

# Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика

## Metallurgical heat and power engineering

Научная статья

УДК 669.046:65.011.56

DOI: 10.14529/met240406

### УПРАВЛЕНИЕ ОТЖИГОМ СТАЛЬНЫХ РУЛОНОВ В КОЛПАКОВЫХ ПЕЧАХ

**В.И. Панферов<sup>✉</sup>**, *tgsiv@mail.ru*

**С.В. Панферов**, *panferovsv@susu.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация. Введение.** Рассматривается актуальная проблема управления отжигом стальных рулона в колпаковых печах. **Цель исследования:** совершенствование существующих систем управления и конкретизация способа оценки температуры экстремальной (самой холодной) точки садки на этапе выдержки. **Материалы и методы.** Проведен анализ как литературных данных по рассматриваемой проблеме, так и реальной технологии термообработки стальных рулона в колпаковых печах. Обсуждается структура применяемых систем управления процессом отжига, выделяются предпочтительные варианты решений. **Результаты.** Для электропечей сопротивления с двумя зонными нагревателями (и, соответственно, с двумя зонными термопарами) и одной стендовой термопарой рекомендована система автоматического регулирования (САР) непрерывного типа. За счет этого повышается точность поддержания температур, исключаются частые теплосмены зон печи и не допускается перегрев зон колпака и садки. Указан достаточно простой способ увеличения производительности печей за счет применения автоматических систем программного управления. Для периода выдержки предложена аддитивная математическая модель температурного поля нижнего рулона, позволяющая повысить точность определения момента окончания процесса. Для настройки модели предлагается в процессе текущего отжига измерять температуру в трех различных по радиусу основания нижнего рулона точках. Рассмотрены вопросы создания современных интеллектуальных систем управления. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы при построении автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) колпаковых печей.

**Ключевые слова:** отжиг стальных рулона, колпаковые печи, автоматизированные системы управления, алгоритм контроля температуры, экстремальная точка садки, настройка модели процесса выдержки

**Для цитирования:** Панферов В.И., Панферов С.В. Управление отжигом стальных рулона в колпаковых печах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2024. Т. 24, № 4. С. 61–73. DOI: 10.14529/met240406

Original article

DOI: 10.14529/met240406

### CONTROL OF ANNEALING OF STEEL COILS IN BELL FURNACE

**V.I. Panferov<sup>✉</sup>**, *tgsiv@mail.ru*

**S.V. Panferov**, *panferovsv@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract. Introduction.** The current problem of controlling the annealing of steel coils in bell-type furnaces is considered. **Purpose of the study.** Improving existing control systems and specifying a method for assessing the temperature of the extreme (coldest) point of setting at the holding stage. **Materials and methods.** An analysis of both literature data on the problem under consideration and the actual technology of heat treatment of steel coils in bell-type furnaces was carried out. The structure of the applied annealing process control systems is discussed, and preferred solutions are highlighted. **Results.** For electric resistance furnaces with two zone heaters (and, accordingly, with two zone thermocouples) and one bench

thermocouple, a continuous type automatic control system (ACS) is recommended. Due to this, the accuracy of maintaining temperatures is increased, frequent thermal changes in furnace zones are eliminated, and overheating of the bell and cage zones is prevented. A fairly simple way to increase the productivity of furnaces through the use of automatic program control systems is indicated. For the holding period, an adaptive mathematical model of the temperature field of the lower roll is proposed, which makes it possible to increase the accuracy of determining the moment of the end of the process. To set up the model, it is proposed to measure the temperature at three different points along the radius of the bottom roll base during the current annealing. The issues of creating modern intelligent control systems are considered. **Conclusion.** The results of the work can be used in the construction of automated process control systems (APCS) for bell-type furnaces.

**Keywords:** annealing of steel coils, bell-type furnaces, automated control systems, temperature control algorithm, extreme charging point, setting up the holding process model

**For citation:** Panferov V.I., Panferov S.V. Control of annealing of steel coils in bell furnace. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2024;24(4):61–73. (In Russ.) DOI: 10.14529/met240406

## Введение

Системы автоматизации колпаковых печей, широко применяемых в металлургической отрасли для термообработки металла, характеризуются довольно продолжительной историей своего развития, однако есть еще много задач, требующих улучшения своего решения [1–8]. Поэтому проблема совершенствования таких систем является, безусловно, актуальной. Здесь к месту следует отметить, что даже относительно небольшой успех в решении задач контроля и управления процессом термообработки в силу достаточно больших масштабов производства приводит к существенной экономии топлива или электроэнергии, к повышению производительности и качества готовой продукции [1–8].

Как известно [5], системы управления температурным режимом колпаковых печей, определяющие в значительной мере эффективность функционирования печей и качество термической обработки металла, в своем развитии прошли несколько ступеней (этапов). Как правило, выделяются следующие основные ступени развития [9–11]:

- 1) ручное управление (в том числе дистанционное управление исполнительными механизмами);
- 2) применение обычных систем автоматического регулирования (САР) температуры, причем, как правило, двухпозиционных;
- 3) системы программного управления;
- 4) системы управления с обратной связью по температуре садки.

Дополнительно можно отметить адаптивную систему стабилизации температуры колпаковой термопары в период нагрева и стеновой термопары в период выдержки, внедренную в свое время на ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» [12–14].

## Системы ручного управления

Системы ручного управления обеспечивали требуемый нагрев металла в той мере, в какой это позволяли опыт и интуиция обслуживающего персонала. Адаптация к изменяющимся условиям работы печей осуществлялась редко и в очень ограниченном объеме [11]. Здесь использовалось дистанционное управление исполнительными механизмами и устройствами, при этом контролировалась степень открытия регулирующих органов на газопроводах топливных печей (по дистанционным указателям положения) или напряжение на нагревателях электрических печей сопротивления.

## Системы автоматического регулирования

Внедрение САР температуры следует считать шагом вперед по сравнению с системами ручного управления, так как регуляторы автоматически вычисляли расход топлива или электроэнергии, требуемый для обеспечения заданной температуры в представительной точке системы «печь – садка».

В настоящее время колпаковые печи в большинстве случаев оснащены САР двухпозиционного типа. Качество регулирования двухпозиционными САР следует признать достаточно низким, это отрицательно сказывается на качестве готовой продукции. Так, по данным работы [14] точность стабилизации температуры греющей среды двухпозиционными САР составляет на этапе нагрева  $\pm 25$  °C, а на этапе выдержки  $\pm 100$  °C, точность стабилизации температуры защитного газа  $\pm 8$  °C. Кроме того, автоколебательный режим работы применяемых САР снижает срок службы электрических нагревателей или исполнительных механизмов топливных пе-

чей, а также и огнеупорной кладки вследствие большого количества теплосмен. Поэтому целесообразны разработка и внедрение более эффективных САР. Именно по этой причине была разработана и внедрена адаптивная система [12–14], которая обеспечила точность стабилизации температуры греющей среды на уровне  $\pm 12$  °С на протяжении всего отжига, точность стабилизации температуры защитного газа при этом составила  $\pm 3$  °С.

Для колпаковых электропечей сопротивления с двумя зонными нагревателями может быть рекомендована САР непрерывного типа, предложенная в работах [15, 16]. Здесь необходимо решать задачу управления двумя нагревателями по сигналам от трех термопар: двух зонных колпаковых и одной стендовой [15, 16]. Точность поддержания температур при этом существенно повышается, исключаются частые теплосмены зон печи и не допускается перегрев зон колпака и садки.

Здесь следует иметь в виду следующее [16]. Если в двухзонных (многозонных) колпаковых печах регулируется только температура зон (термопары установлены в зонах печи), то наблюдается низкая точность регулирования температуры отжигаемого металла. Объясняется это тем, что между температурой зон и температурой металла не существует однозначной зависимости – температура металла (садки) помимо температуры зон зависит еще и от массы и габаритов садки, радиальной и аксиальной теплопроводности рулона и т. д.

Устройство [16] содержит ПИ-регуляторы (пропорционально-интегральные регуляторы) температуры отдельных зон печи и ПИ-регулятор температуры стендовой термопары (отжигаемого металла). В системе управления сравниваются выходные сигналы каждого из зонных регуляторов с выходом регулятора температуры металла и на соответствующий зонный нагреватель (его пропорциональный исполнительный элемент) пропускается только меньший из двух сигналов. Тем самым обеспечивается повышение точности поддержания нужной температуры металла и исключаются перегревы элементов печи.

В работе [6], к сожалению, регулируется только температура зон двухзонной колпаковой печи. Тем не менее все-таки можно утверждать, что разделение электрических нагревателей или газовых горелок печи на несколько зон положительно сказывается как на

точности поддержания температурного режима, так и на качестве готовой продукции, а также и продолжительности службы конструктивных элементов печей.

Недостатки систем управления первого и второго типов известны и практически те же, что и в случае нагревательных печей [17, 18]. Однако при этом в случае колпаковых печей, как правило, нет необходимости в согласовании их производительности с ритмом работы какого-либо другого технологического оборудования. Это существенно упрощает задачу управления печами.

### Автоматические системы программного управления отжигом

При оснащении колпаковых печей системами управления первого и второго типов реализация многоступенчатой технологии термообработки осуществляется вручную обслуживающим персоналом. Системы программного управления предназначены для автоматической реализации сложной многоступенчатой технологии термообработки и этим выгодно отличаются от систем первого и второго типов [6, 7]. При этом к месту следует заметить, что в случае применения развитых систем программного управления, реализованных на базе современных микропроцессорных средств, может быть получено значительное увеличение производительности без снижения качества термообработки металла. Дело в том, что анализ технологической документации на отжиг показал [15], что продолжительности периодов нагрева и выдержки, а также времени охлаждения металла на стенде заданы в виде ступенчатых функций массы садки, т. е. для любого значения массы садки, принадлежащего определенному интервалу, продолжительность периода термообработки будет одна и та же. Вместе с тем очевидно, что длительность этих стадий должна изменяться непрерывно при изменении массы садки. Ступенчатая аппроксимация этих зависимостей, используемая на практике, обусловлена физическими возможностями технологического персонала, реализацией многоступенчатой технологии отжига вручную. Автоматическая реализация технологического процесса позволит перейти к реализации продолжительности периодов нагрева, выдержки и охлаждения в виде непрерывных функций массы садки, что повышает производительность печей, например, для условий

ОАО «Магнитогорский калибровочный завод» (МКЗ) производительность в свое время была повышена до 6 %, по этой причине наблюдалось и снижение расхода электроэнергии на отжиг. Увеличение производительности объясняется тем, что при составлении технологических инструкций на отжиг без программных систем управления аппроксимация непрерывной зависимости производится «описанной» ступенчатой фигурой (функцией), «...задается с запасом в расчете на наиболее неблагоприятные условия протекания процесса» [19].

### Системы управления с обратной связью по температуре садки

Так же, как и в случае нагревательных печей, наиболее перспективными являются системы управления, реализующие принцип обратной связи по температуре садки [17, 18]. В противном случае отжиг ведут, практически не контролируя температурное поле садки, а о завершении периодов (стадий) термообработки судят по их временной длительности, причем необходимое время нагрева и выдержки металла определяют эмпирически в процессе отработки технологии и фиксируют его в технологической инструкции.

Недостатками такого способа управления являются либо низкое качество термообработки металла, либо неоправданно заниженная (с точки зрения обеспечения заданного качества термообработки) производительность печей, если реально необходимое время термообработки данной садки в данной печи отличается от заданного в технологической инструкции.

Отмеченные недостатки обусловлены тем, что с течением времени изменяются теплотехнические характеристики печей, а теплофизические свойства термообрабатываемых садок не являются постоянными, т. е. вследствие того, что в теплотехническом отношении каждая система «печь – садка» представляет собой сугубо индивидуальный объект. Поэтому время полного цикла термообработки и ее отдельных периодов, реально необходимые для достижения заданного качества термообработки металла, будут изменяться, эти величины будут либо больше, либо меньше значений, указанных в технологической инструкции.

Если время термообработки данной садки, реально необходимое для достижения за-

данного качества металла, будет больше установленной технологической инструкцией, то процесс закончится при повышенном перепаде температур в садке, а следовательно, при низком качестве отжига металла. В противном случае длительность цикла термообработки будет неоправданно большой и, как следствие, низка производительность печей.

Данные недостатки устраняются с помощью систем управления с обратной связью по температуре металла, определяемой по аддитивным математическим моделям, так как инструментальный контроль температуры возможен лишь в ограниченном числе точек, доставляет достаточно серьезные трудности и не всегда целесообразен. Так, например, в колпаковых печах ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) температура металла измеряется двумя термопарами: верхняя термопара закладывается за 5–6-й наружные витки верхнего рулона стопы, а рабочий спай нижней термопары прижимается к торцу нижнего рулона [20]. Температура продуктов сгорания между колпаком и муфелем контролируется с помощью зональной термопары. Следует отметить, что используются и другие точки контроля температурного режима печей [9, 21, 22].

Вполне понятно, что в системах управления с обратной связью по температуре отжигаемого металла предъявляются особые требования к математическим моделям процесса, к точности и надежности расчетов на их основе, в целом к алгоритмическому обеспечению систем. Как отмечено в [23], математические модели являются в настоящее время основным элементом «ноу-хау» при автоматизации.

К математическим моделям, являющимся ядром алгоритмического обеспечения систем управления с обратной связью по температуре металла, предъявляются следующие требования [17, 18]. Во-первых, математические модели должны обеспечить хорошую точность расчета температурного поля отжигаемых рулонов, так как от этого зависит величина эффекта от применения систем. Во-вторых, системы управления должны работать в реальном масштабе времени, т. е. длительность цикла расчетов в УВМ должна быть достаточно малой и должна удовлетворять требованиям к качеству процесса управления (быстро действие расчетов). В-третьих, математические модели должны быть «привязаны» к

штатным или разумным средствам измерения параметров процесса нагрева. Последнее относится как к средствам измерения, сигналы которых используются при расчете температурного поля металла, так и к средствам, необходимым для идентификации (настройки) моделей на реальный процесс.

Точность и быстродействие расчетов прямо связаны со структурой математической модели процесса нагрева, структура модели определяет также и необходимые средства измерения параметров процесса нагрева, поэтому выбор структуры модели является наиболее важным.

Обычно в контуре управления печами применяются упрощенные модели нагрева металла, которые не всегда полностью настраиваются на реальный процесс в течение текущего отжига [24–31]. Так, по данным работы [24] за рубежом есть примеры использования в контуре управления простой математической модели, связывающей температуру греющей среды с температурой экстремальной точки садки. Применяются также и простые экспоненциальные и регрессионные модели [24, 26, 32–34]. Модели, учитывающие в достаточной мере механизмы теплофизических явлений при отжиге, требующие выполнения большого объема вычислений, обычно не используются в контуре управления отжигом, такие модели применяются либо для настройки алгоритмов контроля и управления, осуществляющей вне контура управления, либо для разработки технологических инструкций.

Как правило, в процедурах адаптации моделей используются экспериментальные данные по термообработке предыдущих садок или же задача параметрической идентификации моделей решается по данным специально подготовленных экспериментальных отжигов [6, 24–31]. Поэтому целесообразна разработка способов идентификации моделей процесса термообработки, реализуемых полностью по информации, получаемой только в процессе текущего отжига. Здесь может быть рекомендован способ [5, 15, 17, 35], требующий измерения в процессе текущего отжига температуры металла в трех различных по радиусу точках основания нижнего рулона с помощью так называемых прижимных термопар. Такое расширение существующих систем контроля температурного режима колпаковых печей является достаточно приемлемым.

### Алгоритм температурного контроля в процессе выдержки

Как известно [17] в регулярном тепловом режиме температура любой точки тела произвольной формы удовлетворяет уравнению

$$t(M_i, \tau) = t_{\text{п}} + A \cdot U(M_i) \cdot \exp(-\mu \cdot \tau), \quad (1)$$

где  $t(M_i, \tau)$  – температура в точке  $M_i$  в момент времени  $\tau$ ,  $t_{\text{п}}$  – температура рабочего пространства печи, при которой осуществляется выдержка металла,  $U(M_i)$  – функция координат точки  $M_i$ ,  $A$  – постоянная, не зависящая ни от координат, ни от времени, она определяется из начального температурного поля перед выдержкой,  $\mu$  – некоторый постоянный коэффициент. Заметим также, что  $U(M_i)$  и  $\mu$  зависят от теплотехнических характеристик системы «греющая среда – металл», а величины  $A$  и  $\mu$  имеют одинаковое значение для любой точки тела [17].

Используя уравнение (1), с помощью несложных выкладок для произвольных точек  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  можно получить следующее соотношение:

$$\frac{t_{\text{п}} - t(M_1, \tau)}{t(M_2, \tau) - t(M_3, \tau)} = \frac{U(M_1)}{U(M_2) - U(M_3)}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что отношение разности температуры рабочего пространства и температуры некоторой точки  $M_1$  к разности температур каких-либо других точек  $M_2$  и  $M_3$  является постоянной во времени величиной, не зависящей также и от температурного поля тела в начале периода выдержки. Зависит это отношение, как это отмечено выше, от теплотехнических характеристик системы «греющая среда – металл» и от координат используемых точек. Поэтому, измерив одну из этих разностей, по соотношению (2) можно определить и другую.

В качестве точки  $M_1$  следует выбирать такую точку на поверхности, для которой наиболее просто измерить температуру. Координаты точек  $M_2$  и  $M_3$  при контроле наибольшего перепада должны соответствовать координатам точек с максимальной и минимальной температурами тела. При этом очень часто  $M_1 = M_2$ , т. е. наиболее просто измерить температуру точки, лежащей на поверхности, которая к тому же является и точкой с максимальной температурой. В этом случае формулу (2) можно переписать в виде:

$$\frac{t_n - t(M_1, \tau)}{t(M_1, \tau) - t(M_3, \tau)} = \frac{U(M_1)}{U(M_1) - U(M_3)}. \quad (3)$$

Интересующий нас максимальный перепад температуры по сечению  $\Delta t_{\max} = t(M_1, \tau) - t(M_3, \tau)$  будет равен

$$\Delta t_{\max} = \left(1 - \frac{U(M_3)}{U(M_1)}\right) \cdot [t_n - t(M_1, \tau)]. \quad (4)$$

К месту заметим, что данный метод контроля достаточно широко апробирован для случая нагрева слябов в методических печах стана «2500» ПАО ММК [17, 18].

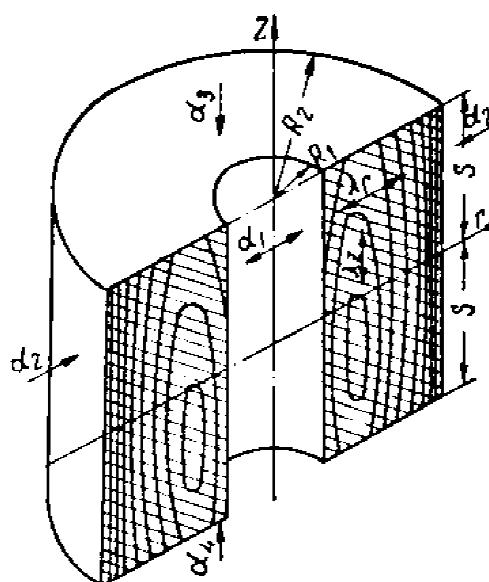
### Настройка алгоритма контроля

Понятно, что точка  $M_3$  (точка с самой низкой температурой металла) находится внутри нижнего рулона, поэтому в процессе обычного отжига измерить температуру в этой точке и напрямую оценить завершение этапа выдержки не представляется возможным (или целесообразным). Из-за этого необходимо по более удобным для измерения температуры точкам определить необходимое количество величин  $A \cdot U(M_i)$  и  $\mu$  и по ним вычислить те плохо определяемые расчетным путем параметры системы «греющая среда – металл», от которых зависит числовое значение  $U(M_3)$ .

Как это следует из [21], для случая отжига стальных рулона в колпаковых печах уравнение (1) будет иметь следующий конкретный вид:

$$t(r, z, \tau) = t_n + A \cdot \left[ J_0\left(\gamma \frac{r}{R_2}\right) + D \cdot Y_0\left(\gamma \frac{r}{R_2}\right) \right] \cos\left(\sigma \frac{z}{S}\right) \cdot \exp(-\mu \cdot \tau). \quad (5)$$

Расчетная схема рулона приведена на рисунке. Здесь  $\alpha_i, i = \overline{1, 4}$  – коэффициенты теплоотдачи,  $r$  и  $z$  – цилиндрические координаты точки, температура которой определяется,  $R_1$  и  $R_2$  – соответственно внутренний и внешний радиусы рулона,  $\lambda_r$  – коэффициент радиальной теплопроводности,  $2S$  – его высота, начало координат находится в центре рулона, нагрев по высоте рулона считается симметричным, т. е. полагается, что  $\alpha_3 = \alpha_4$ ,  $J_0$ ,  $Y_0$  – соответственно функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка от аргументов  $\left(\gamma \frac{r}{R_1}\right)$  и  $\left(\gamma \frac{r}{R_2}\right)$ .



Расчетная схема рулона  
Calculation scheme of the roll

В данном случае настраиваемыми параметрами являются  $A$ ,  $\gamma$ ,  $D$ ,  $\sigma$ , причем к месту следует пояснить, что параметр  $\mu$  является функцией  $\gamma$  и  $\sigma$ .

Такое количество настраиваемых параметров обуславливается тем, что трудноопределяемыми физическими параметрами являются коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, 4}$  и коэффициент радиальной теплопроводности  $\lambda_r$ , т. е. параметров пять. Однако из-за того, что достаточно обоснованно считается, что  $\alpha_3 = \alpha_4$ , определяемых параметров будет четыре. От этих коэффициентов и зависят собственно присутствующие в уравнении (5) параметры, которые подлежат идентификации.

Как известно, для определения 4 параметров нужно составить 4 уравнения. Поэтому при отжиге необходимо измерять температуру в трех различных точках, это дает необходимые 4 экспериментальных значения  $A \cdot U(M_1)$ ,  $A \cdot U(M_2)$ ,  $A \cdot U(M_3)$  и  $\mu$ . Все это и позволяет замкнуть 4 уравнения для определения  $A$ ,  $\gamma$ ,  $D$  и  $\sigma$ . Понятно, что для настройки нужно выбирать наиболее удобные для измерений точки, для колпаковых печей, как это нам представляется, это три различные по радиусу точки основания нижнего рулона. Температура в этих точках измеряется с помощью прижимных термопар. Конечно, возможны и другие варианты размещения термометров.

Заметим, что справедливость уравнения (1) (или, что то же самое (5)) – справедливость применения закономерностей регулярного теплового режима – подтверждена, в частности, и экспериментальными исследованиями работы [32]. Кроме того, хорошо известно, что «...особенность термообработки – наличие ярко выраженного периода выдержки» [19, с. 406], что «...продолжительность каждой ступени достаточно велика, и время  $\tau$  удовлетворяет условиям, разрешающим применять приближенные формулы для определения температур металла, печи и теплового потока в любой ступени нагрева» [19, с. 407]. Эти данные также подтверждают обоснованность применения формулы (1) (закономерности регулярного режима нагрева).

По данным работ [33, 34], самая холодная (экстремальная) точка садки не имеет фиксированных координат, в процессе отжига она перемещается в радиальном направлении, интервал для ее координаты по радиусу, например, согласно [33], таков:

$$R_1 + \frac{1}{3}(R_2 - R_1) \leq r_s \leq R_1 + \frac{1}{2}(R_2 - R_1), \quad (6)$$

где  $r_s$  – радиальная координата экстремальной точки. Поэтому при наличии такой особенности процесса модели и алгоритмы контроля температуры, разработанные в предположении постоянства координат самой холодной точки садки, вряд ли способны обеспечить достаточную точность. В данном же случае после настройки уравнения (5) можно с достаточной точностью вычислить температуру любой, в том числе и экстремальной точки рулона, для этого следует просто задать ее координаты, этим, вне всякого сомнения, предлагаемое решение задачи выгодно отличается от известных в литературе [24–29]. Заметим, что, данное решение было реализовано в свое время в работе [15] для колпаковых печей цеха ленты ОАО МКЗ.

В работе [24] указано, что на печах фирмы Armco Steel Corporation штатно измеряется как температура защитного газа, так и температура основания нижнего рулона. Здесь также на основании решения уравнения теплопроводности и проведенных экспериментов, в которых дополнительно измерялась и температура экстремальной точки (половина высоты нижнего рулона и одна треть толщины нижнего рулона от его внутренней поверхности), установили, что взаимосвязь температуры любой точки рулона, в том числе и экстремальной, с температурой защитного газа последней выдержки может быть представлена динамической экспоненциальной моделью (это, вообще-то, тоже является экспериментальным подтверждением допустимости использования закономерностей регулярного режима). При исследовании также выяснили, что между параметрами модели для температуры экстремальной точки и такими же параметрами модели для температуры основания нижнего рулона существует достаточно достоверная регрессионная связь. Поэтому, определяя в процессе текущей выдержки параметры модели для измеряемой температуры основания, по регрессионной модели находят соответствующие параметры для экстремальной точки и по ее модели вычисляют температуру самой экстремальной точки. Объясняется такое различие в особенностях решений задачи контроля следующим.

Если структуру математической модели выбирать на основе физики процесса, то, как это следует из уравнения (5), ее настраиваемые параметры одинаковы для всех точек рулона, учитывать нужно только различные координаты точек. Поэтому различные для различных точек значения параметров настройки в модели фирмы Armco Steel Corporation объясняются ничем иным, как тем, что при синтезе структуры модели физические параметры, являющиеся *const* при конкретном отжиге, объединили с координатами точек.

Отметим, что достаточно интересным является способ определения конца отжига рулона, предложенный в работе [36]. Здесь используется адаптивная модель изменения положения выходного вала исполнительного механизма, регулирующего расход топлива на отжиг. Утверждается, что изменение положения зависит от прогрессии садки. Процесс считается законченным, когда относительное изменение положения становится достаточно малым. Однако, на наш взгляд, числовое значение условия окончания процесса для различных садок все-таки должно быть разным, так как, как уже отмечалось выше, теплофизические свойства садок достаточно индивидуальны.

### Некоторые замечания по идентификации уравнения (1)

С целью упрощения решения задачи идентификации уравнение (1) следует записать в логарифмическом масштабе

$$\ln[t(M_i, \tau) - t_{\text{п}}] = \ln[A \cdot U(M_i)] - \mu\tau. \quad (7)$$

Далее критерий идентификации целесообразно выбрать в виде интеграла по времени от квадрата невязки между левой и правой частями данного уравнения, когда в это уравнение подставлены экспериментальные данные

$$I(A \cdot U(M_i), \mu) = \int_0^{\tau_k} \left[ \ln[t^3(M_i, \tau) - t_{\text{п}}^3] - \ln[A \cdot U(M_i)] + \mu\tau \right]^2 d\tau. \quad (8)$$

Здесь  $t^3(M_i, \tau)$  и  $t_{\text{п}}^3$  – измеренные значения температуры точки  $M_i$  и температуры рабочего пространства печи соответственно,  $\tau_k$  – длительность процесса идентификации.

Вычисляя производные от данного критерия по  $\partial \ln[A \cdot U(M_i)]$  и по  $\partial \mu$  и приравнивая их к нулю, найдем из полученной системы уравнений оптимальные значения параметров:

$$\mu = \frac{\tau_k / 2 \cdot \int_0^{\tau_k} \ln[t^3(M_i, \tau) - t_{\text{п}}^3] d\tau - \int_0^{\tau_k} \tau \cdot \ln[t^3(M_i, \tau) - t_{\text{п}}^3] d\tau}{\tau_k^3 / 12}, \quad (9)$$

$$\ln[A \cdot U(M_i)] = \frac{2}{\tau_k^2} \cdot \int_0^{\tau_k} \tau \cdot \ln[t^3(M_i, \tau) - t_{\text{п}}^3] d\tau + \frac{2}{3} \mu \tau_k. \quad (10)$$

Можно, конечно, решать задачу идентификации уравнения (5) и по измерениям температуры только в одной точке рулона подобно тому, как это делалось для многопараметрической модели методической печи только по экспериментальной температуре слябов на ее выходе [17, 18]. Однако при измерениях в одной точке нет никакой вариабельности режимов термообработки – текущий режим отжига такой, какой он есть. Вариабельность экспериментальных режимов нагрева, как показал опыт решения подобной задачи для методических печей [17, 18], весьма существенна, практически невозможно настроить модель по результатам нагрева одиночного сляба или группы слябов с одними и теми же количественными данными процесса в печи [37]. Могут быть получены весьма неправдоподобные сочетания числовых значений настраиваемых параметров, дающие одинаково приемлемые значения критерия идентификации. При этом также следует учесть, что все необходимые процедуры – и настройку модели, и контроль с ее помощью температуры экстремальной точки – нужно достаточно оперативно решать во время текущего отжига. Несомненно, что при измерениях в одной точке длительность собственно этапа настройки будет больше, чем в случае трех точек, к тому же эта длительность может оказаться недопустимо большой, и вследствие этого реализация этапа контроля может оказаться совершенно бесполезной из-за завершения собственно всего процесса термообработки.

В целом необходимо подчеркнуть, что решение задачи как структурной, так и параметрической идентификации моделей термических печей требует своего дальнейшего развития, по существу, с точки зрения создания АСУ ТП проблемы алгоритмизации контроля и управления являются, к сожалению, малоразработанными. При этом, несмотря на возросшую производительность современных компьютеров, требование простоты математического описания, обеспечивающего удовлетворительную точность, является по-прежнему актуальным [9, 17, 22]. Поэтому целесообразны дальнейшие разработки в данном направлении, в частности, оправдано применение достаточно простых алгоритмов контроля температурных полей отжигаемых рулонон, основанных, в частности, на закономерностях регулярного теплового режима.

При решении задач параметрической идентификации моделей применяются различные критерии и алгоритмы обработки исходной информации, при этом состояние проблемы таково, что требуется разработка достаточно простых, помехоустойчивых и быстродействующих алгоритмов идентификации. Следует также отметить, что при решении задач настройки моделей «на реальный процесс», не удается создать подсистему идентификации, работающую полностью в автоматическом режиме, по-видимому, разумно ограничиться решением части задач на уровне человеко-машинных процедур, включающих, например, проведение периодических спе-

циально подготовленных измерений температуры металла в печи наиболее достоверными контактными методами [38].

В целом использование вышеотмеченных результатов позволит создать алгоритмическую основу для построения высокоэффективных систем управления температурным режимом колпаковых печей. По многочисленным оценкам это ведет к снижению расхода топлива или электроэнергии на 10–15 %, увеличению их производительности на 6–10 % и существенному повышению качества термообработки металла [9, 13, 22, 24], так, например, только внедрение системы [13] привело к увеличению выпуска металла высших категорий качества более чем на 25 %.

### Выводы

Проведен анализ истории развития систем управления температурным режимом колпаковых печей. Для электропечей сопротивления с двумя зонными нагревателями и стендовой термопарой предложена САР непрерывного типа. Указан достаточно простой способ увеличения производительности печей за счет использования автоматических систем программного управления. Предложен вариант создания адаптивной математической модели для периода выдержки рулонон, позволяющей повысить точность определения момента окончания процесса. Рассмотрены вопросы создания современных интеллектуальных систем управления. Результаты работы могут быть использованы при построении АСУ ТП колпаковых печей.

### Список литературы

1. Вендт П., Шевырев Д.А. Современные энергосберегающие технологии в области колпаковых печей // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло. М.: НИТУ «МИСИС», 2014. С. 183–192.
2. Шайдурова Т.А., Казяев М.Д. Конструкция и тепловая работа колпаковых печей для термической обработки рулонон холоднокатанной стали // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. IX Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2021) с междунар. участием. Екатеринбург: УрФУ, 2021. С. 159–167.
3. Калимулина, С.И. Совершенствование тепловой работы электрических одностопных колпаковых печей с целью повышения производительности и снижения энергозатрат: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: НИТУ «МИСИС», 2008. 23 с.
4. Ревун М.П., Зинченко В.Ю. Перспективные направления совершенствования тепловой работы нагревательных и термических камерных печей // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2006. С. 294–302.
5. Панферов В.И. Некоторые проблемы автоматизации колпаковых печей // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2002. № 4. С. 42–45.

6. Пшеницын, А.В. Управление печами отжига / А.В. Пшеницын // ИСУП (Информатизация и системы управления в промышленности). 2005. № 4 (8). С. 57–63.
7. Богуш М.В. Кузьминов И.И., Орлов С.Ю. Система управления процессом отжига в колпаковых печах на основе микроконтроллеров // Металлург. 2006. № 3. С. 59–64.
8. Отжиг холоднокатанных полос в атмосфере защитных газов / А.В. Радионов, Н.В. Закревская, С.В. Пилипенко, О.П. Штемпель // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. 2023. № 2. С. 13–21. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-13-21
9. Автоматическое управление металлургическими процессами / А.М. Беленький, В.Ф. Бердников, О.М. Блинов, В.Ю. Каганов. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
10. Глинков, Г.М. Нагревательные и термические печи // Металлургическая теплотехника. Т. 8. (Итоги науки и техники ВИНИТИ АН СССР). М.: Металлургия, 1989. С. 53–112.
11. Шупе В., Талер Г. Обзор современного состояния управления печами с помощью вычислительной техники: пер. с нем. // Черные металлы. 1987. № 20. С. 9–14.
12. Автоматизированная система управления отделением колпаковых печей с адаптивным управлением отжига металла / И.В. Франценюк, Б.Б. Тимофеев, Ю.Д. Бондарь и др. // Сталь. 1985. № 6. С. 79–81.
13. Лямбах Р.В., Климоцкий М.Д. Проблемы автоматизации прокатного производства // Сталь. 1999. № 2. С. 43–47.
14. Автоматизация управления отжигом полос из низкоуглеродистых сталей рулонами в колпаковых печах / Ю.Д. Бондарь, Д.Д. Вихоть, А.А. Грищенко и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 1986. Вып. 4 (1008). С. 42–44.
15. Разработка автоматизированной системы управления отжигом рулонов холоднокатаной ленты / В.И. Панферов, И.М. Гельфанд, Г.П. Кулаченков, Е.М. Торчинский // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии в метизном производстве: сб. науч. тр. М.: Металлургия, 1991. С. 53–57.
16. А.с. SU 1791798 A1 СССР, МПК G05D 23/19. Устройство для регулирования температуры / И.М. Гельфанд, Г.П. Кулаченков, В.И. Панферов и др. № 4289204; заявл. 27.07.1987.
17. Панферов, В.И. О расчетно-инструментальном контроле качества нагрева и термообработки металла в печах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 4. С. 56–66. DOI: 10.14529/met200407
18. Панферов В.И., Панферов С.В. К решению задачи контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т. 21, № 4. С. 63–75. DOI: 10.14529/met210408
19. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металлургиздат, 1950. 453 с.
20. Мишин М.П., Залетова Е.Д., Богач Д.И. Совершенствование режимов отжига в колпаковых печах холоднокатаной жести из конверторной стали // Сталь. 1999. № 11. С. 72–73.
21. Аптерман В.Н., Двейрин Е.Г., Тымчак В.М. Колпаковые печи. М.: Металлургия, 1965. 236 с.
22. Автоматизация металлургических агрегатов / Ю.В. Липухин, Ю.И. Булатов, К. Адельман, М. Кнорр. М.: Металлургия, 1992. 304 с.
23. Айгнер Х., Зергель Г. Современная практика автоматизации, ремонта и технического обслуживания широкополосного стана горячей прокатки: пер. с нем. // Черные металлы. 1999. № 5. С. 36–42.
24. Ефромович С.Ю., Климоцкий С.М. Системы автоматического управления отжигом рулонов в колпаковых печах за рубежом. М.: Черметинформация, 1985. 16 с. (Черная металлургия).
25. Булатников Е.И., Ефромович С.Ю., Бондарь Ю.Д. Автоматизированная система управления длительностью отжига рулонов в отделении колпаковых печей на основе адаптивной математической модели // Сталь. 1987. № 7. С. 96–99.
26. Zecca A.R., Schunk J.H. A dynamic control model of box annealing // Iron and Steel Engineer. 1977. № 6. Р. 57–61.
27. Мейер У., Велк Г. Математическая модель колпаковой печи для плотносмотанных рулонов: пер. с нем. // Черные металлы. 1974. № 5. С. 17–20.
28. Ефромович С.Ю. Идентификация в адаптивной системе управления отделением колпаковых печей // АСУ ТП и средства автоматизации черной металлургии на базе микропроцессорной техники: сб. науч. тр. М.: Металлургия, 1986. С. 47–50.

29. Ефромович С.Ю. Адаптивная система управления термообработкой в цехе холодной прокатки // Автоматизация технологических процессов и управления производством в черной металлургии: сб. науч. тр. М.: Металлургия, 1987. С. 66–68.
30. Zieger H. Berechnung der Erwärmtdauer für Wärmebehandlungsprozess // Neue Hütte. 1982. Nr. 4. S. 134–138.
31. Титов В.И., Тузов Э.Д., Мастрюков Б.С. Математическая модель колпаковой электропечи сопротивления // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 1979. № 11. С. 139–142.
32. Берингер Ю., Сильвасши В. Повышение качества и снижение затрат при отжиге тонкой холоднокатаной полосы в колпаковых печах: пер. с нем. // Черные металлы. 1991. № 4. С. 23–30.
33. Управление процессом отжига в колпаковых печах: пер. с нем. / Ж. Льеш, Ф. Блюм, Р. Хуберт, Ж. Кристофф // Черные металлы. 1992. № 11. С. 57–65.
34. Исследование влияния входных параметров на показания регулирующей термопары в газовых колпаковых печах / А.С. Телегин, Л.А. Федяева, В.С. Швыдкий, Ю.В. Кабатов // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 1980. № 2. С. 111–114.
35. Панферов В.И. Адаптивные системы контроля качества нагрева металла в печах // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 1990. № 7. С. 110.
36. Определение конца отжига холоднокатанных рулонон стали в колпаковых печах / Ю.Д. Бондарь, С.А. Грищенко, А.А. Грищенко, Т.С. Гош // Механизация и автоматизация управления. 1989. № 2. С. 44–46.
37. Панферов В.И. Идентификация математической модели нагрева металла в печах // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 1990. № 9. С. 86–89.
38. Измерение температуры – главная задача обеспечения технологических процессов в металлургии. К 200-летию открытия термоэлектрического эффекта Т.И. Зеебеком / А.М. Беленький, А.Н. Бурсин, А.А. Улановский, С.И. Чибизова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77, № 4. С. 393–405. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-4-393-405

### References

1. Wendt P., Shevyrev D.A. [Modern energy-saving technologies in the field of bell furnaces]. In: *Energosberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya: tr. VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 150-letiyu velikogo russkogo metallurga V.E. Grum-Grzhimailo* [Energy-saving technologies in industry. Furnace units. Ecology: Proceedings of the VII International. scientific-practical conference dedicated to the 150th anniversary of the great Russian metallurgist V.E. Grum-Grzhimailo]. Moscow: NUST “MISIS”; 2014. P. 183–192. (In Russ.)
2. Shaydurova T.A., Kazyaev M.D. [Design and thermal operation of bell-type furnaces for heat treatment of cold-rolled steel coils]. In: *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sb. dokl. IX Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2021) s mezdunar. uchastiem* [Thermal engineering and computer science in education, science and production: collection of articles. reports of the IX All-Russian scientific and practical. conf. students, graduate students and young scientists (TIM'2021) with international participation]. Ekaterinburg: UrFU; 2021. P. 159–167. (In Russ.)
3. Kalimulina S.I. *Sovershenstvovanie teplovoy raboty elektricheskikh odnostopnykh kolpa-kovykh pechey s tsel'yu povysheniya proizvoditel'nosti i snizheniya energozatrat: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the thermal performance of electric single-stall bell-type furnaces in order to increase productivity and reduce energy consumption. Abstract of Cand. diss.]. Moscow: NUST “MISIS”; 2008. 23 p. (In Russ.)
4. Revun M.P., Zinchenko V.Yu. [Promising directions for improving the thermal work of heating and thermal chamber furnaces]. In: *Metallurgicheskaya teplotekhnika: sb. nauch. tr.* [Metallurgical heat engineering: collection scientific proceedings]. Dnipropetrovsk: “PP Grek O.S.”; 2006. P. 294–302. (In Russ.)
5. Panferov V.I. [Some problems of automation of hoods]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2002;(4):42–45. (In Russ.)

6. Pshenitsyn A.V. [Control of annealing furnaces]. *ISUP (Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti)* [ISUP (Informatization and control systems in industry)]. 2005;4(8):57–63. (In Russ.)
7. Bogush M.V., Kuz'minov I.I., Orlov S.Yu. Microcontroller-based system for controlling annealing in bell-type furnaces. *Metallurgist*. 2006;50(3):148–151. DOI: 10.1007/s11015-006-0055-0
8. Radionov A.V., Zakrevskaya N.V., Pilipenko S.V., Stamp O.P. Annealing of cold-rolled strips in shielding gas atmosphere. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B.* 2023;(2):13–21. (In Russ.)
9. Belen'kiy A.M., Berdnikov V.F., Blinov O. M., Kaganov V.Yu. *Avtomaticheskoe upravlenie metallurgicheskimi protsessami* [Automatic control of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya; 1989. 384 p. (In Russ.)
10. Glinkov G.M. *Nagrevatel'nye i termicheskie pechi* [Heating and thermal furnaces]. In: *Metalurgicheskaya teplotekhnika. T. 8. (Itogi nauki i tekhniki VINITI AN SSSR)*. [Metallurgical heat engineering. Vol. 8. (Results of science and technology of VINITI AS USSR)]. Moscow: Metallurgiya; 1989. P. 53–112. (In Russ.)
11. Shupe V., Thaler G. [Review of the current state of control of furnaces using computer technology]. Transl. from German. *Chernye metally*. 1987;(20):9–14.
12. Frantsenyuk I.V., Timofeev B.B., Bondar Yu.D. et al. [Automated control system for the separation of bell furnaces with adaptive control of metal annealing]. *Stal'* [Steel]. 1985;(6):79–81. (In Russ.)
13. Lambakh R.V., Klimovitsky M.D. [Problems of automation of rolling production]. *Stal'* [Steel]. 1999;(2):43–47. (In Russ.)
14. Bondar' Yu.D., Vikhot' D.D., Grishchenko A.A. et al. [Automation of control of annealing of low-carbon steel strips in rolls in bell furnaces]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 1986;4(1008):42–44. (In Russ.)
15. Panferov V.I., Gel'fand I.M., Kulachenkov G.P., Torchinskiy E.M. [Development of an automated control system for annealing rolls of cold rolled tape]. In: *Resursosberegayushchie i ekologicheski chistye tekhnologii v metiznom proizvodstve: sb. nauch. tr.* [Resource-saving and environmentally friendly technologies in hardware production: collection scientific proceedings]. Moscow: Metallurgiya; 1991. P. 53–57. (In Russ.)
16. Gelfand I.M., Kulachenkov G.P., Panferov V.I., Anisimova V.P., Krasnov A.V., Bogatov V.I. *Ustroystvo dlya regulirovaniya temperatury* [Temperature control device]. Certificate of authorship USSR, no. 1791798 A1, 1987. (In Russ.)
17. Panferov V.I. About Design and Instrumental Control of Quality of Heating and Heat Treatment of Metal in Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(4):56–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200407
18. Panferov V.I., Panferov S.V. To the Solution of the Problem of Control of Metal Temperature in ACS TP of Methodical Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2021;21(4):63–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/met210408
19. Tayts N.Yu. *Tekhnologiya nagревa stali* [Steel heating technology]. Moscow: Metallurgizdat; 1950. 450 p. (In Russ.)
20. Mishin M.P., Zaletova E.D., Bogach D.I. [Improving annealing modes in bell-type furnaces of cold-rolled sheet metal from converter steel]. *Stal'* [Steel]. 1999;(11):72–73. (In Russ.)
21. Apterman V.N., Dveyrin E.G., Tymchak V.M. *Kolpakovye pechi* [Bell furnaces]. Moscow: Metallurgiya; 1965. 236 p. (In Russ.)
22. Lipukhin Yu.V., Bulatov Yu.I., Adelman K., Knorr M. *Avtomatizatsiya metallurgicheskikh agregatov* [Automation of metallurgical units]. Moscow: Metallurgiya; 1992. 304 p. (In Russ.)
23. Aigner H., Zergel G. [Current practice in automation, repair and maintenance of a hot strip mill]. Transl. from German. *Chernye metally*. 1999;(5):36–42. (In Russ.)
24. Efroymovich S.Yu., Klimovitskiy S.M. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya otzhigom rulonov v kolpakovykh pechakh za rubezhom* [Systems for automatic control of coil annealing in bell furnaces abroad]. Moscow: Chermetinformatsiya; 1985. 16 p. (Ser. Ferrous metallurgy). (In Russ.)
25. Bulatnikov E.I., Efroymovich S.Yu., Bondar Yu.D. [Automated control system for the duration of coil annealing in the bell furnace department based on an adaptive mathematical model]. *Stal'* [Steel]. 1987;(7):96–99. (In Russ.)

26. Zecca A.R., Schunk J.H. A dynamic control model of box annealing. *Iron and Steel Engineer*. 1977;(6):57–61.
27. Meyer W., Welk G. [Mathematical model of a bell-type furnace for tightly wound rolls]. Transl. from German. *Chernye metally*. 1974;(5):17–20. (In Russ.)
28. Efroimovich S.Yu. [Identification in the adaptive control system for the bell furnace department]. In: *ASU TP i sredstva avtomatizatsii chernoy metallurgii na baze mikroprotsessornoy tekhniki: sb. nauch. tr.* [Process control systems and automation equipment for ferrous metallurgy based on microprocessor technology: collection scientific proceedings]. Moscow: Metallurgiya; 1986. P. 47–50. (In Russ.)
29. Efroimovich S.Yu. [Adaptive heat treatment control system in the cold rolling shop]. In: *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i upravleniya proizvodstvom v chernoy metallurgii: sb. nauch. tr.* [Automation of technological processes and production management in ferrous metallurgy: collection scientific proceedings]. Moscow: Metallurgiya; 1987. P. 66–68. (In Russ.)
30. Zieger H. Berechnung der Erwärmtdauer für Wärmebehandlungsprozess. *Neue Hütte*. 1982;(4):134–138.
31. Titov V.I., Tuzov E.D., Mastryukov B.S. [Mathematical model of a bell-type resistance electric furnace]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1979;(11):139–142. (In Russ.)
32. Behringer Y., Silvasshi V. [Improving quality and reducing costs when annealing thin cold-rolled strip in bell-type furnaces]. Transl. from German. *Chernye metally*. 1991;(4):23–30. (In Russ.)
33. Liesch J., Blum F., Hubert R., Christophe J. [Control of the annealing process in bell furnaces]. *Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1992;(11):57–65. (In Russ.)
34. Telegin A.S., Fedyayeva L.A., Shvydky V.S., Kabatov Yu.V. [Study of the influence of input parameters on the readings of the control thermocouple in gas bell furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1980;(2):111–114. (In Russ.)
35. Panferov V.I. [Adaptive systems for quality control of metal heating in furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1990;(7):110. (In Russ.)
36. Bondar Yu.D., Grishchenko S.A., Grishchenko A.A., Gosh T.S. [Determination of the end of annealing cold-rolled steel rolls in bell-type furnaces]. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya upravleniya* [Mechanization and automation of control]. 1989;(2):44–46. (In Russ.)
37. 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.)
38. Belen'kii A.M., Bursin A.N., Ulanovskii A.A., Chibizova S.I. Temperature measurement – the main task to ensure technological processes in steel industry. The 200 years anniversary of the thermoelectric effect discovery by T.I. Zeebeck. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;77(4):393–405. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-4-393-405

### 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 14.09.2024**

**The article was submitted 14.09.2024**