

Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика

Metallurgical heat and power engineering

Научная статья
УДК 669.046:621.783
DOI: 10.14529/met220210

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ НИЖНИХ ЗОН МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В.И. Панферов, tgsiv@mail.ru
С.В. Панферов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Введение. Рассматривается задача обеспечения идентичности траекторий нагрева верхней и нижней половин сляба (симметричности нагрева сляба) при существенно различных численных значениях параметров внешнего теплообмена для его верхней и нижней поверхностей. Обуславливается это, в частности, неудовлетворительной тепловой изоляцией подовых труб. **Цель исследования.** Разработать алгоритм расчета, необходимого для симметричности соотношения уставок (заданий) регуляторам температуры рабочего пространства верхних и нижних нагревательных зон методических печей. **Материалы и методы.** Выполнен анализ и обобщение литературных данных по проблеме. Предложено математическое описание несимметричного нагрева, поставлена и решена задача оптимизации. **Результаты.** Варианты алгоритма предусматривают возможность описания внешнего и внутреннего теплообмена как в линеаризованной, так и в исходной нелинейной формах. Для случая представления процесса нагрева полностью линеаризованным уравнением теплопроводности с конвективной формой внешнего теплообмена искомый результат представляется аналитической формулой. Это, как известно, позволяет проследить влияние исходных параметров процесса на оптимальное соотношение уставок. Численным исследованием показано, что соблюдение вычисленного соотношения уставок обеспечивает при собственно несимметричном нагреве (неравенстве коэффициентов внешнего теплообмена) удовлетворительное совпадение траекторий средне-массовой температуры верхней и нижней половин сляба. Предложен также и упрощенный вариант решения рассматриваемой задачи, когда динамика средне-массовых температур верхней и нижней половин сляба изначально описывается обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка, полученным из уравнения теплопроводности посредством интегрального усреднения температуры по толщине сляба. Упрощенный вариант также обеспечивает, как правило, практически приемлемую близость траекторий нагрева верхней и нижней половин сляба и отличается еще большей «прозрачностью» относительно того, как исходные данные влияют на искомый результат. **Заключение.** Использование оптимального соотношения уставок позволяет, например, при решении задач оптимального управления процессом в два раза уменьшить размерность искомого вектора управления, что весьма существенно при разработке алгоритмического обеспечения АСУ ТП нагревательных печей.

Ключевые слова: методическая печь, средне-массовая температура слябов, компенсация несимметрии нагрева, уставки регуляторов температуры в зонах, алгоритмическое обеспечение автоматизированных систем управления

Для цитирования: Панферов В.И., Панферов С.В. Управление температурным режимом нижних зон методических печей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 2. С. 93–102. DOI: 10.14529/met220210

TEMPERATURE CONTROL OF THE LOWER ZONES OF METHODOLOGICAL FURNACES

V.I. Panferov, tgsiv@mail.ru
S.V. Panferov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Introduction. The problem of ensuring the identity of the heating trajectories of the upper and lower halves of the slab (slab heating symmetry) is considered for significantly different numerical values of the external heat transfer parameters for its upper and lower surfaces. This is due, in particular, to poor thermal insulation of the hearth pipes. **Purpose of the study.** To develop an algorithm for calculating the ratio of settings (tasks) required for symmetry for the temperature controllers of the working space of the upper and lower heating zones of continuous furnaces. **Materials and methods.** The analysis and generalization of literature data on the problem is carried out. A mathematical description of asymmetric heating is proposed, an optimization problem is posed and solved. **Results.** Algorithm variants provide for the possibility of describing external and internal heat transfer both in linearized and in the original non-linear form. For the case of representation of the heating process by a fully linearized heat conduction equation with a convective form of external heat transfer, the desired result is represented by an analytical formula. This, as is known, makes it possible to trace the influence of the initial process parameters on the optimal ratio of settings. Numerical research shows that observance of the calculated ratio of the settings ensures a satisfactory coincidence of the mass-average temperature trajectories of the upper and lower halves of the slab in the case of asymmetric heating itself (inequality of external heat transfer coefficients). A simplified solution of the problem under consideration is also proposed, when the dynamics of mass-average temperatures of the upper and lower halves of the slab is initially described by a first-order ordinary differential equation obtained from the heat conduction equation by integral temperature averaging over the thickness of the slab. The simplified version also provides, as a rule, practically acceptable proximity of the heating trajectories of the upper and lower halves of the slab and is even more “transparent” as to how the initial data affects the desired result. **Conclusion.** The use of the optimal ratio of settings allows, for example, when solving problems of optimal process control, to reduce the dimension of the desired control vector by half, which is very important in the development of algorithmic support for automated process control systems for heating furnaces.

Keywords: methodological furnace, mass-average temperature of slabs, heating asymmetry compensation, temperature controller settings in zones, algorithmic support of automated control systems

For citation: Panferov V.I., Panferov S.V. Temperature control of the lower zones of methodological furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2022;22(2): 93–102. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220210

Введение

Двусторонний нагрев металла в методических печах без теплоизоляции подовых труб или в случае ее неудовлетворительного состояния является существенно несимметричным [1]. Для методических печей стана 2500 ПАО «ММК», например, коэффициент несимметричности нагрева [2] может составлять 0,58...0,62, тепловой поток на металл в нижних зонах достигает лишь 62...72 % от потока в верхних нагревательных зонах печей [3]. Вместе с тем должная тепловая изоляция подовых труб и установка рейтеров позволяют в 10–20 раз уменьшить теплотери с охлаждением труб, что приводит практически к вы-

равниванию тепловых потоков на металл снизу и сверху, значительно улучшаются равномерность и качество его нагрева [4–6].

Несимметрию нагрева (несимметричность температурного поля сляба) иногда пытаются компенсировать за счет повышения температуры рабочего пространства нижних нагревательных зон, при этом уставки (задания) локальных регуляторов температуры определяются по соотношению [7, 8]

$$t_{\text{НЗ}} = kt_{\text{ВЗ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{НЗ}}$, $t_{\text{ВЗ}}$ – уставки локальных регуляторов температуры нижней и верхней зон печи соответственно; k – некоторый постоянный коэффициент. Понятно, что в данном случае

$k \geq 1,0$; к сожалению, его численное значение выбирается, как правило, опытным путем, широко известной и обоснованной процедуры выбора коэффициента k не существует. Вместе с тем разработка такой теории позволит формализовать процесс определения числового значения коэффициента k , что повышает долю автоматически реализуемых функций автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). Кроме того, если выяснится, что выбором численного значения коэффициента k можно удовлетворительно компенсировать несимметрию нагрева, то это создаст теоретическую основу допустимости рассмотрения процесса в симметричной форме, что во многих случаях приводит к существенному упрощению решения задач. В частности, при оптимизации управления печами [9] это позволяет в два раза уменьшить размерность искомого вектора управления, т. е. будет достаточно найти оптимальный набор температур рабочего пространства только верхних зон печей, задания регуляторам температуры нижних зон автоматически определяются по соотношению (1).

Модель несимметричного нагрева

Математическое описание динамики температурных полей верхней и нижней половин слябов в зоне нагрева представим следующим образом.

Общая часть описания в данном случае такова:

$$c\rho \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right), 0 < x < L, \tau > 0; \quad (2)$$

$$t(x, 0) = t^0(x), 0 \leq x \leq L; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} = 0, \tau \geq 0. \quad (4)$$

Дополнительно для верхней и нижней половин сляба будем иметь соответственно:

$$\lambda \frac{\partial t(L,\tau)}{\partial x} = \gamma_{\text{вз}} f[t_{\text{вз}}(\tau), t(L, \tau)], \tau \geq 0; \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial t(L,\tau)}{\partial x} = \gamma_{\text{нз}} f[kt_{\text{вз}}(\tau), t(L, \tau)], \tau \geq 0. \quad (6)$$

Здесь c , ρ и λ – соответственно теплоемкость единицы массы, плотность и коэффициент теплопроводности, зависящие в общем случае от температуры $t(x, \tau)$; x – пространственная координата; τ – время; L – расчетное сечение, равное половине толщины сляба; $t^0(x)$ – заданная функция, описывающая начальное температурное поле металла; f – функция, описывающая внешний теплообмен металла: $f = t_{\text{вз}}(\tau) - t(L, \tau)$ – при описании теплообмена в конвективной

форме, $f = \left(\frac{t_{\text{вз}}(\tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t(L, \tau) + 273}{100} \right)^4$ – при описании теплообмена в лучистой форме; $\gamma_{\text{вз}}, \gamma_{\text{нз}}$ – параметры моделей внешнего теплообмена, причем при несимметричном нагреве, причем $\gamma_{\text{вз}} > \gamma_{\text{нз}}$ [10]; $t_{\text{вз}}$ – температура рабочего пространства в верхней нагревательной зоне печи.

В данном случае сляб мысленно разрезается по толщине на две равные части, при этом считается, что на линии разреза поддерживается нулевой градиент температуры и при переходе от одной половины сляба к другой изменяется на противоположное положительное направление отсчета пространственной координаты x . При этом нагрев верхней и нижней половин сляба представляется условно независимым. Нагрев верхней половины описывается уравнениями (2)–(5), а нижней половины соответственно уравнениями (2)–(4) и (6). Подчеркнем также, что использование условия (4) в математическом описании нагрева обусловлено самой постановкой задачи: обеспечить симметричное температурное поле в слябе. Суммарное охлаждающее действие элементов конструкции пода, согласно рекомендациям работ [10, 11], учтено меньшим значением коэффициента внешнего теплообмена, т. е. считается, что $\gamma_{\text{вз}} > \gamma_{\text{нз}}$; реальные численные значения коэффициентов $\gamma_{\text{вз}}, \gamma_{\text{нз}}$ определяются при решении задачи параметрической идентификации модели нагрева металла [12–16].

Следует заметить, что модель собственно несимметричного нагрева сляба получается «склежкой» уравнений моделей для верхней и нижней половин с поглощением уравнения (4).

Постановка задачи

Анализ задачи показал, что невозможно обеспечить абсолютную идентичность профилей температурного поля верхней и нижней половин в процессе всего нагрева в зоне, следует ограничиться получением достаточно близких динамических траекторий для среднемассовой температуры. Поэтому на траекториях динамических систем (2)–(6) определим следующий функционал

$$I(k) = \frac{1}{T} \int_0^T [\bar{t}_{\text{в}}(\tau) - \bar{t}_{\text{н}}(\tau)]^2 d\tau, \quad (7)$$

где $\bar{t}_{\text{в}}(\tau)$ и $\bar{t}_{\text{н}}(\tau)$ – среднемассовая температура верхней и нижней половин соответственно; T – время нагрева в зоне печи.

Поставим следующую задачу оптимизации [17]: $\min_k I(k)$ – требуется определить такое численное значение коэффициента k , при котором критерий (7) принимает минимальное значение.

Решение задачи для линейного случая

Рассмотрим решение поставленной задачи при описании процесса полностью линеаризованным уравнением теплопроводности с конвективной формой внешнего теплообмена, при этом удастся получить некоторые аналитические результаты. При этом будем считать, что $t^0(x) = 0$, т. е. задача приводится к нулевым начальным условиям, что, как известно, не нарушает общности получаемых результатов [18].

Используя приведенное в [2] решение поставленной линейной задачи, нетрудно получить формулы для среднemasсовой температуры верхней и нижней половин сляба. Подставляя эти формулы в критерий (7) и решая задачу его минимизации по k , найдем его оптимальное значение. Для случая, когда температура в зоне является постоянной величиной, оптимальное значение коэффициента k вычисляется по соотношению

$$k = \frac{\int_0^T [1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\sin^2 \mu_i \exp\left(-\frac{\mu_i^2 a \tau}{L^2}\right)}{\mu_i(\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i)}] \cdot [1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\sin^2 \eta_i \exp\left(-\frac{\eta_i^2 a \tau}{L^2}\right)}{\eta_i(\eta_i + \sin \eta_i \cos \eta_i)}] d\tau}{\int_0^T \{1 - \sum_{i=1}^{\infty} [1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\sin^2 \eta_i \exp\left(-\frac{\eta_i^2 a \tau}{L^2}\right)}{\eta_i(\eta_i + \sin \eta_i \cos \eta_i)}]\}^2 d\tau}, \quad (8)$$

где μ_i и η_i – корни уравнений $\mu\lambda/(\gamma_{вз}L) = \text{ctg}\mu$ и $\eta\lambda/(\gamma_{вз}L) = \text{ctg}\eta$ соответственно; a – коэффициент температуропроводности.

Как видно из формулы (8), оптимальное значение коэффициента k в практически значимом случае нагрева с постоянной температурой рабочего пространства в зоне не зависит от численного значения этой температуры, а определяется только теплофизическими свойствами стали, параметрами теплообмена, толщиной и временем нагрева сляба в зоне. Примечательно, как это следует из формулы (8), если $\gamma_{вз} = \gamma_{вз}$, то $\mu_i = \eta_i$ для $i = \overline{1, \infty}$ и будет $k = 1$, что и следовало ожидать, так как нагрев в этом случае реально является абсолютно симметричным. Отклонение численного значения коэффициента k от 1 определяется только тем, насколько $\gamma_{вз}$ отличается от $\gamma_{вз}$.

Численный анализ полученного решения

На рис. 1 для различных пар чисел Био, отвечающих нижней и верхней поверхностям сляба, приведено семейство кривых, изображающих зависимость оптимального значения коэффициента k от времени нагрева в зоне. При этом рассматривался нагрев углеродистых слябов с $L = 0,1$ м. Семейство сплошных кривых соответствует, считая сверху вниз, следующим значениям числа Био для нижней поверхности: 0,6; 0,7; 0,8; 0,9, число Био для верхней поверхности сляба во всех этих случаях равно 1,0. Кривая, отмеченная точками, соответствует числам Био 1,5 и 2, а кривая, изображенная штрих-пунктирной линией, числам Био 1,0 и 1,5 соответственно для нижней и верхней поверхностей сляба.

Как следует из рис. 1, оптимальное значение коэффициента k является монотонно убывающей функцией времени, следовательно, с увеличением времени нагрева в зоне для компенсации несимметрии требуется более низкий уровень температуры рабочего пространства в нижней нагревательной зоне печей, чем при меньшем времени нагрева. Другими словами, степень требуемого превышения температуры нижней зоны над температурой верхней зоны уменьшается.

При увеличении степени несимметрии (в данном случае степени различия коэффициентов внешнего теплообмена $\gamma_{вз}$ и $\gamma_{вз}$) оптимальное численное значение коэффициента k возрастает, поэтому в этом случае при прочих равных условиях для компенсации несимметрии потребуются более высокий уровень температуры рабочего пространства в нижних нагревательных зонах печей.

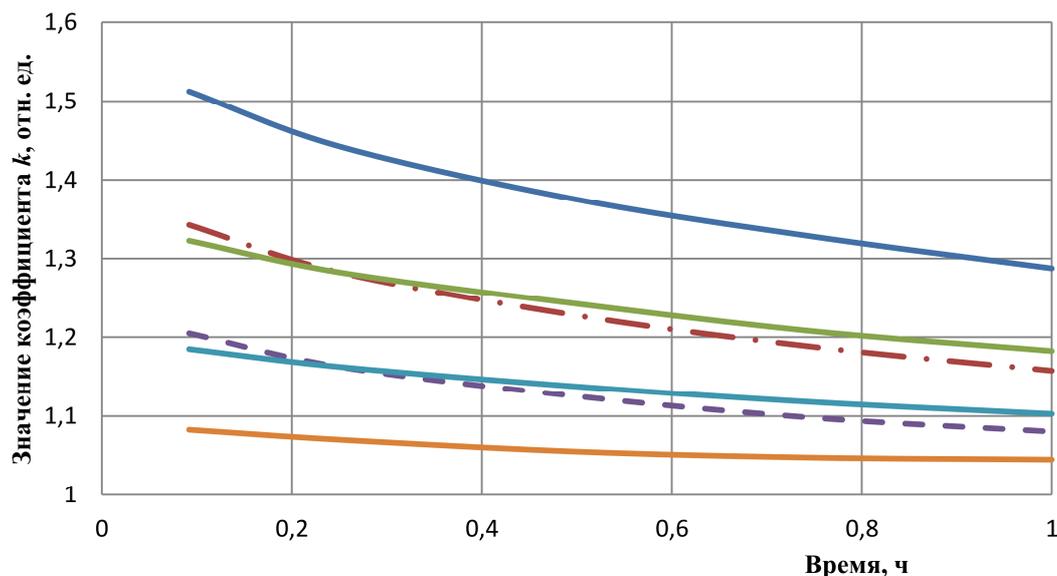


Рис. 1. Зависимость оптимального значения коэффициента k от времени нагрева для различных пар чисел Био для нижней и верхней поверхностей сляба
Fig. 1. Dependence of the optimal value of the coefficient k on the heating time for different pairs of Biot numbers for the lower and upper surfaces of the slab

В работе провели численное исследование получаемой разности среднемассовых температур верхней и нижней половин сляба, при использовании оптимального значения коэффициента k для задания температуры ра-

бочего пространства нижней нагревательной зоны. В таблице приведены получаемые при этом максимальные модули относительной разности среднемассовых температур верхней и нижней половин сляба. Исходные дан-

Максимальный модуль относительной разности среднемассовых температур
верхней и нижней половин сляба
Maximum modulus of the relative difference between the average mass temperatures
of the upper and lower halves of the slab

№ п/п	Число Био для половины сляба, отн. ед.		Значение коэффициента k , отн. ед.	Максимальный модуль относительной разности среднемассовых температур, отн. ед.
	верхней	нижней		
1	1,0	0,6	1,432	0,0084
			1,382	0,0168
			1,290	0,0403
2	1,0	0,7	1,277	0,0061
			1,245	0,0122
			1,185	0,0289
3	1,0	0,8	1,162	0,0039
			1,142	0,0078
			1,107	0,0184
4	1,0	0,9	1,071	0,0019
			1,063	0,0038
			1,047	0,0088
5	1,5	1,0	1,272	0,0104
			1,231	0,0192
			1,161	0,0394
6	2,0	1,5	1,156	0,0092
			1,128	0,0161
			1,084	0,0289

ные для расчета соответствуют данным рис. 1. Причем в таблице значения коэффициента k и максимального модуля относительной разности среднемассовых температур верхней и нижней половин сляба приведены для следующих трех значений времени нагрева в зоне: 0,3; 0,5 и 1,0 ч, считая для каждой пары чисел Био сверху вниз соответственно.

Как следует из таблицы, при уменьшении времени нагрева в зоне во всех случаях максимальный модуль уменьшается, следовательно, в этом случае получаются более близкие динамические траектории для среднемассовых температур. Это достаточно понятно и вполне объяснимо, поскольку очевидно, что чем меньше длительность отрезка времени, тем точнее можно компенсировать несимметрию нагрева – точнее сблизить траектории нагрева верхней и нижней половин сляба. Также отметим, что из данных таблицы следует, что, как правило, за счет выбора численного значения коэффициента k удастся получить практически удовлетворительное совпадение динамических траекторий для среднемассовых температур верхней и нижней половин сляба.

Нелинейный случай

В случаях учета зависимости теплофизических свойств стали от температуры и в описании теплообмена в лучистой форме для решения поставленной одномерной задачи оп-

тимизации $\min_k I(k)$ применяли метод золотого сечения. При этом уравнение теплопроводности аппроксимировалось неявной разностной схемой, для ее решения использовался метод прогонки [19, 20]. Интегралы вычислялись методом Симпсона. Зависимости теплофизических свойств стали от температуры брали из [21].

Исследование показало, что задача устойчиво и практически с любой наперед заданной точностью решается и в этом случае. Зависимость оптимального значения коэффициента k также является монотонно убывающей функцией времени, так же, как и в предыдущем случае, с увеличением степени несимметрии оптимальное значение k возрастает. На рис. 2 для различных пар коэффициентов излучения приведены типичные кривые изменения оптимального значения коэффициента k в зависимости от времени нагрева в зоне. При этом коэффициент излучения для нижней поверхности сляба составлял 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 2,9 Вт/(м²·К⁴), считая по кривым сверху вниз, для верхней поверхности во всех случаях он равен 3,0 Вт/(м²·К⁴), рассматривался нагрев углеродистой стали с нулевой начальной температурой и $t_{вз} = 1200$ °С.

При использовании оптимального значения коэффициента k максимальный модуль разности среднемассовых температур верхней и нижней половин сляба не превосходил 10 град., что вполне приемлемо для практики.

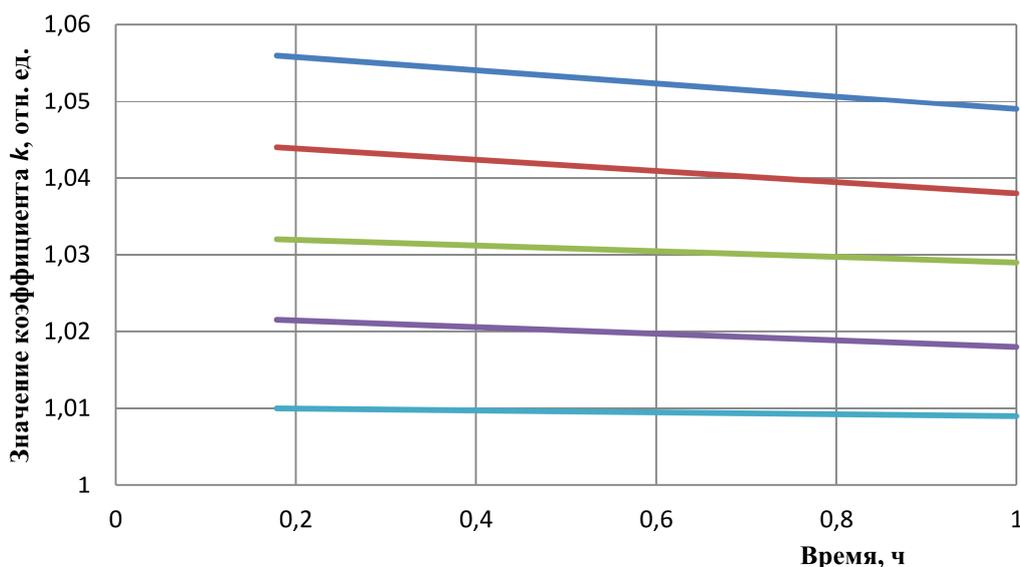


Рис. 2. Кривые изменения оптимального значения коэффициента k в зависимости от времени нагрева в зоне для различных пар коэффициентов излучения

Fig. 2. Curves of changes in the optimal value of the coefficient k depending on the time of heating in the zone for different pairs of emissivity

Упрощенный вариант алгоритма

При $c, \rho, \lambda = \text{const}$, следуя работе [22], проинтегрируем уравнение (2) по координате x в пределах от 0 до L и разделим обе его части на L , тогда получим

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{a}{L} \left[\frac{\partial t(L, \tau)}{\partial x} - \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} \right], \quad (9)$$

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

Подставим теперь в (9) соотношение (4) и граничное условие для $x = L$, записанное предварительно в конвективной форме, тогда получим, что

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{a\alpha}{\lambda L} [t_{\text{пр}}(\tau) - t(L, \tau)]. \quad (10)$$

Здесь α – коэффициент теплоотдачи, при этом вполне понятно, что при вычислении среднемассовой температуры верхней половины сляба $\alpha = \alpha_{\text{вз}}$, а при определении среднемассовой температуры нижней половины сляба $\alpha = \alpha_{\text{нз}}$.

Если предположить, что температура поверхности $t(L, \tau)$ равна среднемассовой температуре $\bar{t}(\tau) = \frac{1}{L} \int_0^L t(x, \tau) dx$, как это имеет место для термически тонких тел, то уравнение (10) переписывается в виде

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = \frac{1}{T_{\text{вр}}} [t_{\text{пр}}(\tau) - \bar{t}], \quad (11)$$

где $T_{\text{вр}} = \lambda L / (a\alpha)$ – постоянная времени нагрева. Для верхней половины сляба $T_{\text{вр}} = T_{\text{вз}} = \lambda L / (a\alpha_{\text{вз}})$, а для нижней – $T_{\text{вр}} = T_{\text{нз}} = \lambda L / (a\alpha_{\text{нз}})$. Заметим, что предположение $t(L, \tau) = \bar{t}(\tau)$ является в значительной мере оправданным в рассматриваемом случае, так как L – это всего лишь половина толщины сляба.

Если динамику среднемассовой температуры верхней и нижней половин сляба описать упрощенной моделью (11), то для оптимального значения коэффициента k получается следующее соотношение

$$k = \frac{T - T_{\text{вз}} - T_{\text{нз}} + \frac{T_{\text{вз}} T_{\text{нз}}}{T_{\text{вз}} + T_{\text{нз}}} + T_{\text{вз}} \cdot \exp\left(-\frac{T}{T_{\text{вз}}}\right) + T_{\text{нз}} \cdot \exp\left(-\frac{T}{T_{\text{нз}}}\right) - \frac{T_{\text{вз}} T_{\text{нз}}}{T_{\text{вз}} + T_{\text{нз}}} \cdot \exp\left(-\frac{T(T_{\text{вз}} + T_{\text{нз}})}{T_{\text{вз}} T_{\text{нз}}}\right)}{T - 2T_{\text{нз}} + \frac{T_{\text{нз}}}{2} + 2T_{\text{нз}} \cdot \exp\left(-\frac{T}{T_{\text{нз}}}\right) - \frac{T_{\text{нз}}}{2} \cdot \exp\left(-\frac{2T}{T_{\text{нз}}}\right)}. \quad (12)$$

Здесь $T_{\text{вз}} = \lambda L / (a\alpha_{\text{вз}}) = L^2 / (aBi_{\text{вз}})$, $T_{\text{нз}} = \lambda L / (a\alpha_{\text{нз}}) = L^2 / (aBi_{\text{нз}})$ – постоянные времени соответственно для верхней и нижней половин сляба. Как видно из формулы (9) при $T_{\text{вз}} = T_{\text{нз}} \Rightarrow k = 1$, что так и должно быть при такой конкретной постановке задачи. Кроме того, вполне очевидно, что данная формула заметно привлекательна как с точки зрения своей заметной «прозрачности» влияния исходных данных на вычисляемый результат – коэффициент k , так и с точки зрения объема требуемых вычислений.

Проведенное исследование показало, что различие числовых значений коэффициентов k , вычисленных по формулам (8) и (12), практически не существенно. Так, например, при числах Био 1,0 и 0,6 соответственно для верхней и нижней половин сляба, времени нагрева $T = 0,3$ ч и прочих указанных выше равных условиях вычисленное по формуле (12) значение коэффициента k составляет 1,508. Отличие этого значения от его значения, приведенного в первой строке таблицы, составляет 2,58 %, что вполне приемлемо.

Выводы

Разработан алгоритм расчета оптимального соотношения уставок регуляторов температуры верхних и нижних нагревательных зон методических печей, обеспечивающий удовлетворительное совпадение траекторий среднемассовой температуры верхней и нижней половин сляба. Варианты алгоритма предусматривают возможность описания внешнего и внутреннего теплообмена как в линеаризованной, так и в исходной нелинейной формах. Предложен также и упрощенный

вариант решения рассматриваемой задачи, когда динамика среднemasсовых температур верхней и нижней половин сляба изначально описывается не уравнением теплопроводности, а обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка. Использование оптимального соотношения уставок позволяет, например, при решении задач оптимизации процесса в два раза уменьшить размерность искомого вектора управления, что весьма существенно. Результаты работы могут быть использованы в составе алгоритмического обеспечения АСУ ТП.

Список литературы

1. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А. Направления повышения энергоэффективности нагревательных печей станов горячей прокатки // *Материалы междунар. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология»*. М.: НИТУ «МИСИС». 2014. С. 64–68.
2. Тайц Н.Ю. *Технология нагрева стали*. М.: Metallurgizdat, 1950. 450 с.
3. Парсункин Б.Н., Белан А.Ф. Исследование теплообмена и параметров управления нагревом при смешанном посаде металла в печь // *Сталь*. 1988. № 7. С. 99–103.
4. Изоляция подовых труб нагревательных печей / С.Я. Цыпин, В.Г. Ануфриев, Г.А. Михалев, Д.А. Старцев // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации*. 1988. Вып. 11 (1063). С. 18–28.
5. Эксплуатация рейтеров из жаропрочных сплавов на основе хрома в нагревательных печах прокатных цехов / А.Д. Бемянский, Ю.Л. Голицев, Л.И. Данилов и др. // *Сталь*. 1985. № 7. С. 86–89.
6. Опыт эксплуатации толкательных печей с рейтерами и теплоизоляцией подовых труб / В.Н. Казанцев, А.Г. Свичинский, О.Н. Сосковец и др. // *Сталь*. 1989. № 11. С. 100–104.
7. Опыт применения ЭВМ в АСУ ТП непрерывного широкополосного стана 2000 Череповецкого металлургического завода / М.Г. Ананьевский, М.А. Беньковский, Е.П. Сергеев и др. // *Экспресс-информация ин-та «Черметинформация»*. М.: Ин-т «Черметинформация», 1980. 39 с.
8. Влияние опорной системы печей с шагающими балками на особенности теплового состояния нагреваемых слябов / Д.А. Башкатов, В.И. Дождиков, Д.С. Мордовкин, И.Н. Чмырев // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2016. № 11. С. 63–66.
9. Панферов В.И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах / В.И. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2018. Т. 18, № 2. С. 71–80. DOI: 10.14529/ctcr180207.
10. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. *Управление нагревом металла*. М.: Металлургия, 1981. 272 с.
11. Кук А., Клима Р., Зуккер Д. Система программного обеспечения для автоматического управления проходными нагревательными печами // *Черные металлы*. Пер. с нем. 1982. № 18. С. 16–21.
12. Панферов В.И. Об одном решении задачи идентификации параметров моделей внешнего теплообмена металла в нагревательных печах // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1988. № 1. С. 135–139.
13. Панферов В.И. Идентификация математической модели нагрева металла в печах // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1990. № 9. С. 86–89.
14. Панферов В.И., Торопов Е.В. Идентификация математической модели несимметричного нагрева слябов в методических печах // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1992. № 4. С. 85–86.
15. Панферов В.И. Настройка алгоритмов контроля качества нагрева металла в печах // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 2. С. 139–142.
16. Панферов В.И. Идентификация математической модели нагрева слябов в методических печах // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1994. № 8. С. 53–55.
17. Панферов В.И., Торопов Е.В. Выбор уставок регуляторов температуры нижних зон методических печей // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1991. № 6. С. 78–80.
18. *Теория автоматического управления: учеб. для вузов* / под ред. А.В. Нетушила. М.: Высш. шк., 1976. 400 с.

19. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику: учеб. пособие для вузов. Долгопрудный: Издат. Дом «Интеллект», 2008. 504 с.
20. Рябенский В.С. Введение в вычислительную математику. М.: Физматлит, 2008. 288 с.
21. Маковский В.А., Лаврентик И.И. Алгоритмы управления нагревательными печами. М.: Metallurgiya, 1977. 183 с.
22. 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. Belen'kiy A.M., Bursin A.N., Ulanovskiy A.A. [Directions for improving the energy efficiency of heating furnaces of hot rolling mills]. In: *Materialy mezhdunar. konf. "Energoberegayushchiye tekhnologii v promyshlennosti. Pechnyye agregaty. Ekologiya"* [Proceedings of the Intern. conf. "Energy-saving technologies in industry. Furnace units. Ecology"]. Moscow: NUST "MISIS". 2014. P. 64–68. (In Russ.)
2. Thayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow: Metallurgizdat; 1950. 450 p. (In Russ.)
3. Parsunkin B.N., Belan A.F. [Investigation of heat transfer and parameters of heating control in the case of mixed planting of metal in a furnace]. *Steel*. 1988;(7):99–103. (In Russ.)
4. Tsyplin S.Ya., Anufriev V.G., Mikhalev G.A., Startsev D.A. [Isolation of bottom pipes of heating furnaces]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific and Technical Information*. 1988;11(1063):18–28. (In Russ.)
5. Belyanskiy A.D., Golishchev Yu.L., Danilov L.I. et al. [Operation of riders from heat-resistant alloys based on chromium in heating furnaces of rolling shops]. *Steel*. 1985;(7):86–89. (In Russ.)
6. Kazantsev V.N., Svichinskiy A.G., Soskovets O.N. et al. [Experience in the operation of pusher furnaces with riders and thermal insulation of hearth pipes]. *Steel*. 1989;(11):100–104. (In Russ.)
7. Anan'evskiy M.G., Benyakovskiy M.A., Sergeev E.P. et al. [Experience in the use of computers in the automated process control system of a continuous broadband mill 2000 of the Cherepovets Metallurgical Plant]. In: *Ekspress-informatsiya in-ta "Chermetinformatsiya"* [Express information of the institute "Chermetinformatsiya"]. Moscow: Institute "Chermetinformatsiya"; 1980. 39 p. (In Russ.)
8. Bashkatov D.A., Dozhdikov V.I., Mordovkin D.S., Chmyrev I.N. [Influence of the supporting system of furnaces with walking beams on the features of the thermal state of heated slabs]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2016;(11):63–66. (In Russ.)
9. Panferov V.I. About Economic Management of Heating Metal in Industrial Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(2):71–80. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180207
10. Butkovskiy A.G., Malyy S.A., Andreev Yu.N. *Upravlenie nagrevom metalla* [Control of metal heating]. Moscow: Metallurgiya; 1981. 272 p. (In Russ.)
11. Cook A., Klima R., Zukker D. [Software system for automatic control of continuous heating furnaces]. *Ferrous Metals. Transl. from German*. 1982;(18):16–21. (In Russ.)
12. Panferov V.I. [On one solution to the problem of identifying the parameters of models of external heat transfer of metal in heating furnaces]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1988;(1):135–139. (In Russ.)
13. Panferov V.I. [Identification of the mathematical model of metal heating in furnaces]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990;(9):86–89. (In Russ.)
14. Panferov V.I., Toropov E.V. [Identification of a mathematical model of asymmetric heating of slabs in process furnaces]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1992;(4):85–86. (In Russ.)
15. Panferov V.I. [Adjustment of quality control algorithms for metal heating in furnaces]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1989;(2):139–142. (In Russ.)
16. Panferov V.I. [Identification of the mathematical model of slab heating in process furnaces]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1994;(8):53–55. (In Russ.)
17. Panferov V.I., Toropov E.V. [The choice of the settings of the temperature regulators of the lower zones of the methodological furnaces]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 6, pp. 78–80. (In Russ.)

18. Netushil A.V. (Ed.). *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control]. Moscow: Vysshaya shkola; 1976. 400 p. (In Russ.)
19. Fedorenko R.P. *Vvedenie v vychislitel'nyu fiziku: ucheb. posobie dlya vuzov* [Introduction to computational physics: textbook for universities]. Dolgoprudny: Publishing house "Intellect"; 2008. 504 p. (In Russ.)
20. Ryaben'kiy V.S. *Vvedenie v vychislitel'nyu matematiku* [Introduction to Computational Mathematics]. Moscow: Fizmatlit; 2008. 288 p. (In Russ.)
21. Makovskiy V.A., Lavrentik I.I. *Algoritmy upravleniya nagrevatel'nymi pechami* [Control algorithms for heating furnaces]. Moscow: Metallurgiya; 1977. 183 p. (In Russ.)
22. 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 10.01.2022

The article was submitted 10.01.2022