

Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика Metallurgical heat and power engineering

Научная статья
УДК 669.046:621.746.6.001.57
DOI: 10.14529/met240108

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ И ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБОВЫХ ЗАГОТОВОК

В.И. Панферов[✉], tgsiv@mail.ru

С.В. Панферов, panferovsv@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Введение. Рассматривается задача параметрической идентификации математической модели процесса охлаждения и затвердевания непрерывнолитых слябов в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Актуальность работы обуславливается прежде всего тем, что качество получаемого таким образом изделия в существенной мере зависит от режима работы ЗВО. Технологический процесс достаточно сложный, не полностью изученный и, как следствие, пока еще плохо управляемый. **Цель исследования:** разработать процедуру параметрической идентификации модели процесса охлаждения и затвердевания металла по данным доступных для непосредственного измерения величин. **Материалы и методы.** Выполнен анализ и обобщение литературных данных по проблеме. Определена приемлемая структура математической модели, выбран критерий близости объекта и модели, поставлена и решена задача ее параметрической идентификации. **Результаты.** Определена приемлемая формула для описания реального температурного поля в заготовке после выхода металла из кристаллизатора. Численным исследованием установлено, что рассматриваемая задача идентификации решается устойчиво и практически с любой наперед заданной точностью, причем увеличение числа точек измерения температуры поверхности существенно повышает помехоустойчивость решения. При описании внешнего теплообмена в лучисто-конвективной форме задачу идентификации решали с помощью программы, реализующей метод по координатного спуска, получающиеся при этом задачи одномерной минимизации решали с помощью подпрограммы, использующей метод золотого сечения. Для численного интегрирования уравнений модели применяли неявную конечно-разностную схему, которую решали методом прогонки. В случае, когда внешний теплообмен заготовки описывается только в конвективной форме, разработана и апробирована программа, использующая метод золотого сечения. Приведены рассчитанные по настроенной модели кривые изменения во времени переменных процесса. **Заключение.** Настроенная на «реальный процесс» математическая модель применена для выявления особенностей процесса охлаждения металла в ЗВО МНЛЗ ККЦ ПАО «ММК», в частности, по результатам исследования была осуществлена корректировка расходов охладителя вдоль технологической линии.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, зона вторичного охлаждения, математическое моделирование, параметрическая идентификация модели, коэффициент теплоотдачи, метод наименьших модулей

Для цитирования: Панферов В.И., Панферов С.В. Моделирование и идентификация процесса охлаждения и затвердевания непрерывнолитых слябовых заготовок // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 1. С. 66–73. DOI: 10.14529/met240108

MODELING AND IDENTIFICATION OF THE COOLING AND SOLIDIFICATION PROCESS CONTINUOUSLY CAST SLAB BILLETS

V.I. Panferov[✉], tgsiv@mail.ru

S.V. Panferov, panferovsv@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Introduction. The problem of parametric identification of a mathematical model of the process of cooling and solidification of continuously cast slabs in the secondary cooling zone (SZZ) of continuous casting machines (CCMs) is considered. The relevance of the work is determined, first of all, by the fact that the quality of the product obtained in this way significantly depends on the operating mode of the air defense system. The technological process is quite complex, not fully studied and, as a result, still poorly managed. **Purpose of the study.** Develop a procedure for parametric identification of a model of the metal cooling and solidification process based on data available for direct measurement. **Materials and methods.** An analysis and synthesis of literature data on the problem was carried out. An acceptable structure of the mathematical model was determined, a criterion for the proximity of the object and the model was selected, and the problem of its parametric identification was posed and solved. **Results.** An acceptable formula has been determined to describe the real temperature field in the workpiece after the metal leaves the mold. A numerical study has established that the identification problem under consideration is solved stably and with almost any predetermined accuracy, and an increase in the number of surface temperature measurement points significantly increases the noise immunity of the solution. When describing external heat transfer in radiative-convective form, the identification problem was solved using a program that implements the coordinate descent method; the resulting one-dimensional minimization problems were solved using a subroutine using the golden section method. To numerically integrate the model equations, an implicit finite-difference scheme was used, which was solved by the sweep method. In the case where the external heat transfer of the workpiece is described only in convective form, a program using the golden section method has been developed and tested. The curves of changes over time of process variables calculated using the adjusted model are presented. **Conclusion.** A mathematical model tuned to the “real process” was used to identify the features of the metal cooling process in the production plant of the continuous casting plant of PJSC MMK; in particular, based on the results of the study, the coolant costs along the production line were adjusted.

Keywords: continuous casting machine, secondary cooling zone, mathematical modeling, parametric model identification, heat transfer coefficient, least modulus method

For citation: Panferov V.I., Panferov S.V. Modeling and identification of the cooling and solidification process continuously cast slab billets. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2024;24(1):66–73. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240108

Постановка задачи

Качество слитков, получаемых на МНЛЗ, в значительной мере определяется рациональной организацией теплоотвода в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). На практике режимы охлаждения заготовок обычно подбирают экспериментальным путем – посредством анализа качества литого металла для различных расходов охладителя по секциям ЗВО. Однако такой способ решения задачи является весьма трудоемким, поэтому представляется целесообразным применение математического моделирования для исследования и оптимизации режимов охлаждения заготовок.

Известно [1–7], что процесс охлаждения и затвердевания металла в ЗВО слэбовых МНЛЗ удовлетворительно может быть описан с помощью математической модели следующей структуры:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), 0 < x < l, \tau > 0; \quad (1)$$

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

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

$$\lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x} = \sigma \left\{ \left[\frac{t_c(\tau) + 273}{100} \right]^4 - \left[\frac{t(l, \tau) + 273}{100} \right]^4 \right\} + \alpha [t_c(\tau) - t(l, \tau)], \tau \geq 0, \quad (4)$$

где c, ρ, λ – соответственно эффективная теплоемкость, плотность и коэффициент тепло-

проводности, зависящие от температуры в данной точке x в данный момент времени τ – $t(x, \tau)$; $t^0(x)$ – заданная функция, описывающая температурное поле в заготовке после выхода из кристаллизатора; $t_c(\tau)$ – температура окружающей среды; σ и α – параметры внешнего теплообмена; l – расчетное сечение слитка.

В модели (1)–(4) используются известные [1–7] представления о двухфазной зоне слитка, согласно которым учет выделения теплоты кристаллизации сводится к соответствующему заданию зависимости эффективной теплоемкости от температуры. Данная величина рассчитывается по трехинтервальной формуле – соответственно для твердого и жидкого металла и двухфазной зоны заготовки. Границы двухфазной зоны слитка, отделяющей твердый металл от жидкой фазы, определяются по температурному полю заготовки – на границах должны достигаться температуры ликвидуса и солидуса соответственно.

Расчет процесса охлаждения и затвердевания заготовок по модели (1)–(4) обеспечивает достаточную для практических целей точность, если удовлетворительно определены реальные значения параметров внешнего теплообмена σ и α , т. е. решена задача параметрической идентификации [8–12]. Множество факторов технологического и конструктивного характера, влияющих на теплообмен в зоне, не позволяет параметрам σ и α вычислять только расчетным способом [5, 8–12].

Решение задачи параметрической идентификации

Исходной информацией для идентификации математической модели являются уравнения (1)–(4) и результаты наблюдения за поведением входов и выходов объекта [13, 14]. В данном случае входом объекта является температура окружающей среды, в качестве выхода используются значения температуры поверхности сляба в разных точках технологической линии. Подчеркнем, что все эти величины определяются непосредственным измерением на объекте.

Задачу идентификации сформулируем следующим образом: требуется определить такие значения параметров внешнего теплообмена, при которых критерий

$$I = \sum_{j=1}^n |t^3(l, \tau_j) - t^p(l, \tau_j)|, \quad (5)$$

где $t^3(l, \tau_j)$, $t^p(l, \tau_j)$ – соответственно экспериментальное и расчетное значения темпера-

туры поверхности заготовки; τ_j – используемые в эксперименте моменты времени; n – число экспериментальных точек, принимает наименьшее из возможных значение.

Как это следует из формулы (5), для настройки модели на «реальный процесс» применен метод наименьших модулей, характеризующийся значительно меньшей чувствительностью к выбросам экспериментальных данных по сравнению с методом наименьших квадратов.

Задача параметрической идентификации модели (1)–(4) решалась с учетом следующих обстоятельств. Параметры внешнего теплообмена σ и α имеют различные значения для разных секций ЗВО и определяются в основном расходом охладителя. При решении же задачи идентификации (параметрической настройки модели) возможны такие наборы экспериментальных данных, когда на каждую секцию ЗВО приходится хотя бы две точки измерения температуры поверхности и когда таких точек измерения нет. Предельный случай последней ситуации – когда измеряется температура поверхности металла только в пределах последней секции ЗВО.

В случае наличия хотя бы двух точек измерения температуры поверхности сляба в границах каждой секции ЗВО решение задачи можно упростить, решая задачу самостоятельно для каждой секции и последовательно, переходя по секциям от начала к концу технологической линии, аналогично тому, как это делалось в работе [11]. Однако при таком подходе может получиться так, что будут определены только близкие к оптимальным значения параметров теплообмена, а не их оптимальные значения. Дело в том, что если на величину локальных разностей расчетной и экспериментальной температур поверхности заготовки для первой секции влияют значения параметров теплообмена только этой секции, то для последующих секций величина локальных разностей температур будет зависеть не только от выбора значений параметров теплообмена для этой секции, но и всех предыдущих секций. В последнем случае решение задачи идентификации существенно усложняется: задачу нужно решать сразу для всей ЗВО, при этом число отыскиваемых параметров может быть достаточно большим.

Решение задачи первым методом будет полностью оправдано, если только удастся найти такие значения параметров теплообме-

на, при которых локальные разности температур для каждой секции будут практически равны нулю. В этом случае мы действительно будем находиться в точке глобального минимума критерия идентификации.

Отметим, что опыт решения таких задач [11] показал, что данное условие, как правило, выполняется, поэтому решение задачи идентификации для всей ЗВО в целом заменяли решением отдельных, более простых задач идентификации для каждого участка постоянства параметров внешнего теплообмена, таковым считалась отдельная секция ЗВО. Конечно, при этом соответствующим образом организовали и экспериментальные замеры температур: если модель внешнего теплообмена задана в лучисто-конвективной форме, то в границах каждой секции температура поверхности должна быть измерена не менее чем в двух точках [15]. Получающееся существенное упрощение частных задач обусловлено меньшей размерностью вектора искомых параметров внешнего теплообмена. При этом частные задачи решали последовательно по участкам, перемещаясь от начала к концу ЗВО.

Для случая лучисто-конвективной модели внешнего теплообмена задачу идентификации решали с помощью программы, реализующей метод покоординатного спуска, получающиеся при этом задачи одномерной минимизации решали с помощью подпрограммы, использующей метод золотого сечения. Причем для численного интегрирования уравнений (1)–(4) применяли неявную конечно-разностную схему, которую решали методом прогонки [16, 17]. Изменение численных значений c, ρ, λ в зависимости от температуры для твердого металла рассчитывали по аппроксимирующим уравнениям работы [18], в других случаях использовали данные работ [19, 20]. Эффективную теплоемкость двухфазной зоны оценивали по способу Ю.А. Самойловича [1, 2], при этом теплоту затвердевания сталей задавали согласно данным [19]. Причем с целью упрощения вычислений при расчете температурного поля на текущем временном интервале значения c, ρ, λ определяли по температурам на предыдущем временном слое. Погрешность вычислений от этого, как это хорошо известно, будет незначительной.

Температуры ликвидуса и солидуса, указывающие границы двухфазной зоны слитка, вычисляли по эмпирическим уравнениям работы [20].

Результаты исследования

В расчетах температурное поле заготовки после выхода из кристаллизатора сначала, следуя известным литературным рекомендациям, описывали уравнением

$$t^0(x) = t_{\text{п}} + (t_{\text{ж}} - t_{\text{п}}) \cdot \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right), \quad (6)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура поверхности слитка после выхода из кристаллизатора; $t_{\text{ж}}$ – температура жидкого металла в кристаллизаторе.

Однако, как показал опыт моделирования, данное уравнение не приемлемо для описания начального температурного поля сляба в зоне вторичного охлаждения, в этом случае толщина твердой корочки металла получается существенно завышенной. В самом деле, пусть $t_{\text{п}} = 1200$ °С, $t_{\text{ж}} = 1500$ °С, а температура ликвидуса равна 1500 °С, тогда границу x жидкой фазы следует отыскивать из неравенства

$$1200 + (1500 - 1200) \cdot \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right) \geq 1500. \quad (7)$$

Решая это неравенство, получим

$$x \leq \frac{1}{\sqrt{7}} l, \quad (8)$$

что не соответствует практическим данным.

Далее начального температурного поля заготовки пытались описывать квадратичным полиномом вида

$$t^0(x) = a + bx + cx^2. \quad (9)$$

При этом толщину затвердевшего металла вычисляли по соотношению $k \cdot \sqrt{\tau_{\text{кр}}}$ [3], где k – коэффициент затвердевания, а $\tau_{\text{кр}}$ – время прохождения металлом кристаллизатора: $\tau_{\text{кр}} = l_{\text{кр}}/v_{\text{р}}$. Здесь $l_{\text{кр}}$ – высота кристаллизатора, $v_{\text{р}}$ – скорость разливки, также при этом считалось, что температура затвердевшего металла на границе с двухфазной зоной равна температуре солидуса. Однако в этом случае вершина параболы располагается в промежуточной точке между центром и поверхностью заготовки (якобы промежуточные точки имеют более высокую температуру, чем центр), что тоже противоречит фактическим данным. Следовательно, и такой подход не приемлем для описания начального температурного поля сляба.

Установили, что реальное начальное температурное поле заготовки удовлетворительно описывается с помощью следующего соотношения:

$$t^0(x) = \begin{cases} t_{ж}, & \text{если } x < k \cdot \sqrt{\tau_{кр}}; \\ a + b \cdot (x - k \cdot \sqrt{\tau_{кр}}), & \text{если } l \geq x \geq k \cdot \sqrt{\tau_{кр}}, \end{cases} \quad (10)$$

здесь параметры a и b вычисляются из условия, что на поверхности заготовки наблюдается температура $t_{п}$, а температура твердого металла на границе с двухфазной зоной равна температуре солидуса.

В результате большого количества расчетов было установлено, что рассматриваемая задача идентификации решается устойчиво и практически с любой наперед заданной точностью. При этом увеличение числа точек измерения существенно повышает помехоустойчивость решения.

Если внешний теплообмен описать только в конвективной форме, используя понятие так называемого суммарного коэффициента теплоотдачи [1, 2], то в этом случае критерий идентификации (5) будет зависеть только от одного параметра – упомянутого суммарного коэффициента теплоотдачи. Для отыскания оптимального значения этого коэффициента можно ис-

пользовать любой одномерный метод минимизации, причем для реализации изложенного способа идентификации в пределах каждой расчетной зоны достаточно иметь только одну экспериментальную точку [15]. Нами для этого случая разработана и апробирована программа, использующая метод золотого сечения.

Распространенным методом определения суммарного коэффициента теплоотдачи является способ, основанный на тепловом расчете количества испарившейся воды. Однако процедура определения численного значения коэффициента испарения является весьма приближенной, вследствие этого точность отыскания параметра теплообмена данным способом не может быть высокой. Рассмотренный метод позволяет значительно точнее решать данную задачу.

На рис. 1 представлены рассчитанные по настроенной модели кривые изменения во

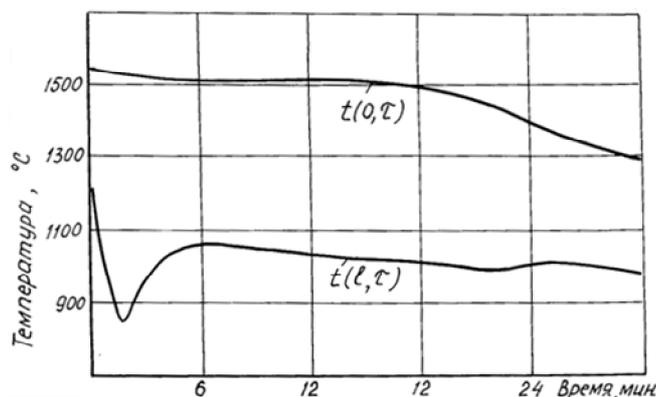


Рис. 1. Графики изменения температуры поверхности и центра заготовки
Fig. 1. Graphs of changes in temperature of the surface and center of the workpiece

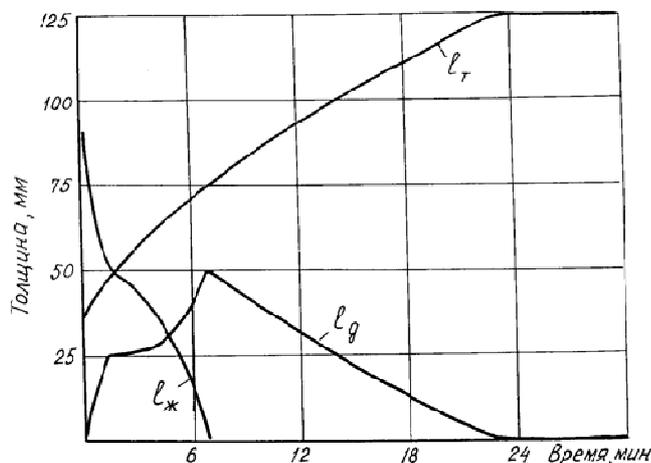


Рис. 2. Кривые изменения толщины жидкой, двухфазной и твердой фаз заготовки
Fig. 2. Curves of changes in the thickness of the liquid, two-phase and solid phases of the workpiece

времени температур центра $t(0, \tau)$ и поверхности заготовки $t(l, \tau)$, а на рис. 2 – толщины жидкой $l_{ж}$, двухфазной $l_{д}$ и твердой фаз $l_{т}$ сляба из стали марки 17ГС для зоны вторичного охлаждения МНЛЗ кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) ПАО «ММК». Здесь $v_p = 0,5$ м/мин; $l_{кр} = 1,1$ м; $t_{ж} = 1531$ °С; $t_{п} = 1204$ °С; $l = 0,125$ м. Как это нетрудно заметить, характер изменения кривых вполне соответствует практическим данным.

Найденные в процессе идентификации численные значения суммарного коэффициента теплоотдачи соответственно для секций 1–7-й зон вторичного охлаждения составили:

520,2; 618,6; 281,2; 203,7; 181,0; 170,8; 138,2 Вт/(м² · К). Большее значение коэффициента внешнего теплообмена для второй секции, чем для первой, объясняется большим расходом охладителя на данную секцию.

Выводы

Разработанная математическая модель позволила изучить существующие режимы охлаждения металла в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ ККЦ ПАО «ММК», в частности, установлена необходимость определенной корректировки расходов охладителя вдоль технологической линии.

Список литературы

1. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевицкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. М.: Metallurgy, 1982. 152 с.
2. Лисиенко В.Г., Самойлович Ю.А. Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1986. 121 с.
3. Цаплин А.И., Никулин И.Л. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии: учеб. пособие. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. 299 с.
4. Лукин С.В. Теплотехническое обоснование методов контроля и управления режимами охлаждения слитка на МНЛЗ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Череповец: Череповецкий гос. ун-т, 1998. 24 с.
5. Вдовин К.Н., Панферов В.И., Горосткин С.В. Идентификация математической модели процесса охлаждения и затвердевания непрерывнолитых слябовых заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 58–60.
6. Бирюков А.Б., Иванова А.А. Современные подходы к эффективному управлению теплотехническими процессами в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 3. С. 46–52.
7. Бирюков А.Б., Иванова А.А. Современные подходы к математическому моделированию теплотехнических процессов в литейно-прокатных модулях на участке МНЛЗ – Нагревательное устройство // Бюл. НТИ «Черная металлургия». 2015. № 7. С. 50–55.
8. Ткаченко В.Н., Иванова А.А., Василян Г.Р. Идентификация параметров внешнего теплообмена в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск: Информатика и моделирование. 2007. № 39. С. 168–177.
9. Ткаченко В.Н., Иванова А.А., Шуба О.В. Методы и алгоритмы идентификации параметров внешнего теплообмена процессов теплопереноса // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2008. Т. 8. Вып. 1. С. 58–64.
10. Панферов В.И. Об одном решении задачи идентификации параметров моделей внешнего теплообмена металла в нагревательных печах // Известия вузов. Черная металлургия. 1988. № 1. С. 135–139.
11. Панферов, В.И. Идентификация математической модели нагрева металла в печах // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. № 9. С. 86–89.
12. Бирюков А.Б. Совершенствование теплотехнических параметров систем производства непрерывнолитой заготовки и ее тепловой обработки. Донецк: Ноулидж (Донецкое отделение), 2013. 472 с.
13. Растринин Л.А., Маджаров Н.Е. Введение в идентификацию объектов управления. М.: Энергия, 1977. 216 с.
14. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Советское радио, 1980. 232 с.

15. Вдовин К.Н., Горосткин С.В., Панферов В.И. Совершенствование работы зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 4. С. 50–54.
16. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 286 с.
17. Никитенко Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. Киев: Наукова думка, 1971. 267 с.
18. Маковский В.А., Лаврентик И.И. Алгоритмы управления нагревательными печами. М.: Металлургия, 1977. 183 с.
19. Журавлев В.А., Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1974. 216 с.
20. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 272 с.

References

1. Samoilovich Yu.A., Krulevitsky S.A., Goryainov V.A., Kabakov Z.K. *Teplovyie protsessy pri nepreryvnom lit'ye stali* [Thermal processes during continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgiya; 1982. 152 p. (In Russ.)
2. Lisienko V.G., Samoilovich Yu.A. *Teplotekhnicheskiye osnovy tekhnologii i konstruirovaniya mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok* [Thermal engineering fundamentals of technology and design of continuous casting machines]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk University Publ.; 1986. 121 p. (In Russ.)
3. Tsaplin A.I., Nikulin I.L. *Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov i ob"ektov v metallurgii: ucheb. posobie* [Modeling of thermal processes and objects in metallurgy: a tutorial]. Perm: Perm State Technical University Publ.; 2011. 299 p. (In Russ.)
4. Lukin S.V. *Teplotekhnicheskoe obosnovanie metodov kontrolya i upravleniya rezhimami okhlazhdeniya slitka na MNLZ: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Thermal engineering substantiation of methods for monitoring and controlling ingot cooling modes on a continuous casting machine. Abstract of cand. sci. diss.]. Cherepovets: Cherepovets State University; 1998. 24 p. (In Russ.)
5. Vdovin K.N., Panferov V.I., Gorostkin S.V. [Identification of a mathematical model of the process of cooling and solidification of continuously cast slab billets]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998;(8):58–60. (In Russ.)
6. Biryukov A.B., Ivanova A.A. [The Modern Approaches to the Efficient Management of the Heat Engineering Processes in the Zone of the Secondary Cooling at the Continuous Caster]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015;(3):46–52. (In Russ.)
7. Biryukov A.B., Ivanova A.A. [Modern approaches to mathematical modeling of thermal processes in casting and rolling modules at the continuous casting machine – Heating device section]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2015;(7):50–55. (In Russ.)
8. Tkachenko V.N., Ivanova A.A., Vasilyan G.R. [Identification of external heat exchange parameters in the secondary cooling zone of a continuous caster]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Kharkovskiy politekhnicheskiiy institut". Tematicheskiiy vypusk: Informatika i modelirovaniye = Bull. of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". Thematic issue: Computer science and modeling*. 2007;(39):168–177. (In Russ.)
9. Tkachenko V.N., Ivanova A.A., Shuba O.V. Methods and Algorithms of Identification of External Heat Exchange Parameters for Heat and Mass Transfer Processes. *Izvestiya of Saratov university. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2008;8(1):58–64. (In Russ.)
10. 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 vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1988;(1):135–139. (In Russ.)
11. Panferov V.I. [Identification of the mathematical model of metal heating in furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1990;(9):86–89. (In Russ.)
12. Biryukov A.B. *Sovershenstvovanie teplotekhnicheskikh parametrov sistem proizvodstva nepreryvnolitoi zagotovki i ee teplovoy obrabotki* [Improving the thermal parameters of continuous casting production systems and its heat treatment]. Donetsk: Knowledge (Donetsk branch); 2013. 472 p. (In Russ.)

13. Rastrigin L.A., Madzharov N.E. *Vvedenie v identifikatsiyu ob"ektov upravleniya* [Introduction to identifying control objects]. Moscow: Energiya; 1977. 216 p. (In Russ.)
14. Rastrigin L.A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi ob"ektami* [Modern principles of managing complex objects]. Moscow: Sovetskoe radio; 1980. 232 p. (In Russ.)
15. Vdovin K.N., Gorostkin S.V., Panferov V.I. [Improving the operation of the secondary cooling zone of a continuous casting machine]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998;(4):50–54. (In Russ.)
16. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. *Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena* [Numerical modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow: Nauka, 1984. 286 p. (In Russ.)
17. Nikitenko N.I. *Issledovanie nestatsionarnykh protsessov teplo- i massoobmena metodom setok* [Study of non-stationary processes of heat and mass transfer using the grid method]. Kyiv: Naukova Dumka; 1971. 267 p. (In Russ.)
18. Makovskiy V.A., Lavrentik I.I. *Algoritmy upravleniya nagrevatel'nymi pechami* [Algorithms for controlling heating furnaces]. Moscow: Metallurgiya; 1977. 183 p. (In Russ.)
19. Zhuravlev V.A., Kitaev E.M. *Teplofizika formirovaniya nepreryvnogo slitka* [Thermophysics of continuous ingot formation]. Moscow: Metallurgiya; 1974. 216 p. (In Russ.)
20. Niskovskikh V.M., Karlinskiy S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok* [Continuous casting machines for slabs]. Moscow: Metallurgiya; 1991. 272 p. (In Russ.)

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; panferovsv@susu.ru.

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; panferovsv@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 06.01.2024

The article was submitted 06.01.2024