

УДК. 621.1

Алексей Борисович Бирюков

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор, Россия, Донецк, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Юлия Олеговна Турулина

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», аспирант факультета металлургии и теплоэнергетики, Россия, Донецк, e-mail: turulinay@mail.ru

Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время определение температурного профиля печи, требуемого для обеспечения заданных параметров нагрева металла, производится с использованием метода термометрирования или математических моделей, как правило базирующихся на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Ранее широко использовался метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина, позволяющий при заданных условиях нагрева определить его продолжительность. На практике востребованной является разработка простого инженерного метода, который позволял бы с достаточной точностью определять температурное поле металла для заданных условий нагрева.

Материалы и методы. В основе разработки лежит метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина. Но при этом итоговое уравнение, описывающее тепловой баланс металла в пределах зоны печи, решается относительно энтальпии металла на выходе из зоны, а заданные условия нагрева (производительность, температура зоны) используются для определения величин, входящих в правую часть уравнения (время нагрева, средняя плотность теплового потока).

Результаты. Предложена методика, которая для проходных печей различного типа (толкательных и с механизированным подом) позволяет для заданных производительности и температурного профиля печи рассчитать изменение температурного состояния металла для всех зон нагрева, начиная от момента загрузки до выдачи металла. Адекватность предложенной методики проверена для двух типов печей. Для методических толкательных печей полученные результаты сопоставлены с результатами моделирования температурного состояния металла при помощи численного метода. Установлено, что расхождение результатов после прохождения инерционного периода нагрева не превышает 1 %. Для печи с шагающими балками сопоставлено расчетное значение температуры поверхности металла после печи с результатами оперативных измерений. Установлено расхождение менее 2 %.

Выводы. Совокупность полученных результатов обеспечивает достижение цели исследования. Предложенный метод, основанный на уравнении теплового баланса, позволяет считать его абсолютно корректным, является инженерным и достаточно простым в реализации. Метод рекомендуется использовать при проектировании печей и для расчетной корректировки температурного профиля печи силами технических отделов металлургических предприятий.

Ключевые слова: проходная печь, температурный профиль, оптимальный режим нагрева, математическая модель, инженерный метод

Aleksei Borisovich Birukov

Donetsk National Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Engineering Thermophysics Department, Vice Rector, Russia, Donetsk, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Julia Olegovna Turulina

Donetsk National Technical University, Postgraduate Student of Metallurgy and Thermal Power Engineering Department, Russia, Donetsk, e-mail: turulinay@mail.ru

Engineering method to determine metal temperature state when it is heated

Abstract

Background. Currently, the determination of the temperature profile of the furnace required to ensure the specified heating parameters of the metal is carried out using the temperature measurement method or mathematical models. They are most based on solution of the differential equation of non-stationary thermal conductivity. Previously, the thermal diagram method of I.D. Semikin was widely used. It allows us, under given heating conditions, to determine heating duration. In practice, it is important to develop a simple engineering method that would allow the temperature field of the metal to be determined with sufficient accuracy under given heating conditions.

Materials and methods. The development is based on the thermal diagram method of I.D. Semikina. But at the same time, the final equation describing the heat balance of the metal within the furnace zone is solved relative to the enthalpy of the metal at the exit from the zone. The specified heating conditions (productivity, zone temperature) are used to determine the quantities of the right-hand side of the equation (time heating, average heat flux density).

Results. The authors have proposed the method for continuous furnaces of various types (push-type and with a mechanized hearth) that allows us for a given productivity and temperature profile of the furnace to calculate the change in the temperature state of the metal for all heating zones, from the moment of loading to the release of metal. The adequacy of the proposed methodology has been tested for two types of furnaces. For methodical push-type furnaces, the results obtained have been compared to the results of modeling the temperature state of the metal using a numerical method. The discrepancy between the results after passing the inertial heating period does not exceed 1 %. For a walking-beam furnace the calculated value of the metal surface temperature after the furnace has been compared with the results of operational measurements. The discrepancy is less than 2 %.

Conclusions. The totality of the results obtained ensures the achievement of the research goal. The proposed method is based on the heat balance equation and allows us to consider it to be correct. It is an engineering method and quite simple to implement. The method is recommended to be used to design furnaces and to calculate the temperature profile of furnaces by engineering departments of metallurgical enterprises.

Key words: continuous furnace, temperature profile, optimal heating mode, mathematical model, engineering method

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.024-031

Введение. Для нагрева металла перед его дальнейшей прокаткой в основном применяются непрерывно работающие проходные печи, преимущественно методические. В зависимости от типа и производительности прокатного стана применяются печи с различным числом отапливаемых зон, с односторонним или двусторонним нагревом заготовок. Заготовки последовательно нагреваются в методической, сварочной и томильной зонах. Металл поступает в методическую зону (если таковая имеется), где постепенно нагревается поступающими из отапливаемых зон продуктами сгорания. В сварочных зонах происходит интенсивный нагрев заготовок и температура металла приближается к заданной. В томильной зоне достигается надлежащая равномерность нагрева заготовок. Для термически тонкого тела наличие томильной зоны необязательно.

При работе печи в условиях переменной производительности с точки зрения энергетической эффективности и снижения материальных затрат в прокатном производстве необходима отработка оптимальных режимов нагрева, при которых значительно снижаются потери с окальной, не возникают перерасход топлива, недогрев или перегрев заготовок, повышаются пластичность и однородность нагрева металла [1, 2].

При этом актуальной задачей является определение температуры металла в зависимости от производительности и температурного профиля печи.

Состояние вопроса. Вопросу оптимизации нагрева металла в проходных печах посвящено множество работ [3–5]. Все они рассматривают разные подходы, однако отмечается общая закономерность – перенос максимальной тепловой нагрузки на последние по ходу движения металла зоны

печи, что позволяет значительно снизить расход топлива. Следует отметить, что для каждого отдельного случая необходима обработка соответствующих режимов нагрева.

Определение режимных параметров проходных печей происходит с использованием метода термометрирования или путем построения математических моделей.

Метод термометрирования позволяет непосредственно измерять температурный профиль заготовки, проходящей через печь. Измерения осуществляются с помощью термопар, закрепленных внутри заготовки и передающих сигнал по термоизолированному кабелю. Также возможно применение многоканального регистратора данных, который устанавливается на заготовке в специальном теплоизолирующем контейнере. Все полученные данные анализируются на персональном компьютере.

Широкое распространение получили косвенные методы определения температурного состояния заготовок, основанные на замерах температуры поверхности с помощью пирометров [4, 5]. При использовании этих методов необходимо учитывать особенности лучистого теплообмена в системе «газ–кладка–металл».

На основании метода термометрирования возможно формирование технологических карт для нагрева заготовок в печах, прошедших реконструкцию или впервые вводимых в эксплуатацию, при смене сортамента или геометрических характеристик заготовок. При этом метод термометрирования не учитывает всех возможных сочетаний параметров из-за периодичности процессов измерений. В связи с этим наибольшее распространение для определения оптимальных режимов нагрева получило математическое моделирование процесса.

В зависимости от цели моделирования, могут применяться различные по полноте и сложности математические модели, позволяющие исследовать закономерности и характеристики процессов нагрева, а в ряде случаев использовать модель как элемент в системе управления.

Большое распространение получили модели, основанные на решении уравнения теплопроводности [6], позволяющие описать процесс нагрева в печи с учетом изменения теплофизических свойств металла и граничных условий. При этом тем-

пературный профиль печи и начальное состояние металла считаются известными.

В качестве расчетной методики ранее широко применялся метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина, получивший развитие в работе В.Л. Гусовского и А.Е. Лифшица [7], который позволяет при заданных условиях нагрева определить его продолжительность. Теплофизические и геометрические характеристики, а также температурное состояние металла в начале и конце нагрева считаются известными. задается распределение температуры греющей среды по длине печи и принимается расчетная схема нагрева.

В некоторых случаях при расчетных схемах нагрева задается продолжительность нагрева на расчетном участке, а затем соотношение этих величин проверяется.

В случае нагрева термически массивного тела продолжительность его пребывания в печи определяется с помощью тепловой диаграммы И.Д. Семикина или по формуле

$$\tau = \frac{\rho r_0 \cdot 10^3}{3600 \cdot K_1 \bar{q}} (i_k - i_n), \quad (1)$$

где τ – продолжительность нагрева металла, ч; r_0 – толщина прогреваемого слоя, м; ρ – плотность металла, кг/м³; K_1 – коэффициент материальной нагрузки; \bar{q} – средняя плотность теплового потока, Вт/м²; i_k – энтальпия металла в конце нагрева, кДж/кг; i_n – энтальпия металла в начале нагрева, кДж/кг.

При невыполнении технологических ограничений, накладываемых на процесс нагрева, корректируется значение температуры уходящих газов или меняются соотношения длин зон.

Данная расчетная методика используется при выполнении поверочных расчетов для существующих тепловых режимов проходной печи, при разработке новых более экономичных режимов, а также для проектирования технологических карт нагрева.

Расчетно-экспериментальные методы [8, 9] позволяют разработать технологию нагрева, позволяющую минимизировать расход топлива.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных вопросу оптимизации процесса нагрева, в настоящее время по-прежнему существует необходимость разработки простой и удобной методики определения температуры металла при его

нагреве, особенно при работе печи в условиях переменной производительности.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка методики определения температуры металла при заданных производительности, температурах газа в зонах печи и времени пребывания в них.

Методы исследования. В приведенных выше работах метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина используется для определения продолжительности нагрева металла в зоне при заданной температуре печи, в результате чего достигается заданная среднemasсовая температура металла и качество нагрева.

Предлагаемый нами новый метод позволяет при заданной температуре газа в зоне печи и продолжительности нагрева, соответствующей длине зоны и производительности печи, определить температурное состояние металла в конце зоны.

Алгоритм расчета сводится к следующему.

В соответствующей зоне печи по заданной производительности определяются скорость и продолжительность нагрева металла.

Скорость движения заготовки в толкательной методической печи определяется по формуле

$$v = \frac{P \cdot 10^3}{3600 \cdot d l_3 \rho}, \quad (2)$$

где v – скорость движения заготовок в печи или соответствующей зоне, м/с; P – производительность печи, т/ч; d – толщина заготовки, м; l_3 – длина заготовки, м.

Продолжительность нагрева заготовки составляет

$$\tau = \frac{L}{3600 \cdot v}, \quad (3)$$

где L – длина печи или соответствующей зоны, м.

Задается распределение температур печи по зонам.

Также задается температурное состояние металла на входе в зону печи, для которой ведется расчет. Если это первая от загрузки зона, то задаются температура поверхности и среднemasсовая температура, соответствующие температурному состоянию металла, поступающего в печь. Для последующих зон в качестве исходных данных задаются характерные температуры металла, полученные в результате расчета предыдущих зон.

Процесс определения температуры поверхности металла является итерационным и сводится к следующему.

Предварительно задается температура поверхности заготовки в конце рассматриваемой зоны печи. Для нее определяется плотность теплового потока, падающего на поверхность металла в конце зоны.

Средняя плотность теплового потока, поступающего на поверхность металла в пределах зоны, определяется по формуле

$$\bar{q} = \frac{q_i - q_{i+1}}{\ln q_i / q_{i+1}}, \text{ если } q_i / q_{i+1} \geq 2, \quad (4)$$

иначе

$$\bar{q} = \frac{q_i + q_{i+1}}{2}, \quad (5)$$

где q_i – плотность теплового потока в начале соответствующей зоны, Вт/м²; q_{i+1} – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м².

При наличии методической зоны средняя плотность теплового потока в ней определяется по формуле [4]

$$\bar{q} = \sqrt{q_0 \cdot q_1}, \quad (6)$$

где q_0 – плотность теплового потока в начале нагрева, Вт/м²; q_1 – плотность теплового потока в конце методической зоны печи, Вт/м².

Плотность теплового потока в начале и конце соответствующей зоны печи определяются по формулам:

$$q_i = C_{\text{гкм}} \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}^i}{100} \right)^4 \right]; \quad (7)$$

$$q_{i+1} = C_{\text{гкм}} \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}^{i+1}}{100} \right)^4 \right], \quad (8)$$

где $C_{\text{гкм}}$ – приведенный коэффициент излучения в системе «газ–кладка–металл», определяемый с учетом значений степеней черноты поверхности металла и продуктов сгорания и угловых коэффициентов в системе, Вт/(м²·К⁴); T_r – температура газа в соответствующей зоне печи, К; $T_{\text{пов}}^i$, $T_{\text{пов}}^{i+1}$ – температура поверхности металла в начале и конце зоны соответственно, К.

Приведенный коэффициент излучения определяется для каждой зоны по формуле

$$C_{\text{гкм}} = C_0 \varepsilon_M \frac{w + 1 - \varepsilon}{w + [\varepsilon_M + \varepsilon (1 - \varepsilon_M)] \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}}, \quad (9)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$); $\varepsilon_m, \varepsilon$ – степень черноты металла и дымовых газов для каждой из зон соответственно; w – степень развития кладки для соответствующей зоны печи.

Далее вычисляется среднемассовая энтальпия заготовки в конце зоны по формуле

$$i_k = \frac{\tau \cdot 3600 \cdot K_1 \bar{q}}{\rho r_0 \cdot 10^3} + i_n. \quad (10)$$

Путем интерполяции табличных данных по значению среднемассовой энтальпии определяется среднемассовая температура заготовки в конце соответствующей зоны нагрева.

Температура поверхности заготовки определяется по формуле

$$t_n = \bar{t} + \frac{qr_0}{K_2 \lambda} \frac{K_3 - 1}{K_3}, \quad (11)$$

где t_n – температура поверхности заготовки в конце зоны, °С; \bar{t} – среднемассовая температура заготовки в конце зоны, °С; q – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки при t_n , Вт/(м·К); K_2, K_3 – коэффициенты усреднения плотности теплового потока и температуры, определяемые в зависимости от величины критерия Био путем интерполяции табличных данных [10].

Если полученная по формуле (11) температура поверхности заготовки отличается от предварительно заданной, расчет повторяется, начиная с определения плотности теплового потока. При этом температура поверхности металла, полученная по формуле (11), принимается в качестве исходной величины.

Итерационный расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнута сходимость температуры поверхности заготовки в пределах заданной погрешности (до 1 %).

Выполняя аналогичным образом расчеты для последующих зон нагрева, получаем конечное температурное состояние металла.

Преимуществом предложенной методики является то, что с ее помощью можно рассчитывать температурное состояние металла как для толкательных печей, в которых условно считаем, что нагреваемый металл имеет форму плиты,

так и для печей с механизированным подом, в которых зазоры между заготовками и их влияние на параметры нагрева можно учесть с помощью коэффициента несимметричности [11, 12].

Проверка адекватности предложенной методики проведена для двух типов печей: для методических толкательных печей – путем сопоставления результатов, полученных по предложенной методике, с результатами моделирования температурного состояния металла в методической толкательной печи, полученными при помощи численного метода; для печи с шагающими балками – путем сопоставления расчетного значения температуры поверхности металла на выходе из печи с результатами оперативных измерений.

Для проведения численных экспериментов использована описанная ниже математическая модель. С помощью численного метода разностной аппроксимации в виде явной конечно-разностной схемы дана оценка адекватности рассчитанных режимных параметров.

Основное дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (12)$$

где t – температура металла, °С; a – коэффициент температуропроводности металла, м²/с.

После замены бесконечно малых величин на конечные разности получаем

$$\frac{t_i^{k+1} - t_i^k}{\Delta \tau} = a \frac{(t_{i+1}^k - t_i^k) - (t_i^k - t_{i-1}^k)}{\Delta x^2}, \quad (13)$$

где t_i^k, t_i^{k+1} – температура в i -й точке в момент времени k и в последующий момент времени $k+1$ соответственно, °С; t_{i+1}^k, t_{i-1}^k – температура в момент времени k в последующей $i+1$ -й точке и в предыдущей $i-1$ -й точке соответственно, °С; $\Delta \tau$ – шаг по времени, с; Δx – шаг по координате, м.

Геометрические условия для одномерной задачи представлены отрезком, концами которого являются середины противоположных граней, проходящим через центр поперечного сечения заготовки.

В качестве начальных условий принято, что в «нулевой» момент времени температуры всех точек на расчетном отрезке соответствуют температурному состоянию металла, поступающего в печь.

В качестве граничных условий на наружных поверхностях металла задаются граничные условия III рода:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha (t_r - t_n), \quad (14)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_r – температура газа, °С; t_n – температура поверхности заготовки, °С.

Для примера выполнен расчет нагрева прямоугольной заготовки 150×150 мм в пятizonной методической толкательной печи. Процесс описывается как одномерная задача для бесконечной пластины. Начальная температура металла 20 °С. Температуры по зонам: 1015 °С – для подогревательной зоны; 1185 °С и 1205 °С – для сварочных зон; 1215 °С и 1230 °С – для последних зон.

За основную расчетную формулу принимаем

$$t_i^{k+1} = t_i^k \left(1 - 2 \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} \right) + \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i+1}^k - t_{i-1}^k). \quad (15)$$

Температура на поверхностях заготовки при двустороннем нагреве определяется по формулам:

$$t_{n1} = \frac{1}{1 + \alpha \Delta x / \lambda} t_2 + \frac{\alpha t_r \Delta x / \lambda}{1 + \alpha \Delta x / \lambda}; \quad (16)$$

$$t_{n2} = \frac{\lambda / \Delta x}{\lambda / \Delta x + \alpha} t_{n-1} + \frac{\alpha t_r}{\lambda / \Delta x + \alpha}, \quad (17)$$

где t_{n1} , t_{n2} – температуры в узлах расчетной сетки на поверхностях заготовки, °С; t_2 , t_{n-1} – температуры в узлах расчетной сетки, со-

седних с соответствующими поверхностными узлами, °С.

Необходимым является условие устойчивости явной конечно-разностной схемы, которое проверяется по формуле

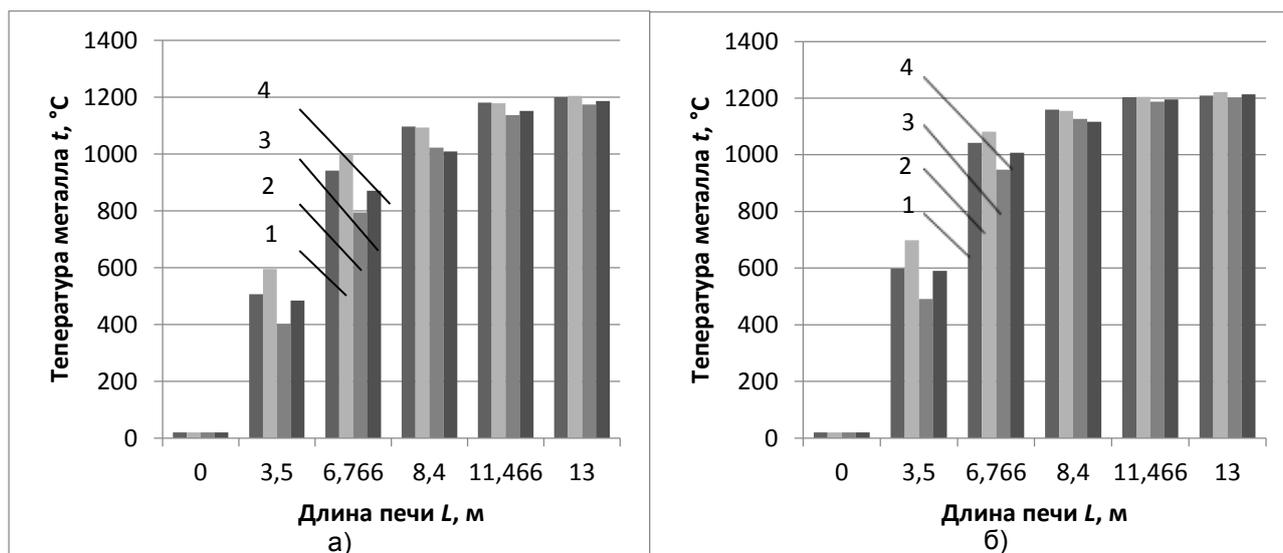
$$a \Delta \tau \leq 0,5 \Delta x^2. \quad (18)$$

Гистограммы на рисунке позволяют наглядно сравнить температуры металла по длине печи, полученные с помощью численного метода, и температуры, полученные с помощью предложенной методики, при различной производительности печи (120 и 90 т/ч).

Анализ гистограмм показывает, что для обеих производительностей во время инерционного периода наблюдается расхождение результатов не более 15 %. Далее по мере прогрева металла и до самой его выдачи из печи отличие результатов не превышает 1 %.

Также подтверждение адекватности предложенной методики получено при расчете нагрева металла в методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлаждающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода.

Печь имеет верхние и нижние подогревательные, нагревательные и томильные зоны с температурами газа: 1015 °С – в подогревательных зонах; 1210 °С и 1250 °С – в нагревательных зонах; 1200 °С и 1230 °С – в томильных зонах.



Температура поверхности и центра заготовки по длине печи для различных производительностей: а – 120 т/ч; б – 90 т/ч; 1 – температура поверхности металла, полученная с помощью предложенного метода; 2 – температура поверхности металла, полученная с помощью численного метода; 3 – температура центра металла, полученная с помощью предложенного метода; 4 – температура центра металла, полученная с помощью численного метода

Согласно инструкции по нагреву, заготовки, выдаваемые из печи, должны быть равномерно нагреты до заданной температуры 1100–1180 °С.

Расчет выполнялся для заготовок размером 150×150 мм в печи длиной 13 м производительностью 127 т/ч.

В результате получена температура поверхности металла на выходе из печи 1125 °С, что входит в требуемый диапазон.

В результате прямого измерения температуры поверхности заготовки, выдаваемой из печи, при помощи штатного пирометра получено значение 1121 ± 11 °С

Таким образом, расхождение между расчетным значением температуры и значением температуры, полученным по результатам оперативных измерений, не превышает 2 %.

Выводы. Анализ литературных источников показал, что, несмотря на большое количество работ по усовершенствованию процесса нагрева металла в проходных печах, имеются резервы по сокращению энергозатрат и улучшению качества нагрева. Важная роль при этом отводится совершенствованию методов расчетного определения температурного состояния металла в зависимости от параметров нагрева.

Предложенный новый способ использования тепловой диаграммы И.Д. Семикина позволяет определить температуру металла по зонам и в конце нагрева. Данный метод базируется на уравнении теплового баланса, что позволяет считать его абсолютно корректным, является инженерным и достаточно простым в реализации.

К недостаткам методики можно отнести то обстоятельство, что для получения результатов необходимо усреднение тепловых потоков и теплофизических характеристик металла.

Метод рекомендуется использовать при проектировании печей и для расчетной корректировки температурного профиля печи силами технических отделов металлургических предприятий.

С помощью численного метода подтверждена правомерность использования методики определения температуры металла. Корректировка существующих режимов с использованием предложенной методики позволяет повысить качество нагрева металла при переменной производительности печи.

При адаптации расчетного метода к условиям реального производства на Макеевском металлургическом заводе подтверждена сходимость рассчитанной температуры металла с фактическими показателями с достаточной степенью точности (погрешность не более 2 %).

Список литературы

1. **Основные** методы оптимизации режимов нагрева металла / С.М. Козлов, В.И. Тимошпольский, В.Б. Ковалевский и др. // Литье и металлургия. – 2000. – № 3. – С. 68–71.
2. **Парсункин Б.Н., Бушманова М.В., Андреев С.М.** Энергосберегающий режим нагрева металла в нагревательных печах // Автоматизированный печной агрегат – основа энергосберегающих технологий XXI века: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МИСиС, 2000. – С. 243–244.
3. **Панферов В.И.** Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 71–80.
4. **Панферов В.И.** О расчетно-инструментальном контроле качества нагрева и термообработки металла в печах // Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 56–66.
5. **Вырк А.Х.** Управление нагревом заготовок в методической печи // Бюлл. ЦНИИЧМ. – 1970. – № 24. – С. 3–9.
6. **Ткаченко В.Н.** Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Т. 13. – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
7. **Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е.** Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
8. **Андреев С.М., Парсункин Б.Н.** Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – № 6. – С. 134–143.
9. **Курносов В.В., Левицкий И.А.** Математическое моделирование нагрева заготовок с переменными теплофизическими характеристиками и теплового режима, соответствующего заданному графику нагрева // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2015. – Т. 55, № 7. – С. 19–22.
10. **Казанцев Е.И.** Промышленные печи. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. **Бирюков А.Б., Турулина Ю.О.** Совершенствование расчетного метода определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом,

работающей в условиях переменной производительности // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г: Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 52–56.

12. **Теплотехнические** расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. – М.: Металлургия, 1982. – 358 с.

References

1. Kozlov, S.M., Timoshpol'skiy, V.I., Kovalevskiy, V.B., Filippov, V.V., D'yachenko, Yu.V., Trusova, I.A. Osnovnye metody optimizatsii rezhimov nagreva metalla [Basic methods for optimizing metal heating modes]. *Lit'e i metallurgiya*, 2000, no. 3, pp. 68–71.

2. Parsunkin, B.N., Bushmanova, M.V., Andreev, S.M. Energoberegayushchiy rezhim nagreva metalla v nagrevatel'nykh pechakh [Energy-saving mode of heating metal in heating furnaces]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomatizirovanny pechnoy agregat – osnova energoberegayushchikh tekhnologiy XXI veka»* [Materials of an international scientific and practical conference “Automated furnace unit – the basis of energy-saving technologies of the 21st century”]. Moscow: MISiS, 2000, pp. 243–244.

3. Panferov, V.I. Ob ekonomichnom upravlenii nagrevom metalla v promyshlennykh pechakh [On economical control of metal heating in industrial furnaces]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 71–80.

4. Panferov, V.I. O raschetno-instrumental'nom kontrole kachestva nagreva i termoobrabotki metalla v pechakh [About calculation and instrumental control of the quality of heating and heat treatment of metal in furnaces]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 56–66.

5. Vyrk, A.Kh. Upravlenie nagrevom zagotovok v metodicheskoy pechi [Control of heating of workpieces in a methodical furnace]. *Byulleten' TsNIChM*, 1970, no. 24, pp. 3–9.

6. Tkachenko, V.N. *Matematicheskoe modelirovanie, identifikatsiya i upravlenie tekhnologicheskimi protsessami teplovo obrabotki materialov. T. 13* [Mathematical modeling, identification and control of technological processes of thermal processing of materials. Vol. 13]. Kiev: Naukova dumka, 2008. 244 p.

7. Gusovskiy, V.L., Lifshits, A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey* [Methods for calculating heating and thermal furnaces]. Moscow: Teplotekhnika, 2004. 400 p.

8. Andreev, S.M., Parsunkin, B.N. Eksperimental'noe issledovanie effektivnosti energoberegayushchikh optimal'nykh rezhimov nagreva metalla [Experimental study of the efficiency of energy-saving optimal metal heating modes]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*, 2014, no. 6, pp. 134–143.

9. Kurnosov, V.V., Levitskiy, I.A. Matematicheskoe modelirovanie nagreva zagotovok s peremennymi teplofizicheskimi kharakteristikami i teplovogo rezhima, sootvetstvuyushchego zadannomu grafiku nagreva [Mathematical modeling of heating of workpieces with variable thermophysical characteristics and thermal regime corresponding to a given heating schedule]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2015, vol. 55, no. 7, pp. 19–22.

10. Kazantsev, E.I. *Promyshlennyye pechi* [Industrial ovens]. Moscow: Metallurgiya, 1975. 368 p.

11. Biryukov, A.B., Turulina, Yu.O. Sovershenstvovanie raschetnogo metoda opredeleniya ratsional'nykh rezhimnykh parametrov prokhodnoy pechi s mekhanizirovannym podom, rabotayushchey v usloviyakh peremennoy proizvoditel'nosti [Improving the calculation method for determining rational operating parameters of a continuous furnace with a mechanized hearth operating under conditions of variable productivity] *Vestnik Donetskogo natsional'nogo universiteta. Seriya G: Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 3, pp. 52–56.

12. Zobnin, B.F., Kazyayev, M.D., Kitaev, B.I., Lisienko, V.G., Telegin, A.S., Yaroshenko, Yu.G. *Teploekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechey* [Thermal engineering calculations of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 358 p.