$\|\psi_k\|^2=\frac{L}{2}\frac{(\mu_k^2+h_1^2L^2)[h_2L+(\mu_k^2+h_2^2L^2)]+h_1L(\mu_k^2+h_2^2L^2)}{\mu_k^2+h_2^2L^2},\ \ k=1,2,\ldots; \qquad (7)$$

$$h_i=\alpha_i/\lambda,\ \ i=1,2; \qquad (8)$$

μ_k, $k=1,2,\ldots$ – корни уравнения

$$\mathrm{ctg}\,\mu=\frac{\mu}{(h_1+h_2)L}-\frac{h_1h_2L}{\mu(h_1+h_2)}. \qquad (9)$$

Подставив в (5) значение $x=L$, получим соотношение, связывающее наблюдаемую (измеряемую) температуру верхней поверхности сляба $t(L,\tau)$, температуры в зонах разностороннего обогрева металла $t_{\Pi 1}(\tau)$, $t_{\Pi 2}(\tau)$ и искомую функцию $t^0(x)$. Задача определения $t^0(x)$ из этого соотношения является некорректно поставленной и может быть решена при использовании дополнительной информации об искомом решении.

Если предположить, что искомая функция $t^0(x)$ удовлетворительно аппроксимируется выражением известной структуры, то задача об определении $t^0(x)$ будет заключаться в нахождении неизвестных числовых значений параметров (коэффициентов) выражения, аппроксимирующего $t^0(x)$.

В [7] решение задачи искали в классе многочленов второго порядка $t^0(x)=\gamma+bx+cx^2$, где γ, b, c – некоторые подлежащие определению коэффициенты. В данной работе исследуются свойства алгоритма решения задачи при аппроксимации $t^0(x)$ многочленом нулевого порядка, т. е. при $t^0(x)=\overline{t}^0=\text{const}$.

Например, для случая, когда $\alpha_1=\alpha_2$, $t_{\Pi 1}(\tau)=t_{\Pi 2}(\tau)=t_{\Pi}(\tau)$ алгоритм оценки температуры $\overline{t}^0=\text{const}$ по измеряемым величинам процесса нагрева – $t_{\Pi}(\tau)$ и $t(L,\tau)$ – представляется следующим соотношением

$$\overline{t}^0=t_{\Pi}(0)+\{[t(L,\tau)-t_{\Pi}(\tau)]+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k\cos\mu_k}{\mu_k+\sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})\times$$
$$\times\int_0^{\tau}\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})\cdot\frac{dt_{\Pi}(\tau)}{d\tau}d\tau\}/[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k\cos\mu_k}{\mu_k+\sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})]. \quad (10)$$

Из (10) следует, что среднемассовую температуру сляба в момент времени $\tau=0$ можно определить по температуре поверхности сляба в некоторый последующий момент времени $\tau>0$, по температуре печи в моменты времени $\tau=0$ и $\tau>0$, а также и по тому, как изменялась температура поверхности металла на всем отрезке времени $[0,\tau]$. Если же температура печи на этом отрезке времени не изменялась, то алгоритм, как это нетрудно видеть, будет таким:

$$\overline{t}^0=t_{\Pi}(0)+[t(L,\tau)-t_{\Pi}(\tau)]/[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k\cos\mu_k}{\mu_k+\sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})]. \quad (11)$$

Для повышения помехоустойчивости процедуры разумнее $\overline{t}^0$ определять интегральным или точечным методом наименьших квадратов, поэтому запишем уравнение (11) для некоторых моментов времени τ_i, $i=\overline{1,m}$, тогда будем иметь следующую переопределенную относительно $\overline{t}^0$ систему уравнений:

$$\overline{t}^0=t_{\Pi}(0)+[t(L,\tau_i)-t_{\Pi}(\tau_i)]/[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k\cos\mu_k}{\mu_k+\sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau_i}{L^2})],\ i=\overline{1,m}. \quad (12)$$

Решим ее методом наименьших квадратов, в этом случае задача оптимизации запишется так:

$$I=\sum_{i=1}^{m}\{\overline{t}^0-t_{\Pi}(0)-[t(L,\tau_i)-t_{\Pi}(\tau_i)]/[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k\cos\mu_k}{\mu_k+\sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau_i}{L^2})]\}^2\to\min_{\overline{t}_0}. \quad (13)$$

Очевидно, что оптимальная оценка температуры $\overline{t}^0$ должна вычисляться по следующей формуле

$$\overline{t}^0=t_{\Pi}(0)+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\{[t(L,\tau_i)-t_{\Pi}(\tau_i)]/[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k\cos\mu_k}{\mu_k+\sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau_i}{L^2})]\}. \quad (14)$$

Апробация алгоритма

Предложенные алгоритмы оценки опробовали с помощью моделирования. Численные значения наблюдаемых (измеряемых) величин брали, как правило, из решения так называемой прямой задачи: задавались определенным начальным температурным полем $t^0(x)$ и графиками изменения температур $t_{\Pi 1}(\tau)$ и $t_{\Pi 2}(\tau)$ на отрезке наблюдения, далее по модели процесса находили наблюдаемую (измеряемую) температуру верхней поверхности сляба $t(L,\tau)$ для этого отрезка времени. Полученные таким образом данные использовали для оценки $\overline{t}^0$ по алгоритмам (10), (11) и (14). Далее сравнивали полученную оценку начальной среднемассовой температуры $\overline{t}^0$ с ее действительным значением $\frac{1}{L}\int_0^L t^0(x)\,dx$. Причем при решении прямой задачи использовали как уравнение (5), так и неявную конечно-разностную схему процесса, которую решали методом прогонки.

Исследование показало, что точность оценки $\overline{t}^0$ существенно зависит от точности информации о температуре поверхности заготовки на отрезке наблюдения. Так, для случая, когда $t(L,\tau)$ для отрезка наблюдения определялась по уравнению (5) для равномерного начального температурного поля $t^0(x)=\overline{t}^0=\text{const}$, погрешность оценки была практически нулевой. В других случаях погрешность оценки определялась возможной точностью аппроксимации действительного начального температурного поля многочленом нулевого порядка.

При определении $t(L,\tau)$ для отрезка наблюдения по конечно-разностной схеме процесса получали при прочих равных условиях большую погрешность оценки $\overline{t}^0$, чем при вычислениях по уравнению (5). Очевидно, это объясняется погрешностью определения $t(L,\tau)$, возникающей из-за различия моделей, используемой в прямой задаче и задействованной в алгоритме оценки.

Влияние погрешностей измерения температуры поверхности на точность оценки $\overline{t}^0$ с помощью алгоритма (14) приведено в таблице.

Влияние погрешностей измерения температуры поверхности на точность оценки среднемассовой температуры

№ п/п	Погрешность измерения температуры поверхности, °C	Модуль погрешности оценки $\overline{t}^0$, °C	Модуль погрешности оценки $\overline{t}^0$ по алгоритму работы [7], °C
1	0	0	0
2	± 5	9	10
3	± 10	17	19
4	± 15	26	28
5	± 20	34	37
6	± 25	43	47

В таблице данные приведены для случая нагрева слябов из углеродистой стали с $L=0{,}1$ м и числом Био, равным 1,5. При этом на истинное значение температуры поверхности металла на всем отрезке наблюдения накладывалась постоянная систематическая погрешность положительного или отрицательного знака. Эти же исходные данные использовались и для оценки начального температурного поля слябов по алгоритму работы [7], в котором, к месту заметим, полагалось, что это температурное поле описывается многочленом второго порядка $t^0(x)=\gamma+bx+cx^2$. Затем по найденному температурному полю вычислялась среднемассовая температура и определялась погрешность ее оценки, которая приведена в четвертом столбце таблицы.

Как видно из таблицы, погрешность оценки среднемассовой температуры сляба по алгоритму работы [7] даже больше, чем по формуле (14). Вероятнее всего, это обусловлено большей сложностью алгоритма [7] и, в связи с этим, и большей его погрешностью. По этой причине алгоритм (14) предпочтительнее алгоритма работы [7].

Кроме того, точность оценки $\overline{t}^0$ определялась и в случае действия случайных помех, генерируемых с помощью датчика случайных чисел. В вычислительном эксперименте случайные помехи изменялись в следующих диапазонах температур: $[-5;+5]$, $[-10;+10]$, $[-15;+15]$, $[-20;+20]$, $[-25;+25]$, °C. При этом были получены соответственно следующие максимальные значения модулей погрешности оценки $\overline{t}^0$: $2, 4, 6, 8, 10\ °\mathrm{C}$. Таким образом, погрешность оценки заметно меньше, чем для предыдущего случая. Полученный результат согласуется с известными физическими рассуждениями, ведь случай с постоянной систематической погрешностью считается наиболее тяжелым.

В работе оценили погрешность расчета температурного поля заготовки, обусловленную тем, что его реальное начальное температурное поле $t^0(x)$ заменяется равномерным начальным температурным полем $t^0(x) = \overline{t}^0 = \mathrm{const}$. Эта погрешность для любой координаты x в любой момент времени τ описывается формулой

$$\Delta t(x,\tau) = \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\mu_k}{\mu_k + \sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\cos(\mu_k\frac{x}{L})\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})\times$$

$$\times\{\int_0^L[t^0(x) - t_\Pi(0)]\cdot\cos(\mu_k\frac{x}{L})\,dx - [t^0 - t_\Pi(0)]\frac{L}{\mu_k}\sin\mu_k\}, \qquad (15)$$

усредненная же по толщине погрешность описывается формулой

$$\overline{\Delta t(\tau)} = \frac{1}{L}\int_0^L\Delta t(x,\tau)\,dx = \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_k}{\mu_k + \sin\mu_k\cos\mu_k}\cdot\exp(-\mu_k^2\frac{a\tau}{L^2})\times$$

$$\times\{\int_0^L[t^0(x) - t_\Pi(0)]\times\cos(\mu_k\frac{x}{L})\,dx - [t^0 - t_\Pi(0)]\frac{L}{\mu_k}\sin\mu_k\}. \qquad (16)$$

Из формул (15) и (16) видно, что погрешность вычисления температурного поля заготовки, обусловленная неточностью определения его начальной температуры, убывает с течением времени. Причем, как это хорошо известно, медленнее всего убывает первый член ряда в (15) и (16), нетрудно видеть, что его постоянная времени равна $L^2/(\mu_1^2\cdot a)$. Если считать, что процесс удовлетворительно завершается за три постоянные времени, то можно утверждать, что погрешность определения начального температурного поля после истечения времени $3\cdot L^2/(\mu_1^2\cdot a)$ практически не сказывается на точности расчета температурного поля. Отсюда также можно сделать вывод, что нет никакого смысла в большей длительности отрезка наблюдения при реализации алгоритма оценки.

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. Панферов, В.И. О наблюдаемости процесса нагрева массивных тел в нагревательных печах / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 1. – С. 155–156.

7. Панферов, В.И. Оценка температурных полей массивных тел по наблюдаемым величинам процесса нагрева / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 7. – С. 112–115.

8. 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.

9. 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.

10. *Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.*

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, 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.

Тренин Николай Александрович, канд. воен. наук, начальник кафедры, 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.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, 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.

Поступила в редакцию 30 апреля 2017 г.

DOI: 10.14529/ctcr180116

EVALUATION OF THE TEMPERATURE OF A MASSIVE BODY ON MEASURABLE VALUES OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS

***V.I. Panferov**, tgsiv@mail.ru,*
***N.A. Trenin**,*
S.V. Panferov
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

The solution of the problem of estimating the temperature field of the billet from the measured (observed) values of the heating process to the surface temperatures and the temperatures of the media washing these surfaces is considered. A necessary condition for the solvability of this problem is the presence of a non-stationary heat exchange model tuned to the "real process". Specific algorithms for solving the problem are given, and the influence of temperature measurement errors on the accuracy of the estimate is determined. Thus, it is shown that the temperature field of the billet can be determined quite accurately from the results of the current measurements completely independently of the prehistory of the heating process. Consequently, continuous monitoring of the temperature during the heating process from its very beginning is not in principle absolutely necessary in order to be able to determine the temperature field of the slab at some crucial time. The results of the work can be used in the construction of automated control systems for methodical heating furnaces of rolling production.

Keywords: billet temperature field, evaluation algorithm, measured values, process observability, automated control systems, heating furnaces.

References

1. Toropov E.V., Panferov V.I. [Some Problems of Creating Automated Process Control Systems for Heating Furnaces]. *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]. *News of High Schools. Ferrous Metallurgy*, 2001, no. 2, pp. 59–62. (in Russ.)

3. Panferov V.I. [Some Problems of Automation of Hoods]. *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]. *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]. *News of High Schools. Ferrous Metallurgy]*, 2002, no. 10, pp. 57–61. (in Russ.)

6. Panferov V.I. [On the Observability of the Heating of Massive Bodies in Heating Furnaces]. *News of High Schools. Ferrous Metallurgy]*, 1985, no. 1, pp. 155–156. (in Russ.)

7. Panferov V.I. [Estimation of the Temperature Fields of Massive Bodies from the Observed Values of the Heating Process]. *News of High Schools. Ferrous Metallurgy]*, 1988, no. 7, pp. 112–115. (in Russ.)

8. 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]. *Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series "Metallurgy"*, 2010, vol. 12 (177), pp. 201–206. (in Russ.)

9. Panferov V.I., Toropov E.V. [To the Theory of Modeling of Metal Heating in Furnaces]. *News of High Schools. Ferrous Metallurgy*, 1992, no. 3, pp. 79–82. (in Russ.)

10. Kartashov Je.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical Methods in the Theory of the Thermal Conductivity of Solids]. Moscow, High School, 1985. 480 p.

Received 30 April 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панферов, В.И. Оценка температуры массивного тела по измеряемым величинам процесса теплообмена / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 133–139. DOI: 10.14529/ctcr180116

FOR CITATION

Panferov V.I., Trenin N.A., Panferov S.V. Evaluation of the Temperature of a Massive Body on Measurable Values of the Heat Exchange Process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 133–139. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180116