

# Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика Metallurgical heat and power engineering

Научная статья

УДК 65.011.56:621.785.1:621.783.223.4

DOI: 10.14529/met240207

## ОБ ЭКОНОМИЧНОМ УПРАВЛЕНИИ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА В ПРОТЯЖНЫХ ПЕЧАХ И АГРЕГАТАХ

**В.И. Панферов**<sup>✉</sup>, [tgsiv@mail.ru](mailto:tgsiv@mail.ru)

**С.В. Панферов**, [panferovsv@susu.ru](mailto:panferovsv@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация. Введение.** Рассматривается актуальная проблема оптимизации управления нагревом металла в протяжных печах и агрегатах. **Цель исследования:** разработать алгоритм расчета распределения температуры рабочего пространства по зонам, обеспечивающий реализацию принципа управления, экономичного по расходу топлива или электроэнергии на нагрев. **Материалы и методы.** Обсуждается ранее установленный принцип экономичного управления нагревом, подчеркивается его обоснованность, указаны его особенности. Существо принципа заключается в адаптации уровня температуры рабочего пространства в зонах к характеристикам нагреваемого металла и производительности печей. **Результаты.** Разработаны варианты алгоритма, применимые как для печей без зоны предварительного подогрева, так и для печей с наличием такой зоны. Получаемое при этом распределение температуры по зонам характеризуется тем, что область наиболее высоких температур смещается, насколько это возможно с точки зрения качества нагрева, к концу печи. Приводятся типичные графики оптимального распределения температуры по зонам и конкретный расчет режима для трехзонной горизонтальной протяжной печи (без зоны предварительного подогрева) для нагрева стальной проволоки. Указано, что с использованием соответствующих функциональных зависимостей процедура расчета применима и для протяжных термоагрегатов с электроконтактным нагревом проволоки. Отмечается экономическая эффективность принципа при промышленной эксплуатации соответствующих систем управления. Приведены рекомендации по решению задачи параметрической идентификации используемой в составе алгоритма модели нагрева. **Заключение.** Разработанный алгоритм может быть использован в составе алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления нагревом металла в протяжных печах и агрегатах.

**Ключевые слова:** экономичный нагрев, горизонтальные протяжные печи, установки электроконтактного нагрева проволоки, алгоритм расчета распределения температуры по зонам, регуляторы температуры, параметрическая идентификация модели нагрева

**Для цитирования:** Панферов В.И., Панферов С.В. Об экономичном управлении нагревом металла в протяжных печах и агрегатах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 2. С. 61–69. DOI: 10.14529/met240207

Original article

DOI: 10.14529/met240207

## ABOUT ECONOMICAL CONTROL OF METAL HEATING IN BROACHING FURNACES AND UNITS IS CONSIDERED

**V.I. Panferov**<sup>✉</sup>, [tgsiv@mail.ru](mailto:tgsiv@mail.ru)

**S.V. Panferov**, [panferovsv@susu.ru](mailto:panferovsv@susu.ru)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract. Introduction.** The current problem of optimizing the control of metal heating in broaching furnaces and units is considered. **Purpose of the study.** Develop an algorithm for calculating the temperature distribution of the working space by zones, ensuring the implementation of a control principle that is

© Панферов В.И., Панферов С.В., 2024

Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».  
2024. Т. 24, № 2. С. 61–69

economical in terms of fuel or electricity consumption for heating. **Materials and methods.** The previously established principle of economical heating control is discussed, its validity is emphasized, and its features are indicated. The essence of the principle is to adapt the temperature level of the working space in the zones to the characteristics of the heated metal and the productivity of the furnaces. **Results.** Variants of the algorithm have been developed that are applicable both for furnaces without a preheating zone and for furnaces with such a zone. The resulting temperature distribution across zones is characterized by the fact that the region of highest temperatures shifts, as far as possible from the point of view of heating quality, towards the end of the furnace. Typical graphs of the optimal temperature distribution by zone and a specific calculation of the mode for a three-zone horizontal broaching furnace (without a preheating zone) for heating steel wire are given. It is indicated that using the corresponding functional dependencies, the calculation procedure is also applicable for broaching thermal units with electric contact heating of the wire. The economic efficiency of the principle in the industrial operation of the corresponding control systems is noted. Recommendations are given for solving the problem of parametric identification of the heating model used as part of the algorithm. **Conclusion.** The developed algorithm can be used as part of the algorithmic support for automated control systems for heating metal in broaching furnaces and units.

**Keywords:** economical heating, horizontal broaching furnaces, installations of electric contact heating of wire, algorithm for calculating temperature distribution by zones, temperature controllers, parametric identification of the heating model

**For citation:** Panferov V.I., Panferov S.V. About economical control of metal heating in broaching furnaces and units is considered. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2024;24(2):61–69. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240207

### Введение

В работах [1, 2] приведено достаточно скрупулезное обоснование принципа экономичного управления нагревом металла в печах. Реализация принципа обеспечивает такое распределение температуры по зонам, при котором достигается заданное качество нагрева, но при этом область наиболее высоких температур рабочего пространства смещается, насколько это возможно, к концу печи. За счет этого обеспечивается минимизация расхода топлива или электроэнергии на нагрев.

Принцип экономичного управления, как это отмечено в работе [2], поддается достаточно простому физическому осмыслению и объяснению. В самом деле, если основной нагрев – накопление основного количества теплоты – будет происходить в первых по ходу металла зонах печи, то во всех последующих зонах необходимо будет поддерживать высокие температуры рабочего пространства, так как качество нагрева должно быть заданным и допустить остывание металла нельзя. Понятно, что при такой ситуации вырастут удельные потери теплоты через кладку печей, а в топливных печах степень утилизации теплоты продуктов сгорания в пределах самой печи при прочих равных условиях существенно уменьшится.

Разумеется, что здесь речь идет о тех случаях, когда заданное время нагрева существенно больше времени максимального быстрого действия. В задаче же максимального быстрого

действия, очевидно, нет никакой свободы в выборе характера распределения тепловой нагрузки по зонам печи, понятно, что все отапливаемые зоны должны быть максимально нагружены. Естественно, что при этом степень утилизации теплоты, содержащейся в продуктах сгорания, в пределах топливной печи будет заметно меньше, чем в тех случаях, когда нагружены только последние по ходу металла зоны. Поэтому если сравнивать по экономичности режимы нагрева между собой, то для проходных и протяжных топливных печей режим максимального быстрого действия может и не быть самым экономичным по расходу топлива.

### Постановка задачи

Реализация указанной в работах [1, 2] закономерности оптимального процесса означает, по существу, адаптацию уровня температуры рабочего пространства в зонах к характеристикам нагреваемого металла и производительности печи. Применим эту закономерность для расчета экономичного распределения температуры по зонам горизонтальных протяжных печей (топливных и электропечей сопротивления) и агрегатов, используемых в металлургической промышленности при термообработке проволоки и ленты. Дело в том, что сортамент нагреваемого металла и скорость его протяжки через такие печи и агрегаты изменяются сравнительно редко (в отличие от режима работы, например, методических пе-

чей для нагрева слябов), вследствие этого здесь имеются более благоприятные условия для реализации оптимального управления, для наиболее полного использования преимуществ экономичного режима нагрева. Можно сказать, что характер работы протяжных печей метизной отрасли является в достаточной мере идеальным по отношению к методическим печам. Кроме того, математическое описание процесса нагрева термически тонких изделий существенно проще, что также облегчает задачу разработки алгоритма управления.

### Разработка алгоритма расчета распределения температуры по зонам

Применяемые в метизной промышленности многозонные протяжные печи с косвенным обогревом металла (топливные печи и электрические печи сопротивления) [3, 4], как правило, оснащены локальными системами автоматического регулирования (САР) температуры рабочего пространства в зонах. При изменении режима работы печей локальные регуляторы автоматически вычисляют расход топлива или электрической энергии, требуемый для обеспечения заданного значения температуры рабочего пространства. Однако адаптация расхода топлива или электроэнергии к изменению режима работы печей, как показали исследования, является недостаточной. Для экономичного управления процессом нагрева необходимо ещё изменять и уровень самой температуры рабочего пространства в зонах печи, т. е. уставки локальных регуляторов температуры. Зачастую эта операция осуществляется обслуживающим персоналом вручную. Адаптация к изменяющимся условиям работы печей производится сравнительно редко и в очень ограниченном объёме. Обычно в зонах поддерживается избыточный уровень температуры рабочего пространства, обеспечивающий быстрый нагрев металла в первых зонах печей и, по существу, его выдержку в остальных зонах. Такой характер распределения температуры рабочего пространства по зонам гарантирует удовлетворительный нагрев металла в достаточно широком диапазоне изменения скоростей протяжки металла и его геометрических размеров. Вместе с тем внедрение современных систем управления температурным режимом на базе микропроцессорной техники позволяет дифференцированно управлять температурой ра-

бочего пространства в зонах в зависимости от производительности печей и характеристик нагреваемого металла. При этом если, например, использовать принцип экономичного управления, то может быть получена значительная экономия топлива или электроэнергии при обеспечении качественного нагрева металла. Так, как это указано в работе [5], за счет реализации принципа экономичного управления был получен существенный экономический эффект – снижение расхода электроэнергии на нагрев проволоки в протяжных горизонтальных электропечах сопротивления составило 20 %. Имеются и другие данные о существенной эффективности применения принципа [1, 2, 6–9].

Таким образом, внедрение в практику эксплуатации печей принципа экономичного управления представляется весьма разумным подходом. В связи с этим рассмотрим реализующий этот принцип алгоритм расчета распределения температуры по зонам протяжной печи. Алгоритм расчета заключается в следующем.

Известно [10–12], что динамику нагрева металлоизделий типа проволоки и ленты в зоне  $i$   $n$ -зонной протяжной печи можно описать следующей моделью:

$$\begin{cases} \frac{dt(L)}{dL} = \frac{1}{v \cdot T_i} [t_{3i} - t(L)], 0 < L \leq L_i; \\ t(0) = t_{hi}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t(L)$  – температура металла в точке  $L$  по длине зоны;  $L_i$  – длина зоны  $i$ ;  $v$  – скорость протяжки металла через печь;  $T_i$  – некоторая эквивалентная постоянная времени, определяемая при идентификации модели (1) для данной зоны и данного сортамента металла;  $t_{3i}$  – температура рабочего пространства в зоне  $i$ ;  $t_{hi}$  – температура металла в начале зоны  $i$ , понятно, что она равна температуре металла в конце зоны  $(i - 1)$ . Причем  $t_{3i}$  должна удовлетворять следующему неравенству:

$$t_{3i}^{\min} \leq t_{3i} \leq t_{3i}^{\max}, \quad (2)$$

где  $t_{3i}^{\min}$  и  $t_{3i}^{\max}$  – минимально и максимально допустимые температуры в зонах.

Используя решение дифференциального уравнения (1) при  $t_{3i} = \text{const}$ , нетрудно показать, что температура металла в начале зоны  $i - t_{hi}$ , температура металла в конце зоны  $i - t_{ki}$  и температура рабочего пространства в зоне  $i - t_{3i}$  связаны соотношением

$$t_{ki} = t_{3i} + (t_{hi} - t_{3i}) \cdot \exp\left(-\frac{L_i}{v \cdot T_i}\right). \quad (3)$$

Расчет распределения температуры по зонам  $n$ -зонной протяжной печи начинаем с зоны  $n$ , при этом считаем, исходя из принципа экономичного управления, что температура в последней зоне печи –  $n$  поддерживается на максимально допустимом уровне –  $t_{3n}^{\max}$ . Из технологической инструкции определяем требуемую температуру металла на выходе из печи –  $t_{kn}$ . Зная скорость протяжки металла –  $v$ , параметр  $T_n$  для последней зоны печи и данного сортамента нагреваемого металла, величины  $t_{3n}^{\max}$  и  $L_n$ , из (3) находим температуру, которую должен иметь металл на входе в зону  $n$  –  $t_{nn}$ , или что то же самое, температуру на выходе из зоны  $(n-1)$  –  $t_{k(n-1)}$ , так как  $t_{k(n-1)} = t_{nn}$ .

$$t_{nn} = \frac{t_{kn} - t_{3n} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{L_n}{v \cdot T_n}\right) \right]}{\exp\left(-\frac{L_n}{v \cdot T_n}\right)}. \quad (4)$$

Далее, сравниваем  $t_{k(n-1)} = t_{nn}$  с температурой, которую будет иметь металл на входе в зону  $n$  при условии, что во всех предыдущих зонах температура рабочего пространства будет поддерживаться на минимально

допустимом уровне –  $t_{3i}^{\min}, i = \overline{1, (n-1)}$ . Обозначим эту температуру как  $t_{nn}^{\min}$ .

Заметим, что расчет  $t_{3i}^{\min}, i = \overline{1, (n-1)}$  нужно выполнить только один раз – при расчете температурного режима зоны  $n$ , а далее следует использовать полученные данные при расчете температурного режима всех предыдущих зон. Это обстоятельство в целом сокращает объем вычислительной работы.

Если  $t_{nn}^{\min} > t_{nn}$ , то для нагрева металла до требуемой по технологической инструкции температуры температуры рабочего пространства в зоне  $n$  следует снизить. Необходимая температура в зоне, очевидно, будет определяться из соотношения

$$t_{3n} = \frac{t_{kn} - t_{nn}^{\min} \cdot \exp\left(-\frac{L_n}{v \cdot T_n}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{L_n}{v \cdot T_n}\right)}. \quad (5)$$

Расчет температурного режима печи в данном случае будет закончен – в последней зоне локальными регуляторами должна поддерживаться температура, определяемая по уравнению (5), а во всех предыдущих – на минимально допустимом уровне.

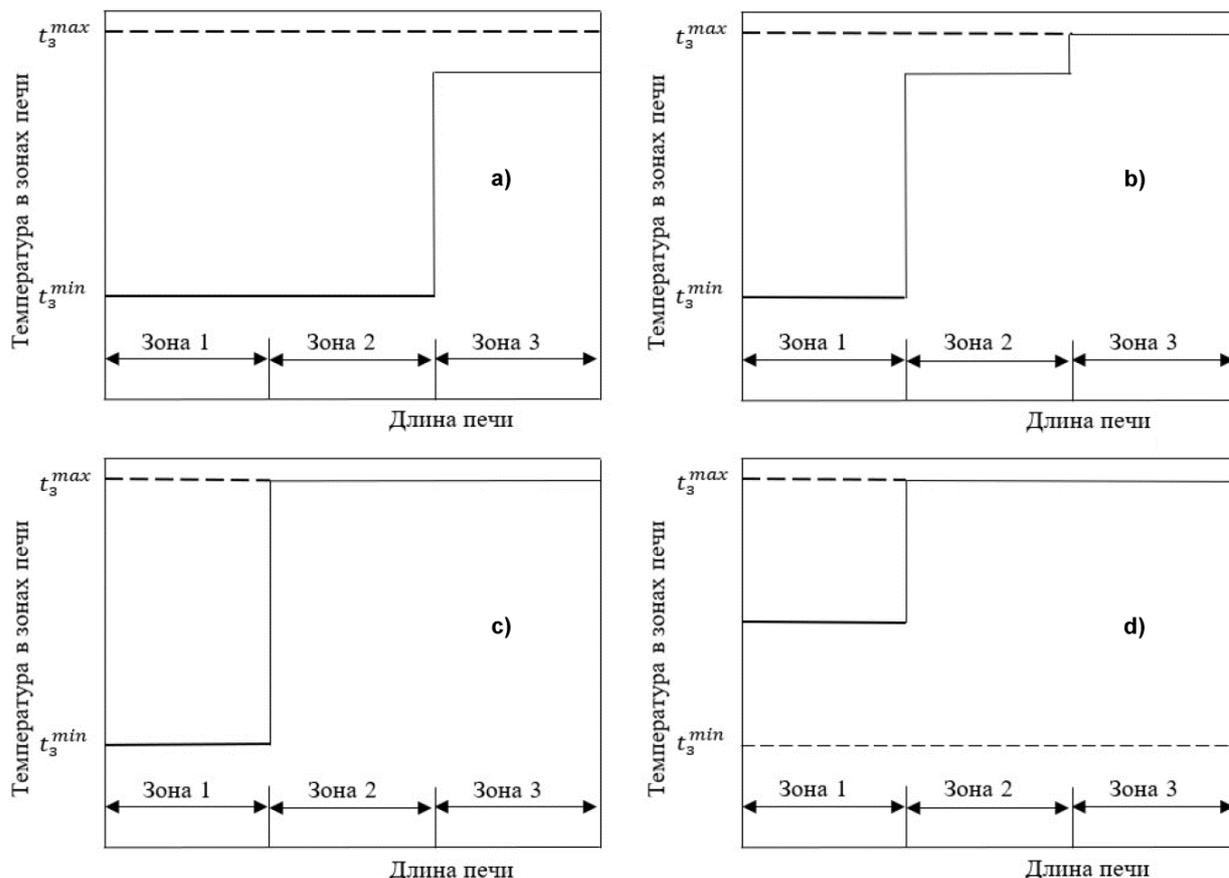


Рис. 1. Графики распределения температуры рабочего пространства по зонам трехзонной протяжной печи  
Fig. 1. Graphs of temperature distribution of the working space by zones of a three-zone broaching furnace

Если же  $t_{нн}^{\min} = t_{нн}$ , то в последней зоне должна поддерживаться максимально допустимая температура рабочего пространства, а во всех предыдущих – на минимально допустимом уровне.

При  $t_{нн}^{\min} < t_{нн}$  считаем, что в зоне температуру нужно поддерживать на уровне  $t_{3n}^{\max}$  и переходим к расчету температурного режима в зоне  $(n - 1)$ , алгоритм расчета аналогичен расчету температурного режима зоны  $n$ .

На рис. 1 приведены получаемые по изложенному алгоритму графики распределения температуры рабочего пространства по зонам трехзонной протяжной печи для нагрева проволоки перед горячим оцинкованием. При этом следует иметь в виду, что в направлении от рис. 1а к рис. 1д производительность печи возрастает. Кроме того, здесь полагается, что минимально и максимально допустимые температуры одинаковы для всех зон.

Как это видно из рис. 1, при таком управлении печами отчетливо прослеживается реализация принципа экономичного управления – интенсифицировать нагрев только в последних по ходу металла зонах печи.

Для примера приведем результаты расчета экономичного распределения температуры рабочего пространства по зонам трехзонной печи длиной 26 м. В печи обрабатывается стальная проволока диаметром 2,4 мм, скорость протяжки при этом составляет 24 м/мин. Для данной печи  $t_{3i}^{\min} = 300$  °С,  $i = \overline{1,3}$ ;  $t_{3i}^{\max} = 1100$  °С,  $i = \overline{1,3}$ ;  $T_1 = 17$  с;  $T_2 = 20$  с;  $T_3 = 20$  с. Кроме того, температура металла на входе в печь составляет  $t_{н1} = 20$  °С, его конечная температура должна быть равна  $t_{к3} = 950$  °С. В результате расчета установлено, что в соответствии с принципом экономичного управления температура рабочего пространства в первой зоне должна быть равна  $t_{31} = t_{31}^{\min} = 300$  °С; во второй зоне –  $t_{32} = 1009$  °С, а в третьей –  $t_{33} = t_{33}^{\max} = 1100$  °С. При этом температура проволоки в конце первой зоны будет равна  $t_{к1} = 221,7$  °С, а в конце второй зоны –  $t_{к2} = 743,2$  °С.

При расчете конкретного режима нагрева может оказаться так, что при максимально допустимых температурах во всех зонах печи не обеспечивается нагрев металла до требуемой по технологии температуры, в этом случае в системе управления необходимо предусмотреть выдачу сообщения о необходимости уменьшения скорости протяжки металла через печь.

Заметим также, что если по требованиям технологии в некоторых зонах печей необходима выдержка металла при определенной температуре рабочего пространства, то при расчете распределения температуры величины  $t_{3i}^{\min}$  и  $t_{3i}^{\max}$  для данных зон следует положить равными температуре выдержки металла.

### Вариант алгоритма для топливных печей с зоной предварительного подогрева

Необходимо заметить, что описанный алгоритм применим для горизонтальных электропечей сопротивления и топливных печей без зоны предварительного подогрева. Если у топливных печей такая зона имеется, то расчет требует следующей корректировки.

Предполагается, что температура рабочего пространства по длине зоны предварительного подогрева равномерно растет от некоторой температуры  $t_c$  до температуры второй зоны  $t_{32}$ , стабилизируемой собственным локальным автоматическим регулятором. В этом случае зависимость температуры рабочего пространства от длины вдоль этой зоны будет представляться следующим уравнением:

$$t_{31}(L) = t_c + \frac{t_{32} - t_c}{L_1} \cdot L, 0 \leq L \leq L_1. \quad (6)$$

Как видно из соотношения (6), распределение температуры по длине зоны предварительного подогрева 1 однозначно определяется температурой зоны 2. Поэтому расчет температурного режима первой зоны – зоны предварительного подогрева – и второй зоны необходимо проводить совместно – в едином блоке, когда отыскивается или задается только температура металла на входе зоны предварительного подогрева и его температура на выходе из второй зоны, а также только температура рабочего пространства второй зоны.

Решая уравнение (1) для случая, когда температура рабочего пространства в пределах зоны предварительного подогрева изменяется по соотношению (6), найдем, что температура в конце этой зоны может быть вычислена по следующей формуле:

$$t(L_1) = t_{32} + (t_{н1} - t_c) \cdot \exp\left(-\frac{L_1}{vT_1}\right) - vT_1 \frac{t_{32} - t_c}{L_1} \cdot [1 - \exp\left(-\frac{L_1}{vT_1}\right)]. \quad (7)$$

Поэтому температура металла в конце зоны 2 будет определяться по уравнению

$$t_{к2} = t_{32} + \left\{ (t_{н1} - t_c) \exp\left(-\frac{L_1}{vT_1}\right) - vT_1 \frac{t_{32} - t_c}{L_1} [1 - \exp\left(-\frac{L_1}{vT_1}\right)] \right\} \exp\left(-\frac{L_2}{vT_2}\right). \quad (8)$$

Данное соотношение используется как при определении  $t_{н3}^{\min}$  – температуры металла на входе зоны 3 при поддержании температуры рабочего пространства зоны 2 на минимально допустимом уровне –  $t_{32}^{\min}$ , так и при вычислении необходимой температуры рабочего пространства в зоне 2, обеспечивающей необходимое значение температуры металла на входе в зону 3 –  $t_{н3}$ . Необходимое для этого соотношение имеет вид:

$$t_{32} = \frac{t_{н3} - (t_{н1} - t_c) \exp\left[-\frac{1}{v} \left(\frac{L_1}{T_1} + \frac{L_2}{T_2}\right)\right] - vt_c \frac{T_1}{L_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{L_1}{vT_1}\right)\right] \exp\left(-\frac{L_2}{vT_2}\right)}{1 - v \frac{T_1}{L_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{L_1}{vT_1}\right)\right] \exp\left(-\frac{L_2}{vT_2}\right)} \quad (9)$$

При решении данной задачи можно применить подход работы [2] – вместо задания температуры  $t_c$  считать, что температура рабочего пространства в зоне предварительного подогрева линейно увеличивается по ее длине с коэффициентом  $k$  до температуры во второй зоне печи. В этом случае температура рабочего пространства по длине этой зоны будет вычисляться по формуле

$$t_{31}(L) = t_{32} - k(L_1 - L), 0 \leq L \leq L_1. \quad (10)$$

### Реализация на агрегатах с ЭКН

Применяемые на АО «БМК» (Белорецкий металлургический комбинат) протяжные агрегаты с электроконтактным нагревом проволоки (ЭКН) представляют собой, по существу, протяжные печи-агрегаты, алгоритм расчета управляющего воздействия для которых является частным случаем вышеизложенного алгоритма – в любом случае нужна адаптация режима работы как к производительности агрегата, так и к сортаменту нагреваемого металла. Здесь только следует иметь в виду, что вид функциональной зависимости типа (1) несколько иной [13–15] и управляющим воздействием является не температура зоны, а действующее значение напряжения на данном участке нагрева.

Систему управления протяжными термоагрегатами с ЭКН на АО «БМК» реализовали на базе микропроцессорного контроллера Ремиконт [9, 15]. При этом весь сортамент термообрабатываемой на данных агрегатах проволоки разбивали на группы, для вычисления действующего значения напряжения, необходимого для нагрева проволоки данной группы до требуемой температуры, использовали алгоблоки с алгоритмами кусочно-линейной аппроксимации. Алгоблоки других групп при работе на данном сортаменте находятся в отключенном состоянии.

Система управления осуществляет автоматическую адаптацию управляющего воздействия – напряжения нагрева к скорости протяжки проволоки через агрегат, адаптация к характеристикам нагреваемого металла осуществлялась обслуживающим персоналом вручную путем выбора соответствующего положения переключателя сортамента проволоки.

Промышленная эксплуатация системы показала, что существенно повысилась точность нагрева, что привело к улучшению сортности проволоки, увеличилась производительность агрегатов, а расход электроэнергии снизился. При этом также нужно иметь в виду, что повышение точности нагрева приводит, в конечном счете, и к уменьшению удельного расхода топлива или электроэнергии на нагрев [16].

### Некоторые замечания к решению задачи параметрической идентификации модели

Постоянные времена  $T_i, i = \overline{1, n}$  следует определять посредством решения задачи параметрической идентификации модели (1) по экспериментальным данным. Процедуры решения таких задач достаточно хорошо известны [17]. Здесь разумно рекомендовать подход работы [18] и использовать для решения задачи результаты измерения температуры металла на выходе из  $n$ -зонной протяжной печи. Обусловлено это тем, что измерение температуры движущегося металла в протяжных печах либо практически невозможно (например, в муфельных печах), либо не целесообразно из-за сложности реализации, существенного влияния на результат ряда факторов, как то печной атмосферы, меняющей свое значение степени черноты металла, фонового излучения кладки и т. п. В качестве критерия идентификации предпочтительнее брать модульный критерий

$$J(T_1, T_2, \dots, T_n) = \sum_{m=1}^s |t_{kn,m}^{\text{э}} - t_{kn,m}^{\text{р}}|, \quad (11)$$

где  $t_{kn,m}^{\text{э}}$  и  $t_{kn,m}^{\text{р}}$  – экспериментальное и расчетное значение температуры проволоки на выходе  $n$ -зонной протяжной печи;  $m$  – номер эксперимента. При этом, как это нетрудно видеть,

расчетное значение температуры следует вычислять, например, для четырехзонной печи (без зоны предварительного подогрева) по соотношению

$$t_{к4}^p = t_{34}^3 + \left\{ t_{33}^3 + \left\{ t_{32}^3 + \left[ t_{31}^3 + (t_{н1} - t_{31}^3) \cdot \exp\left(-\frac{L_1}{v \cdot T_1}\right) - t_{32}^3 \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp\left(-\frac{L_2}{v \cdot T_2}\right) - t_{33}^3 \right\} \cdot \exp\left(-\frac{L_3}{v \cdot T_3}\right) \right\} - t_{34}^3 \cdot \exp\left(-\frac{L_4}{v \cdot T_4}\right). \quad (12)$$

Здесь  $t_{3i}^3, i = \overline{1,4}$  – реальные значения температуры рабочего пространства в зонах печи при проведении эксперимента для идентификации.

Понятно, что в данном случае мы имеем дело с задачей нелинейного программирования – с задачей минимизации критерия (11) посредством выбора численных значений постоянных времени  $T_i, i = \overline{1,4}$ . Как показано в работе [18], эта задача вполне удовлетворительно решается методом конфигураций (Хука и Дживса).

### Выводы

Разработан алгоритм расчета распределения температуры по зонам протяжных печей и агрегатов. Алгоритм реализует принцип экономичного управления нагревом металла в печах и обеспечивает адаптацию уровня температуры рабочего пространства в зонах к характеристикам нагреваемого металла и производительности печи. Варианты алгоритма применимы как для печей без зоны предварительного подогрева, так и для печей с наличием такой зоны. Указано, что с использованием соответствующих функциональных зависимостей алгоритм применим и для протяжных термоагрегатов с электроконтактным нагревом проволоки. Приведены рекомендации по решению задачи параметрической идентификации, используемой в составе алгоритма модели нагрева.

### Список литературы

1. Панферов, В.И. О принципе экономичного управления нагревом металла и его реализации в АСУ ТП методических печей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. № 10. С. 53–56.
2. Панферов, В.И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 2. С. 71–80. DOI: 10.14529/ctcr180207
3. Гельман Г.А. Автоматизация тепловых режимов протяжных печей. М.: Металлургия, 1975. 111 с.
4. Юдин Р.А., Виноградов А.В., Юдин И.Р. Протяжные печи открытого малоокислительного нагрева проволоки и алгоритм их расчета // Вестник Череповецкого государственного университета. 2008. № 3 (18). С. 72–76.
5. Улучшение технико-экономических показателей тепловой работы протяжных электропечей метизного производства / Ю.И. Усенко, В.И. Иванов, Ю.Н. Радченко и др. // Металлургия: сб. науч. тр. Запорож. гос. инженер. академии. 2008. Вып. 19. С. 1–6.
6. Автоматизированное управление тепловой нагрузкой методических нагревательных печей / Б.Н. Парсункин, В.И. Панферов, А.И. Леонтьев, В.А. Обрезков // Сталь. 1982. № 7. С. 88–89.
7. Андреев Ю.Н. Оптимальное проектирование тепловых агрегатов. М.: Машиностроение, 1983. 231 с.
8. Лисиенко В.Г., Волков В.В., Маликов Ю.К. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. М.: Металлургия, 1988. 231 с.
9. Панферов В.И., Безвуляк А.С., Кулаченков Г.П. Управление нагревом металла в протяжных печах и агрегатах // Сталь. 1991. № 3. С. 57–59.
10. Расчет процесса нагрева проволоки в печах патентирования / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, В.В. Филиппов и др. // Литье и металлургия. 2000. № 1. С. 51–52. DOI: 10.21122/1683-6065-2000-1-51-52
11. Филиппов В.В. Исследование температурно-тепловых режимов нагрева металла в печах сталепроволочных цехов РУП «БМЗ» // Литье и металлургия. 2001. № 1. С. 50–54. DOI: 10.21122/1683-6065-2001-1-50-54
12. Филиппов В.В., Филиппов И.В. Исследование температурно-тепловых режимов нагрева

металла в печи отжига предприятия «ПромметизРусь» // Современные тенденции технических наук: материалы IV Междунар. науч. конф. Казань: БуК, 2015. С. 40–47.

13. Гельфанд И.М., Сычева А.В. Электроконтактный нагрев при производстве проволоки. М.: Институт «Черметинформация», 1972. 28 с. (Серия 9. Метизное производство. Вып. 4)

14. Голомазов В.А., Кулеша В.А., Гельфанд И.М. Патентирование проволоки с применением электроконтактного нагрева // Сталь. 1981. № 2. С. 55–57.

15. Панферов В.И., Кулаченков Г.П., Портсман Ю.Н. Автоматизация протяжных термоагрегатов с ЭКН // Сталь. 1990. № 2. С. 75–77.

16. Мельниченко Е.Ф., Немзер Г.Г., Энно И.К. Пути экономии топлива в пламенных печах. М.: Машиностроение, 1989. 152 с.

17. Панферов В.И., Торчинский Е.М., Губайдулина Р.С. Решение задачи параметрической идентификации математической модели нагрева термически тонких метизов // Автоматическое управление металлургическими процессами: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1990. С. 84–88.

18. Панферов В.И. Идентификация математической модели нагрева слябов в методических печах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1994. № 8. С. 53–55.

### References

1. Panferov V.I. [On the principle of economical management of metal heating and its implementation in the process control system of continuous furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2007;(10):53–56.

2. 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

3. Gel'man G.A. *Avtomatizatsiya teplovykh rezhimov protyazhnykh pechey* [Automation of thermal regimes of broaching furnaces]. Moscow: Metallurgiya; 1975. 111 p. (In Russ.)

4. Yudin R.A., Vinogradov A.V., Yudin I.R. [Continuous furnaces for open low-oxidation heating of wire and their calculation algorithm]. *Cherepovets state university bulletin*. 2008;3(18):72–76. (In Russ.)

5. Usenko Yu.I., Ivanov V.I., Radchenko Yu.N., Sapov V.F., Chizhov S.E. [Improving the technical and economic indicators of thermal performance of broaching electric furnaces for hardware production]. *Metallurgiya: sbornik nauchnykh trudov Zaporozhskoy gosudarstvennoy inzhenernoy akademii* [Metallurgy: collection of scientific works of the Zaporozhye State Engineering Academy]. 2008;19:1–6. (In Russ.)

6. Parsunkin B.N., Panferov V.I., Leont'ev V.I., Obrezkov V.A. [Automated control of thermal load of continuous heating furnaces]. *Steel*. 1982;(7):88–89. (In Russ.)

7. Andreev Yu.N. *Optimal'noe proektirovanie teplovykh agregatov* [Optimal design of thermal units]. Moscow: Mashinostroenie; 1983. 231 p. (In Russ.)

8. Lisienko V.G., Volkov V.V., Malikov Yu.K. *Uluchshenie toplivoispol'zovaniya i upravlenie teploobmenom v metallurgicheskikh pechakh* [Improving fuel use and controlling heat exchange in metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya; 1988. 231 p. (In Russ.)

9. Panferov V.I., Bezvulyak A.S., Kulachenkov G.P. [Controlling the heating of metal in broaching furnaces and aggregates]. *Steel*. 1991;(3):57–59. (In Russ.)

10. Samoilovich Y.A., Timoshpolski V.I., Filippov V.V., Kozlov S.M., Khopova O.G. Calculation of the wire heating process in patenting furnaces. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*. 2000;(1):51–52. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2000-1-51-52

11. Filippov V.V. Investigation of temperature-and-thermal conditions of heating metal in furnaces of cable wire plants of BMZ. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*. 2001;(1):50–54. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2001-1-50-54

12. Filippov V.V., Filippov I.V. [Study of temperature and thermal regimes of metal heating in the annealing furnace of the PrommetizRus enterprise]. In: *Sovremennye tendentsii tekhnicheskikh nauk: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Modern trends in technical sciences: Materials of the IV International scientific conf.]. Kazan: Buk; 2015. P. 40–47. (In Russ.)

13. Gelfand I.M., Sycheva A.V. *Elektrokontaktnyy nagrev pri proizvodstve provoloki* [Electric contact heating in wire production]. Moscow: Chermetinformatsiya Institute; 1972. 28 p. (Ser. 9. Hardware production. Iss. 4)

14. Golomazov V.A., Kulesha V.A., Gelfand I.M. [Patenting of wire using electric contact heating]. *Steel*. 1981;(2):55–57. (In Russ.)
15. Panferov V.I., Kulachenkov G.P., Portsman Yu.N. [Automation of lingering thermal units with EKN]. *Steel*. 1990;(2):75–77. (In Russ.)
16. Melnichenko E.F., Nemzer G.G., Enno I.K. *Puti ekonomii topliva v plamennykh pechakh* [Ways to save fuel in combustion furnaces]. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 152 p. (In Russ.)
17. Panferov V.I., Torchinsky E.M., Gubaidulina R.S. [Solution of the problem of parametric identification of a mathematical model of heating thermally thin hardware]. In: *Avtomaticheskoe upravlenie metallurgicheskimi protsessami: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Automatic control of metallurgical processes: Interuniversity collection of scientific papers]. Magnitogorsk: Magnitogorsk Mining and Metallurgical Institute; 1990. P. 84–88. (In Russ.)
18. Panferov V.I. [Identification of a mathematical model for heating slabs in methodical furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1994;(8):53–55. (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 23.03.2024**

**The article was submitted 23.03.2024**