

ОБ ОЦЕНКЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СЛЯБОВ ПРИ НАГРЕВЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

В.И. Панферов[✉], С.В. Панферов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

[✉] tgshiv@mail.ru

Аннотация. Рассматривается задача оценки наблюдаемости температурного поля слябов при их нагреве в методических печах. Ее актуальность обуславливается тем, что для непосредственного измерения доступна только температура поверхности металла, для построения высококачественных систем управления необходима, однако, информация и о температуре внутренних точек. Известно, что для решения, в том числе и данной задачи, необходима настроенная на «реальный процесс» модель нестационарного теплообмена, которая по физике явлений является вообще-то моделью с распределенными параметрами. Для оценки наблюдаемости проведена пространственная дискретизация уравнения теплопроводности, описывающего внутренний теплообмен металла. За счет этого математическое описание переведено в класс систем с сосредоточенными параметрами. Установлено, что во всех рассмотренных случаях – когда поперечное сечение заготовки условно разбито на несколько расчетных слоев – объект вполне наблюдаем, т. е. температурное поле заготовки в некоторый момент времени может быть однозначно определено по данным измерения температуры поверхности и температуры рабочего пространства на некотором последующем отрезке времени. Приводятся конкретные алгоритмы решения задачи, также определено влияние погрешностей измерения температуры поверхности на точность оценки. Таким образом, показано, что 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, измеряемые величины, наблюдаемость процесса, алгоритм оценки, автоматизированные системы управления, нагревательные печи

Для цитирования: Панферов В.И., Панферов С.В. Об оценке наблюдаемости температурного поля слябов при нагреве в методических печах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 1. С. 55–62. DOI: 10.14529/met230107

Original article
DOI: 10.14529/met230107

ON THE EVALUATION OF THE OBSERVABILITY OF THE TEMPERATURE FIELD OF SLABS DURING HEATING IN METHODOLOGICAL FURNACES

V.I. Panferov[✉], S.V. Panferov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] tgshiv@mail.ru

Abstract. The problem of estimating the observability of the temperature field of slabs during their heating in continuous furnaces is considered. Its relevance is due to the fact that only the temperature of the metal surface is available for direct measurement; however, to build high-quality control systems, information about the temperature of internal points is also necessary. It is known that for the solution, including this problem, a model of non-stationary heat transfer tuned to the “real process” is needed, which, according to the physics of phenomena, is, in fact, a model with distributed parameters. To estimate the observability, the spatial discretization of the heat conduction equation describing the internal heat transfer of the metal was carried out. Due to this, the mathematical description is transferred to the class

of systems with lumped parameters. The temperature field of the workpiece at some point in time can be unambiguously determined from the measurement data of the surface temperature and the temperature of the working space at some subsequent time interval. Specific algorithms for solving the problem are given, and the influence of surface temperature measurement errors on the accuracy of the estimate is also determined. Thus, it has been shown that continuous temperature control during the heating process from the very beginning is not absolutely necessary in principle in order to be able to determine the temperature field of the slab at some critical time points. The results of the work can be used in the construction of automated control systems for methodical heating furnaces of rolling production.

Keywords: workpiece temperature field, measured values, process observability, estimation algorithm, automated control systems, heating furnaces

For citation: Panferov V.I., Panferov S.V. On the evaluation of the observability of the temperature field of slabs during heating in methodological furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2023;23(1):55–62. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230107

Постановка задачи

При нагреве металла в промышленных печах для непосредственного измерения доступна только температура его поверхности, причем определена она может быть, к сожалению, с достаточно ограниченной точностью. Температуры внутренних точек так же, как и среднемассовая температура, принципиально не могут быть измерены инструментальными средствами, определяются они расчетным путем, либо прямо по математической модели, настроенной на реальный процесс, либо по разработанным на её основе алгоритмам контроля. В связи с этим при построении автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) нагревательных печей возникает задача разработки приемлемых алгоритмов оценки температурного поля заготовок по доступным для измерения величинам процесса. Решение этой задачи необходимо, во-первых, для создания замкнутых систем управления с обратной связью по температуре нагреваемого металла, во-вторых, для оценки начального температурного поля заготовок, сажаемых в печь, так как вследствие неконтролируемости условий нагрева и охлаждения металла перед посадом в печи оно, как правило, неизвестно. Разработка и внедрение подсистемы оценки начального температурного поля заготовок позволит получить максимум эффекта от оптимального управления особенно первыми по ходу металла зонами нагрева, так как величина эффекта напрямую связана с точностью оценки начальной температуры металла.

Важность оценки начального температурного поля заготовок подчеркивается и в зарубежных публикациях [1, 2].

В-третьих, важным достоинством положительного решения такой задачи будет

вполне обоснованный вывод о том, что температурное поле заготовок принципиально может быть оценено по результатам только текущих измерений и совершенно независимо от предыстории нагрева. Следовательно, непрерывный контроль температуры металла по ходу нагрева не является, в принципе, абсолютно необходимым для того, чтобы иметь возможность определять температурное поле заготовки в какие-то ответственные моменты времени.

Выясним принципиальную возможность такой оценки, т. е. рассмотрим задачу оценки наблюдаемости процесса нагрева в смысле, определяемом в работах [3–7].

Математическое описание процесса

Следуя, например, работам [8–11], опишем процесс нагрева металла в печи полностью линеаризованным уравнением теплопроводности

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

с начальным

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

и граничными условиями:

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

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

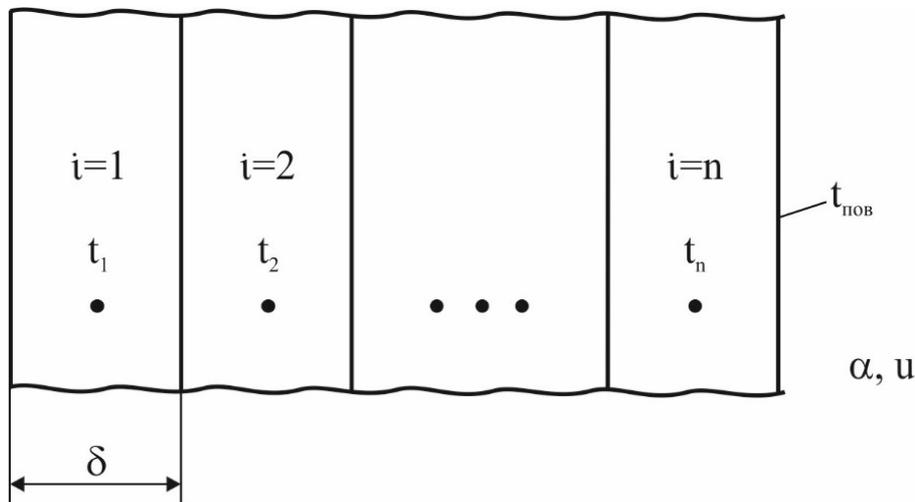
где $t(x, \tau)$ – температура в точке с пространственной координатой x в момент времени τ ; a и λ – соответственно коэффициенты теплопроводности и теплопроводности; L – расчетное сечение заготовки (обычно половина ее толщины); $t^0(x)$ – некоторая функция, описывающая начальное температурное

поле заготовки; α – коэффициент теплоотдачи для обогреваемой поверхности металла; $t_{\text{П}}(\tau) = u(\tau)$ – температура рабочего пространства печи, являющаяся управляющим воздействием $u(\tau)$.

Используя известный метод прямых [12, 13], преобразуем уравнение теплопроводности (1) в систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dt_1}{d\tau} &= \frac{a}{\delta^2}(t_2 - t_1); \\ \frac{dt_2}{d\tau} &= \frac{a}{\delta^2}(t_1 - 2t_2 + t_3); \\ &\dots\dots\dots; \\ \frac{dt_{n-1}}{d\tau} &= \frac{a}{\delta^2}(t_{n-2} - 2t_{n-1} + t_n); \\ \frac{dt_n}{d\tau} &= \frac{a}{\delta^2}\left(\frac{8}{3}t_{\text{ПОВ}} + \frac{4}{3}t_{n-1} - 4t_n\right). \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Здесь $t_i(\tau)$ – температура в центре i -го слоя заготовки; $t_{\text{ПОВ}} = t(L, \tau)$ – температура ее поверхности; δ – толщина расчетного слоя, $i = 1$ для центрального слоя заготовки: центр сляба находится в середине центрального слоя; n – номер слоя, выходящего на поверхность заготовки, т. е. правая граница слоя является поверхностью заготовки, при этом вполне понятно, что число слоев, на которое условно разбито расчетное сечение заготовки, должно быть нечетным: в этом случае центр заготовки будет располагаться в центре центрального слоя. Расчетная схема заготовки приведена на рисунке.



Расчетная схема сляба
Calculation scheme of a slab

Для приведения математического описания к стандартному для теории наблюдаемости виду исключим из системы (1) температуру поверхности заготовки $t_{\text{ПОВ}}$ (считается, что переменными состояниями объекта управления являются только температуры центров расчетных слоев), для этого проведем пространственную дискретизацию граничного условия нагрева (4):

$$\lambda \frac{t_{\text{ПОВ}} - t_n}{\delta/2} = \alpha(u - t_{\text{ПОВ}}) \Rightarrow t_{\text{ПОВ}} = \frac{\alpha}{2\lambda/\delta + \alpha} u + \frac{2\lambda}{2\lambda + \alpha\delta} t_n. \quad (6)$$

С учетом этого система (5) переписывается в виде

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{d\tau} = \frac{a}{\delta^2}(t_2 - t_1); \\ \frac{dt_2}{d\tau} = \frac{a}{\delta^2}(t_1 - 2t_2 + t_3); \\ \dots; \\ \frac{dt_{n-1}}{d\tau} = \frac{a}{\delta^2}(t_{n-2} - 2t_{n-1} + t_n); \\ \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{a}{\delta^2} \left[\frac{8}{3} \cdot \frac{\alpha\delta}{2\lambda + \alpha\delta} u + \frac{4}{3} t_{n-1} + 4 \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{2\lambda}{2\lambda + \alpha\delta} - 1 \right) t_n \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Дополним систему (7) «уравнением наблюдения» [3], получающимся при уже упомянутой пространственной дискретизации граничного условия нагрева, записанного в форме закона Ньютона:

$$t_{\text{ПОВ}} = \frac{\alpha}{2\lambda/\delta + \alpha} u + \frac{2\lambda}{2\lambda + \alpha\delta} t_n. \quad (8)$$

Вполне понятно, что температура поверхности заготовки $t_{\text{ПОВ}} = t(L, \tau)$ здесь играет роль наблюдаемого выхода объекта управления [3–7].

Матричное описание объекта, как это хорошо известно [3–7], принято представлять следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dt}{d\tau} &= At + Bu; \\ t_{\text{ПОВ}} &= Ct + Du, \end{aligned} \quad (9)$$

где $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T$ – вектор-столбец температур центров расчетных слоев, верхний индекс «Т» означает транспонирование; A и B – матрицы размером $n \times n$; $u = (0 \ 0 \ \dots \ u)^T$ – n -мерный вектор-столбец управлений; C и D – матрицы-строки размером n ; конкретные виды матриц A, B, C и D приведены ниже.

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{a}{\delta^2} & \frac{a}{\delta^2} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{a}{\delta^2} & -2\frac{a}{\delta^2} & \frac{a}{\delta^2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4a}{3\delta^2} & 4\frac{a}{\delta^2} \left(\frac{4\lambda}{3(2\lambda + \alpha\delta)} - 1 \right) \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{8a\alpha}{3\delta(2\lambda + \alpha\delta)} \end{pmatrix};$$

$$C = \left(0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \frac{2\lambda}{2\lambda + \alpha\delta} \right);$$

$$D = \left(0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \frac{\alpha\delta}{2\lambda + \alpha\delta} \right).$$

Оценка наблюдаемости температурного поля

Провели исследование наблюдаемости для различных конкретных значений n , во всех рассмотренных нами случаях получали, что ранг соответствующей матрицы наблюдаемости был равен порядку объекта управления, так, например, для $n=3$ матрица наблюдаемости имеет вид

$$\begin{pmatrix} C^T & A^T C^T & (A^T)^2 C^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{4a^2\beta}{3\delta^4} \\ 0 & \frac{4a\beta}{3\delta^2} & \left(-\frac{8a^2}{3\delta^4} + \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{\delta^2} \gamma\right)\beta \\ \beta & \gamma\beta & \left(\frac{4}{3} \frac{a^2}{\delta^4} + \gamma^2\right)\beta \end{pmatrix}.$$

Здесь $\beta = \frac{2\lambda}{2\lambda + \alpha\delta}$; $\gamma = 4 \frac{a}{\delta^2} \left(\frac{4\lambda}{3(2\lambda + \alpha\delta)} - 1\right)$.

Нетрудно видеть, что определитель данной матрицы равен $\Delta = -\frac{16a^3\beta^3}{9\delta^6} \neq 0$, т. е. всегда

не равен нулю, следовательно, ранг матрицы наблюдаемости $r=n=3$ и система вполне наблюдаема [3–7]. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс нагрева слябов в печах вполне наблюдаем, т. е. температурное поле в заготовке в момент времени $\tau = 0$:

$t(x, 0) = t^0(x)$ может быть однозначно определено по данным измерения температуры ее поверхности и температуры рабочего пространства печи на некотором конечном последующем отрезке времени.

При этом следует иметь в виду, что при оценке температуры металла по наблюдаемым (измеряемым) величинам процесса нагрева неизбежно запаздывание информации о неизвестном температурном поле заготовок, так как это поле определяется для левого конца отрезка наблюдения, поэтому этот метод целесообразнее всего использовать для определения начального температурного поля слябов горячего посада при их нагреве в методических печах. В этом случае не может быть нанесен какой-либо ущерб процессу управления из-за запаздывания, так как первые по ходу металла методические зоны печей не управляемы, заготовки в них нагреваются теплом отходящих продуктов сгорания. В принципе же метод может быть использо-

ван и в других случаях, важным его достоинством является то, что температурное поле заготовок оценивается только по результатам текущих измерений совершенно независимо от предыстории нагрева.

Разработка и исследование конкретных алгоритмов оценки

Задача об определении температурного поля $t^0(x)$ по функции управления $u(\tau)$ и результатам измерения температуры поверхности металла на некотором отрезке времени относится к ретроспективным обратным задачам теплопроводности [14, 15] и является некорректно поставленной [15, 16]. Как это хорошо известно, задача решается при использовании дополнительной информации об искомом решении [15, 16], т. е. методом регуляризации.

В работе [10] был опробован алгоритм оценки для случая, когда как искомое, так и используемое при решении задачи температурное поле металла аппроксимировалось конечно-разностной схемой и задача напрямую решалась в таком конечно-разностном представлении, однако проведенные вычислительные эксперименты не дали приемлемых результатов, погрешность оценки $t^0(x)$ оказалась недопустимо большой. Часто получали нереальный профиль оцениваемого температурного поля. В связи с этим для решения задачи применили следующий регуляризирующий подход.

Известно [17], что температурное поле слябов при нагреве в печах удовлетворительно аппроксимируется многочленом второго порядка, поэтому, приняв такое допущение, можно свести задачу об определении $t^0(x)$ к нахождению неизвестных численных значений параметров (коэффициентов) этого многочлена.

Эту задачу – задачу определения параметров многочлена – решали как методом наименьших квадратов, так и методом наименьших модулей, причем моделирование показало, что разработанные алгоритмы являются практически равноценными. В процессе исследования установили, что точность оценки $t^0(x)$ по данным алгоритмам существенно зависит от точности информации о температуре поверхности заготовки на отрезке наблюдения. Данные о влиянии погрешно-

стей измерения температуры поверхности на погрешность оценки $t^0(x)$ приведены в работе [10]. Показано, что если считать, что погрешность определения температурного поля в каждой точке представительного сечения заготовок должна быть не больше 25 град., то погрешность измерения температуры поверхности металла в печи на отрезке наблюдения должна быть достаточно малой и не превышать 10 град., если же это требование предъявлять только к среднemasсовой температуре нагреваемого металла, то предел допустимой погрешности измерения может быть повышен до 15 град. При этом выяснили также, что наибольшее влияние на точность оценки температурного поля оказывает погрешность измерения температуры поверхности в начале наблюдения, чем в последующие моменты времени, в этом проявляется известный принцип независимости поведения реальных физических систем от начальных данных при достаточно большом τ .

Если рассматривать задачу оценки начального температурного поля слябов горячего посада при посадке их в методические печи, то допустимая погрешность измерения температуры поверхности слябов может быть повышена до 20 град. Объясняется это тем, что ошибка определения начальной среднemasсовой температуры металла в 30 и более град. практически уже через 10 мин 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 температурного поля

металла, обусловленная неточностью оценки начальной температуры, будет незначительной.

В работе [18] проведены исследования по оценке температуры металла многочленом нулевого порядка, иначе говоря, некоторым числом, характеризующим все температурное поле – среднemasсовую температуру. Данные исследования дополняют результаты работы [10], причем разработанный алгоритм выгодно отличается от алгоритма [10] с точки зрения количества необходимых вычислений. Последнее достаточно важно при построении АСУ ТП, работающей в реальном масштабе времени.

Влияние погрешностей измерения температуры поверхности на точность оценки среднemasсовой температуры приведено в работе [18].

Выводы

Рассматривается задача оценки наблюдаемости температурного поля слябов при их нагреве в методических печах. Установлено, что объект вполне наблюдаем, т. е. температурное поле заготовки в некоторый момент времени может быть однозначно определено по данным измерения температуры поверхности и температуры рабочего пространства на некотором последующем отрезке времени, т. е. непрерывный контроль температуры по ходу процесса нагрева с самого его начала не является в принципе абсолютно необходимым. Приводятся конкретные алгоритмы решения задачи. Результаты работы могут быть использованы при построении автоматизированных систем управления методическими нагревательными печами.

Список литературы

1. Kolenko T., Debelak M., Glogovac B. Ugotavljanje zacetnega temperaturnega stanja vrocih plosc pri zalaganju v potisno pec // Zelez. zb. 1991. № 2. S. 63–68.
2. Kurpisz K. Determining transient temperature distribution in solids from measurements of the surface temperature // ISIJ International. 1991. No. 9. P. 979–984.
3. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. М.: Наука, 1979. 336 с.
4. Егоров А.И., Знаменская Л.Н. Введение в теорию управления системами с распределенными параметрами. СПб.: Лань, 2017. 292 с.
5. Заболотнов Ю.М. Оптимальное управление непрерывными динамическими системами. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2005. 129 с.
6. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
7. Математические методы теории управления. Проблемы устойчивости, управляемости и наблюдаемости / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, А.В. Ильин и др. М.: Физматлит, 2013. 200 с.
8. Панферов В.И. Инструментально-расчетный контроль температуры металла в АСУ ТП методических печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1996. № 8. С. 63–66.

9. Панферов В.И. Методы контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. № 10. С. 57–61.
10. Панферов В.И. Оценка температурных полей массивных тел по наблюдаемым величинам процесса нагрева // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. № 7. С. 112–115.
11. Исследование температурного режима нагревательных печей прокатных станков 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.
12. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965. 476 с.
13. Панферов В.И. О наблюдаемости процесса нагрева массивных тел в нагревательных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 1. С. 155–156.
14. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. Киев: Наукова думка, 1982. 359 с.
15. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
16. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
17. Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович и др. М.: Металлургия, 1981. 196 с.
18. Панферов В.И., Тренин Н.А., Панферов С.В. Оценка температуры массивного тела по измеряемым величинам процесса теплообмена // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 1. С. 133–139. DOI: 10.14529/ctcr180116

References

1. Kolenko T., Debelak M., Glogovac B. Ugotavljanje zacetnega temperaturnega stanja vrocih ploc pri zalaganju v potisno pec. *Zelez. zb.* 1991;2:63–68.
2. Kurpisz K. Determining transient temperature distribution in solids from measurements of the surface temperature. *ISIJ International*. 1991;9:979–984.
3. Voronov A.A. *Ustoychivost', upravlyayemost', nablyudayemost'* [Stability, controllability, observability]. Moscow: Nauka; 1979. 336 p. (In Russ.)
4. Egorov A.I., Znamenskaya L.N. *Vvedeniye v teoriyu upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami* [Introduction to the theory of control systems with distributed parameters]. St. Petersburg: Lan'; 2017. 292 p. (In Russ.)
5. Zabolotnov Yu.M. *Optimal'noye upravleniye nepreryvnymi dinamicheskimi sistemami* [Optimal control of continuous dynamic systems]. Samara: Samara State Aerospace University; 2005. 129 p. (In Russ.)
6. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravleniye* [Robust stability and control]. Moscow: Nauka; 2002. 303 p. (In Russ.)
7. Emelyanov S.V., Korovin S.K., Ilyin A.V., Fomichev V.V., Fursov A.S. *Matematicheskiye metody teorii upravleniya. Problemy ustoychivosti, upravlyayemosti i nablyudayemosti* [Mathematical methods of control theory. Problems of stability, controllability and observability]. Moscow: Fizmatlit; 2013. 200 p. (In Russ.)
8. Panferov V.I. [Instrumental and calculation control of metal temperature in the process control system of continuous furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1996;8:63–66. (In Russ.)
9. Panferov V.I. [Metal temperature control techniques in automation of continuous furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2002;10:57–61. (In Russ.)
10. Panferov V.I. [Estimation of the temperature fields of massive bodies from the observed values of the heating process]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1988;7:112–115. (In Russ.)
11. Ginkul S.I., Lebedev A.N., Podobed Ju.V., Saproнова 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 Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Metallurgiya"* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series "Metallurgy"]. 2010;12(177):201–206. (In Russ.)

12. Butkovsky A.G. *Teoriya optimal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami* [Theory of optimal control of systems with distributed parameters]. Moscow: Nauka; 1965. 476 p. (In Russ.)
13. Panferov V.I. [On the observability of the process of heating massive bodies in heating furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1985;1:155–156. (In Russ.)
14. Kozdoba L.A., Krukovskiy P.G. *Metody resheniya obratnykh zadach teploperenosa* [Methods for solving inverse problems of heat transfer]. Kyiv: Naukova dumka; 1982. 359 p. (In Russ.)
15. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rummyantsev S.V. *Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Extremal methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka; 1988. 288 p. (In Russ.)
16. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka; 1974. 224 p. (In Russ.)
17. 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: Metallurgiya; 1981. 196 p. (In Russ.)
18. 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;18(1):133–139. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180116

Информация об авторах

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; tgsiv@mail.ru.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Information about the authors

Vladimir I. Panferov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information and Analytical Support for Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; tgsiv@mail.ru.

Sergey V. Panferov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Статья поступила в редакцию 17.11.2022

The article was submitted 17.11.2022