

Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика

УДК 669.046:536.24

DOI: 10.14529/met210408

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В АСУ ТП МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В.И. Панферов^{1, 2}, С.В. Панферов²

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Введение. В условиях повышения требований к качеству нагрева металла перед прокаткой задача совершенствования автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) нагревательных печей является вполне актуальной. **Цель исследования:** установить наиболее рациональные способы и процедуры решения задачи контроля температуры металла в рамках АСУ ТП методических печей. **Материалы и методы.** Выполнен анализ и обобщение литературных данных по проблеме. Посредством физико-технического подхода определены приемлемые технические структуры подсистем контроля. **Результаты.** Рекомендована система, включающая как датчик температуры кладки или температуры рабочего пространства в зоне, так и два пирометра, один из которых свизирован на металл, находящийся в начале зоны, а второй – на ее конечном участке. Такая система, во-первых, будет определять средневзвешенную температуру металла в зоне, что весьма важно для качественной работы систем автоматического регулирования (САР) температурного режима зоны, а во-вторых, систематическая погрешность измерения будет исключаться с помощью датчика температуры кладки или температуры рабочего пространства. Указаны причины, из-за которых предпочтительнее использовать датчик радиационной температуры рабочего пространства. Такие исправленные сигналы пирометров могут быть использованы не только в САР температурного режима зон печи, но, например, и для адаптации используемых моделей нагрева. Обоснована структура математической модели, пригодная для контура обратной связи АСУ ТП, показана целесообразность описания нагрева слябов одномерным уравнением теплопроводности в сочетании с зональным методом расчета и экспериментальной настройкой моделей внешнего теплообмена. Приведена характеристика различных алгоритмов контроля температурных полей слябов. Отмечена допустимость условно симметричного описания процесса нагрева, обусловленная возможностью такого выбора уставок (заданий) регуляторов температуры нижних зон методических печей, при котором динамика средних температур верхней и нижней половин сляба будет практически полностью совпадать. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании АСУ ТП нагревательных печей.

Ключевые слова: качество нагрева металла перед прокаткой, методическая печь, контроль температуры поверхности слябов, датчик фонового излучения, модель для контура обратной связи, автоматизированная система управления.

Проблема инструментального контроля температуры металла

Для высококачественного управления процессом нагрева в печах необходима информация о температуре нагреваемого металла. Измерение этого важнейшего параметра, как известно, вызывает ряд серьезных трудностей. Исторически первым был способ контроля по температуре печного пространства,

так как этот параметр «наиболее ответствен» за температуру металла в печи [1, 2]. При этом в качестве первичных измерительных преобразователей использовали либо термопары, либо пирометры, свизированные на дно карборундовых стаканов, погруженных в рабочее пространство печи. Следует заметить, что создание второго способа контроля обусловлено, главным образом, неудов-

летворительным сроком службы термопар, термопары часто быстро выходят из строя и перестают соответствовать заявленным метрологическим характеристикам. Понятно, что необходимо решение этой проблемы, здесь, например, можно отметить работу [3], в которой приводятся некоторые рекомендации для долгой и бесперебойной работы термопар, изготовленных, в частности, из КТМС – кабеля термопарного с минеральной изоляцией в стальной оболочке.

Способ контроля по температуре печного пространства, несмотря на его очевидные недостатки, применяется и в настоящее время [4–7], в частности, рекомендуется к использованию при автоматизации нагревательных печей. При этом для повышения оперативности и точности управления процессом, помимо пирометров, применяют специальные малоинерционные термопары [2].

Следует заметить, что данный способ является, как это отмечается в литературе, «...классическим способом контроля температуры металла ... через измерение температуры печного пространства ... температура металла может быть лишь косвенно оценена по температуре, измеряемой термопарой» [7].

Дальнейший прогресс в решении проблемы связан с появлением различного рода измерителей непосредственно температуры поверхности нагреваемых слябов. Известны как одно-, так и многопирометрические системы измерения [8, 9]. Пирометры устанавливают, как правило, в специальных водоохлаждаемых фурмах, при этом для уменьшения влияния мешающих факторов используют специальные светофильтры, применяют «...системы подачи воздуха для отдува пыли и продуктов сгорания от объектива» [7].

В многопирометрических системах оценка измеряемого параметра производится по взвешенным сигналам пирометров, установленных в определенных точках по длине печи и свизированных на поверхность металла. Известны, в частности, системы автоматического регулирования (САР) температурного режима, работающие по взвешенному сигналу двух пирометров, установленных в начале и в конце каждой управляемой зоны методической печи [9–12]. Вполне очевидно, что такие САР оперативнее реагируют на появление *относительно холодного* металла в зоне, это в конечном счете повышает *равномерность* нагрева слябов перед прокаткой. При этом

особо следует подчеркнуть предпочтительность двухпирометрической системы измерения по сравнению с системой, использующей только один пирометр в зоне, – удастся хотя бы в первом приближении усреднить температуру металла в зоне. Если бы использовался только один пирометр, то расход топлива в зону, выставляемый САР, определялся бы только температурой одного сляба, попадающего в область визирования этого пирометра. И если такой сляб относительно холодный, то расход топлива мог бы быть увеличен на такую величину, что другие слябы при смешанном посаде были бы просто оплавленными. Второй пирометр, свизированный на сляб, находящийся на конечном участке зоны и имеющий вследствие этого обычно самую высокую температуру поверхности, позволяет в определенной мере предотвратить оплавление поверхности металла. Однако здесь все зависит от выбора весовых коэффициентов k_1 и k_2 сигналов первого и второго пирометров $t_{\text{ПМ1}}$ и $t_{\text{ПМ2}}$, используемый при этом в САР сигнал обратной связи равен $t = k_1 \cdot t_{\text{ПМ1}} + k_2 \cdot t_{\text{ПМ2}}$. Применяется эвристический метод настройки таких систем, включая и выбор заданного значения взвешенной суммы сигналов. Понятно, что это значение является некоторой условной величиной, отличающейся от истинного задания на систематическую погрешность, обусловленную излучением фона – мешающих факторов.

Такие системы следует отнести к так называемым системам качественного, а не количественного регулирования, поскольку сигналы пирометров $t_{\text{ПМ1}}$ и $t_{\text{ПМ2}}$ содержат большие ошибки измерений температуры поверхности металла и для расчета температурных полей слябов и вычисления каких-либо их характеристик не могут быть использованы.

Целесообразность использования таких систем показана еще в работах [9–12], тем не менее почему-то авторы работы [13] данный подход вновь пытаются представить как достаточно новый. Такой способ формирования импульса для САР температурного режима применяется в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») еще с начала 70-х годов прошлого века.

Неудовлетворительная точность определения температуры поверхности металла в какой-либо точке печи *только пирометром*, свизированным на его поверхность, привела к

созданию так называемых двухдатчиковых систем измерения, содержащих дополнительно датчик корректирующего сигнала – температуры кладки или температуры рабочего пространства в зоне [8, 14–16]. Второй датчик предназначен для рассчитываемой по специальному алгоритму коррекции показаний свизированного на металл пирометра. Данные методы измерения температуры поверхности являются более надежными и кроме нашей страны применяются в Великобритании, Бельгии, США, Испании, Японии, Швеции и ФРГ [17].

При этом следует заметить, что двухдатчиковый способ работы [14], на наш взгляд, предпочтительнее метода [8, 15], так как в нем используется только один трудноопределяемый параметр – монокроматический коэффициент черноты поверхности нагреваемого металла. Объясняется это тем, что здесь предлагается производить измерения в том диапазоне длин волн, который принадлежит так называемому окну прозрачности печных газов. Понятно, что этим исключается влияние на результат измерения излучения печных газов. Для настройки же способа [8, 15] необходимо решить задачу параметрической идентификации двух интегральных коэффициентов черноты: поверхности нагреваемого металла и рабочего пространства печи. Можно также предложить и следующее развитие способа работ [8, 15]: если вместо термопары использовать радиационный пирометр, измеряющий плотность потока излучения рабочего пространства, в этом случае, следуя работе [14], получим алгоритм для определения действительной температуры поверхности слябов:

$$T_{\text{пм}} = 4 \sqrt{\frac{T_{\text{пмрад}}^4 - (1 - \varepsilon_{\text{м}}) T_{\text{рпрад}}^4}{\varepsilon_{\text{м}}}}. \quad (1)$$

Здесь $T_{\text{пм}}$ – действительная температура поверхности металла, $T_{\text{пмрад}}$ – радиационная температура поверхности металла, $T_{\text{рпрад}}$ – радиационная температура рабочего пространства, $\varepsilon_{\text{м}}$ – интегральный коэффициент черноты нагреваемого металла. В формуле (1) имеются в виду абсолютные температуры.

Очевидно, что алгоритм (1) обладает преимуществом по сравнению со способом [8, 15], так как в (1) используется только один интегральный коэффициент черноты $\varepsilon_{\text{м}}$. При этом весьма важно то, как достаточно точно изме-

рить радиационную температуру рабочего пространства.

Отметим также, что помимо исправления показаний целесообразно все-таки в каждой обогреваемой зоне печи устанавливать несколько пирометров.

Как нам представляется, более совершенной является система, включающая как датчик температуры кладки или температуры рабочего пространства в зоне, так и два пирометра, один из которых свизирован на металл, находящийся в начале зоны, а второй – на ее конечном участке. Во-первых, такая система будет определять все-таки среднюю температуру металла в зоне, а во-вторых, систематическая погрешность измерения будет исключаться с помощью датчика температуры кладки или температуры рабочего пространства. Вследствие этого исправленные сигналы пирометров могут быть использованы, например, для адаптации моделей нагрева металла в печи. Однако при этом все зависит от алгоритма работы такой системы и его настроек на реальный процесс.

Целесообразность использования многопирометрических систем объясняется, прежде всего, тем, что для нагрева всех слябов, находящихся в зоне, есть только одно управляющее воздействие – это расход топлива в эту зону и поэтому вполне естественно выбирать это управление по средней температуре их поверхностей.

Следует также отметить прибор, в основу которого положен пирометр Лэнда, представляющий собой совокупность радиационного пирометра и насадки в виде полусферы с зеркальной внутренней поверхностью [8]. Этот пирометр позволяет определять действительную температуру поверхности металла, покрытого в печи слоем окалины. Однако с его помощью возможны только периодические измерения, согласованные с движением слябов в печи. Кроме того, прибор по некоторым причинам необходимо после каждого измерения выводить из рабочего пространства печи [8].

Непрерывную и достаточно точную информацию о температуре поверхности слябов, находящихся в определенных точках печи, можно получить с помощью устройства, предложенного в работе [18]. Устройство включает пирометры, свизированные на поверхность металла, и контактные термопары, предназначенные для измерения действительной температуры заготовок. Термопары спе-

циальным механизмом приводятся в тепловой контакт с поверхностью нагреваемых слябов в те промежутки времени, когда металл в печи неподвижен. Специальная схема на основании результатов попарного сравнения показаний термопар и пирометров для каждой из заготовок формирует сигналы коррекции, алгебраически суммируемые с сигналами пирометров на время до следующей остановки металла в печи. Данные «исправленные» сигналы пирометров используются в САР температуры печи. Таким образом, из показаний пирометров исключают погрешности, связанные с влиянием известных [8, 14] мешающих факторов.

Модельный контроль температуры в цепи обратной связи

Вышеописанные системы измерения, несмотря на их достоинства и недостатки, принципиально не могут решить проблему определения температуры внутренних точек нагреваемых слябов. Кроме того, данные системы являются системами точечного контроля, так как определяют температуру заготовок лишь в некоторых точках по длине печи, что, вообще говоря, недостаточно для качественного управления процессом. Все это вызывает необходимость разработки надежной математической модели процесса нагрева, которая совместно с инструментальными средствами составляла бы единую достаточно точную систему расчетно-инструментального контроля температуры металла в печи [19–21]. Поэтому рассмотрим задачу моделирования нагрева слябов в АСУ ТП методических печей.

Вопросам моделирования нагрева металла в печах посвящено достаточно много работ. При этом следует отметить значительное разнообразие подходов к решению этого вопроса, что связано, прежде всего, с различными целями и задачами математического моделирования. Подчеркнем, что нас интересуют математические модели, пригодные для применения в АСУ ТП нагревательных печей. Сказанное требует, во-первых, относительной простоты математической модели – система управления должна работать в реальном масштабе времени, т. е. длительность цикла расчетов в УВМ должна быть достаточно малой и должна удовлетворять требованиям к качеству процесса управления (быстродействие расчетов), во-вторых, ее достаточной информативности, отражения наиболее существенных черт процесса нагрева металла в печах,

в-третьих, структура математической модели должна быть «привязана» к штатным или разумным средствам измерения параметров процесса нагрева. Последнее относится как к средствам измерения, сигналы которых используются при расчете температурного поля заготовок, так и к средствам, необходимым для идентификации (настройки) моделей на реальный процесс.

Детализация математической модели может быть существенно различной и определяется в значительной мере требованиями к точности расчета. По степени уменьшения полноты информационных возможностей математические модели можно расположить в такой последовательности:

1) дифференциальное уравнение теплопроводности или их система, отражающая передачу теплоты в металле с учетом всех существенно влияющих факторов;

2) обыкновенное дифференциальное уравнение или их система, получаемая редукцией (заменой) предыдущих уравнений или формулируемая независимо;

3) решения уравнений при характерных закономерностях изменения температуры печного пространства во времени, например, при ее постоянстве в зонах печи.

Следует, однако, отметить, что основой всех типов моделей является дифференциальное уравнение теплопроводности, отражающее существо внутреннего теплопереноса в металле. Причем для описания процесса нагрева собственно самого металла достаточно использование одного дифференциального уравнения теплопроводности, учет же наличия поверхностного слоя окалины приводит к их системе.

В зависимости от числа пространственных координат температурное поле может быть одномерным, двумерным или трехмерным. Если же распределение температуры по объему сляба может быть принято равномерным (случай так называемого «нульмерного» температурного поля), то из модели первого типа вытекает модель в виде обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка. Кроме того, модели второго типа могут быть получены пространственной дискретизацией дифференциальных уравнений теплопроводности так называемым методом прямых.

В качестве примера моделей третьего типа следует указать прежде всего на экспонен-

циальные зависимости [4, 8], использование которых для моделирования нагрева слябов требует известных оговорок, эти зависимости достаточно идеально подходят для описания процесса нагрева проволоки или ленты в протяжных печах метизной отрасли [22].

Если учитывать зависимости теплофизических свойств нагреваемого металла от температуры, то как само дифференциальное уравнение теплопроводности, так и получающиеся из него частные модели внутреннего теплообмена становятся нелинейными, что значительно усложняет анализ и решение задач.

Не менее важными являются модели внешнего теплообмена нагреваемого металла. Здесь различают лучистую, конвективную и лучисто-конвективную формы теплообмена. Лучистая и лучисто-конвективная формы описываются нелинейными уравнениями, дополнительно усложняющими процесс численного исследования моделей нагрева металла в печи.

Стремление преодолеть возникающие трудности породило так называемый кусочно-постоянный метод представления зависимостей теплофизических свойств металла от температуры, аналогичный методу замороженных коэффициентов, используемому в теории нестационарных систем автоматического управления. Применение этого метода и к модели внешнего теплообмена при записи ее в конвективной форме с коэффициентами теплоотдачи, зависящими от температур рабочего пространства и поверхности нагреваемого металла, существенно упростило решение задачи моделирования. Вышеупомянутые экспоненциальные зависимости получены именно таким способом, при этом кусочно-постоянное представление зависимостей сопоставляется с разбиением всей длины печи на отдельные участки (зоны) нагрева, число которых выбирается из требуемой точности расчета температуры металла.

Следует также отметить, что кусочно-постоянная аппроксимация зависимостей представляет один из приемов линеаризации модели нагрева металла в печи.

Как отмечалось в [20, 21, 23], в контуре обратной связи АСУ ТП для описания процесса нагрева слябов используют модели не сложнее одномерного уравнения теплопроводности. Такой выбор структуры модели внутреннего теплообмена обусловлен сле-

дующим. Во-первых, при использовании двух- или трехмерного уравнения теплопроводности для корректного задания граничных условий необходим распределенный контроль температуры рабочего пространства (или температуры поверхности металла), что весьма проблематично и на практике не применяется, в зонах печи обычно устанавливается один датчик температуры рабочего пространства.

Можно несколько упростить описание процесса и отнести неравномерную «греющую способность» зоны только к показаниям зонального термометра, саму же неравномерность учитывать различными численными значениями коэффициентов внешнего теплообмена для различных точек рабочего пространства печи. Однако в этом случае значительно усложняется задача параметрической идентификации модели, здесь в частности возникает труднейшая проблема получения экспериментальных данных для идентификации в ходе нормальной эксплуатации АСУ ТП.

Во-вторых, математические модели помимо «привязки» к штатным или разумным средствам измерения параметров процесса должны быть также «привязаны» и к реальным управляющим воздействиям на процесс. Объясняется это тем, что если обнаруживать с помощью распределенной двумерной или трехмерной модели, какие-то нежелательные особенности температурного поля сляба, разумно иметь и какие-то реальные возможности исправления этих особенностей. Однако на практике этого нет, есть только одно управляющее воздействие на всю зону, в которой находится 5–7 различных слябов. Поэтому, как подтверждает и обширный литературный обзор, модель в виде многомерного уравнения теплопроводности не считается целесообразной. Кроме того, при использовании многомерного уравнения теплопроводности возникают дополнительные сложности, связанные с учетом влияния подвижных и неподвижных опорных балок или подовых глассажных труб, в частности, требуется непрерывное измерение их температуры. Поэтому задача расчета нагрева слябов в методических печах сводится, как правило, «...к одномерной задаче теплопроводности для некоторого расчетного продольного сечения печи; оно проходит приблизительно посередине между глассажными трубами» [23, с. 235]. Аналогичные утверждения имеются и в зарубежной литературе [24]. При этом влияние глассажных труб и

опорных балок на температуру в расчетном сечении рекомендуется учитывать соответствующим уменьшением коэффициентов теплообмена на металл снизу [23, 24]. Многочисленными исследованиями установлено, что при соответствующей настройке такая структура модели, как правило, обеспечивает удовлетворительную точность расчета температуры металла.

В большинстве случаев в моделях внешнего теплообмена слябов используются только показания зональных термометров [8, 14, 25], т. е. считается, что влияние всех остальных участников теплообмена можно привести к температуре рабочего пространства в зоне печи. При этом, как уже отмечалось, модель внешнего теплообмена может быть представлена в лучистой, лучисто-конвективной или только в конвективной формах. Как известно, применение зонального метода расчета в сочетании с экспериментальной настройкой (параметрической идентификацией) модели внешнего теплообмена индивидуально для каждой расчетной зоны позволяет определить температурное поле в слябе с любой заданной точностью для каждой из названных структур модели (за счет увеличения числа расчетных зон) [14, 26, 27]. Конечно, при этом чем точнее модель будет отражать механизм внешнего теплообмена, тем меньшее число расчетных зон потребуется для достижения заданной точности расчета.

Обычно в пределах физической зоны печи выбирается несколько расчетных зон. Для учета неравномерности температуры рабочего пространства *по длине зоны* применяются различные способы «исправления» показаний зональных термометров в зависимости от координат по длине зоны [28–30].

Следует отметить, что в практике моделирования методических печей принято рассматривать процесс нагрева металла, как правило, без явного учета поверхностного слоя окалины. При этом предполагается, что влияние окалины на нагрев можно учесть соответствующей настройкой модели, выбором численного значения коэффициентов внешнего теплообмена. Вместе с тем количественные оценки получаемой таким образом близости динамических траекторий температурного поля металла при том и другом способе математического описания обычно не конкретны, по существу имеют только качественный характер или вообще не приводятся. Однако

этот вопрос имеет весьма важное значение для задачи выбора структуры модели, так как возможность получения достаточно малого «расхождения» динамических траекторий при различных структурах математической модели будет служить теоретической основой допустимости упрощенного описания процесса, неявного учета поверхностного слоя окалины. Успешное решение данного вопроса позволит «снять» многие проблемы, связанные с получением экспериментальной информации для идентификации модели с явным учетом поверхностного слоя окалины. Эти проблемы практически неразрешимы для практики нормальной эксплуатации АСУ ТП и порождаются в частности необходимостью измерения по ходу нагрева толщины образующегося слоя окалины, температуры границы «окалина – неокисленный металл» и т. п., без этих измерений невозможна настройка закона окисления металла в печи.

В работе [31] с помощью вычислительных экспериментов установлено, что модель нагрева без явного учета поверхностного слоя окалины может быть удовлетворительно настроена по данным реального нагрева окисляющихся слябов в печах, следовательно, применяемая в АСУ ТП практика моделирования достаточно оправдана. При этом поступали следующим образом.

Сравнивали нагрев двух одинаковых слябов в одних и тех же зонах печи. При этом считалось, что первый сляб не окисляется и на его поверхностях нет никакой окалины, наоборот, на поверхностях второго сляба наблюдается окалинообразование. С помощью достаточно точной математической модели, учитывающей как тепло, выделяющееся при окислении стали, так и рост слоя окалины на поверхностях неокисленного металла, происходящий из-за неравенства объемов окалины и окисленной стали, рассчитывали нагрев окисляющегося сляба и полученные таким образом кривые температур двух границ «окалина-неокисленный металл» использовали в качестве исходных данных для параметрической идентификации моделей внешнего теплообмена неокисляющегося сляба. При этом параметры закона окисления металла подбирались по данным отбора проб окалины, получаемой в методических печах стана 2500 ПАО «ММК». В качестве критерия идентификации принимали наибольшее значение модуля отклонения температур верхней и

нижней поверхностей неокисляющегося сляба от соответствующих кривых температур границ «окалина – неокисленный металл» для окисляющегося сляба. Полученную таким образом минимаксную задачу оптимизации решали методом полного перебора (сканирования). В результате многочисленных расчетов установлено, что модель нагрева без явного учета окисления сляба может быть настроена с приемлемой точностью по данным нагрева окисляющегося сляба. Если же при этом точность настройки окажется недостаточной, то ее всегда можно повысить за счет разбиения рассматриваемого промежутка нагрева на несколько отдельных расчетных участков.

Интересно отметить, что в процессе вычислений выяснено следующее: для удовлетворительной настройки модели, как правило, нет необходимости разбивать весь процесс нагрева на участки (расчетные зоны) длительностью меньше, чем 15...20 мин, т. е. нет необходимости в достаточно сильном дроблении процесса нагрева. Приведенная же длительность нагрева на расчетном участке практически соответствует, например, наиболее вероятной фактической длительности нагрева в физических зонах методических печей стана 2500 ПАО «ММК».

Завершая обсуждение проблемы выбора структуры, отметим также, что, как показано в работе [32], процесс нагрева можно рассматривать *условно симметричным*, принимая расчетную толщину сляба равной половине его фактической толщины, это тоже существенно упрощает задачу. Дело в том, что если выбирать уставки (задания) регуляторов температуры нижних зон по алгоритму работы [32], то динамические траектории среднетемпературных температур верхней и нижней половин сляба будут практически полностью совпадать. Это позволяет ограничиться контролем и оптимизацией управления нагревом только верхней половины заготовки.

Контроль с помощью специальных алгоритмов

Кроме прямого модельного контроля в АСУ ТП нагревательных печей может применяться контроль температурных полей нагреваемых слябов и с помощью разработанных на основе моделей различных алгоритмов. Здесь следует отметить алгоритмы оценки температурных полей заготовок по наблюдаемым (измеряемым) величинам процесса

нагрева [33, 34], а также алгоритмы контроля в регулярном режиме [35, 36].

Алгоритмы оценки по наблюдаемым (измеряемым) величинам процесса нагрева разработаны как для случая точечных, так и для случая непрерывных измерений на рассматриваемом отрезке времени, имеются также варианты этих алгоритмов для случая, когда оцениваемое температурное поле считается равномерным («нульмерным»), а условия нагрева – симметричными или односторонними [33]. Область применимости последних алгоритмов, как это следует из результатов работы [32], практически неограничена. В целом алгоритмы достаточно просты, что делает их особенно привлекательными для использования в АСУ ТП. Важным достоинством алгоритмов является то, что температурное поле заготовки оценивается по результатам текущих измерений совершенно независимо от предыстории нагрева. Следовательно, *непрерывный контроль температуры металла по ходу нагрева не является в принципе абсолютно необходимым* для того, чтобы иметь возможность определять температурное поле заготовки в какие-то ответственные моменты времени. Данные алгоритмы пригодны и для решения хорошо известной и актуальной задачи определения начального температурного поля слябов перед посадом их в печи [33, 34, 37].

Комплекс алгоритмов контроля перепада температуры по сечению слябов разработан для различных способов выравнивания их температурных полей [35, 36]: при постоянной температуре поверхности, при нулевом тепловом потоке через поверхность и при постоянной температуре рабочего пространства в зоне. Алгоритмы разработаны для регулярной и иррегулярной стадий процесса. Исследовано влияние на структуру алгоритмов контроля и вообще на саму возможность такого контроля различных особенностей реального процесса выдержки (неравенство температур рабочего пространства и коэффициентов теплообмена для разных поверхностей слябов, линейное уменьшение температуры в зонах к окну выдачи металла на прокатный стан) [36].

Дальнейшая разработка проблемы показала, что контроль перепада температуры может осуществляться и по расходу топлива в зону. В самом деле хорошо известно, что взаимосвязь расхода топлива и параметров процесса нагрева удовлетворительно описывается, например, следующим уравнением:

$$G = M_0 \frac{t_{\text{рп}} - t_{\text{пм}}}{T_{\text{р}} - t_{\text{рп}}} + M_{\text{хх}}, \quad (2)$$

где G – расход топлива, M_0 – некоторая величина, $t_{\text{рп}}$ – температура рабочего пространства, $t_{\text{пм}}$ – температура поверхности металла, $T_{\text{р}}$ – теоретическая температура горения топлива, $M_{\text{хх}}$ – мощность холостого хода.

Далее, согласно [35] наибольший перепад температуры в слябе Δt_{max} , например, для случая выдержки при постоянной температуре рабочего пространства может быть найден по алгоритму:

$$\Delta t_{\text{max}} = k(t_{\text{рп}} - t_{\text{пм}}), \quad (3)$$

где k – некоторый коэффициент, поэтому получается следующее соотношение для контроля Δt_{max} :

$$\Delta t_{\text{max}} = k(T_{\text{р}} - t_{\text{рп}})(G - M_{\text{хх}})/M_0. \quad (4)$$

При этом следует отметить, что коэффициент k зависит от теплофизических параметров металла, поэтому одно и то же значение Δt_{max} для различных типов нагреваемых заготовок будет иметь место при разных расходах топлива в зону, а, следовательно, и при

разных положениях регулирующей заслонки. Поэтому подход работы [38] к решению проблемы определения момента окончания процесса выдержки следует считать достаточно интересным и оригинальным, но требующим дальнейшей доработки.

Выводы

Приведен обзор современных методов и средств расчетно-инструментального контроля температуры заготовок при их нагреве в методических печах. Показана целесообразность описания температурного поля слябов одномерным уравнением теплопроводности в сочетании с зональным методом расчета и экспериментальной настройкой моделей внешнего теплообмена. Приведена характеристика различных алгоритмов контроля температурных полей слябов. Отмечена допустимость условно симметричного описания процесса нагрева, обусловленная возможностью такого выбора уставок регуляторов температуры нижних зон методических печей, при котором динамика среднемаховых температур верхней и нижней половин сляба будет практически полностью совпадать.

Литература

1. Шупе, В. Обзор современного состояния управления печами с помощью вычислительной техники / В. Шупе, Г. Талер // *Черные металлы. Пер. с нем.* – 1987. – № 20. – С. 9–14.
2. Райницхубер, Ф. Применение современных технологий в печах прокатных станов / Ф. Райницхубер, Х.П. Домельс // *Черные металлы. Пер. с нем.* – 1990. – № 8. – С. 47–58.
3. Сидорцев, А.С. Измерение высоких температур в печах / А.С. Сидорцев, В.А. Злобин // *Информатизация и системы управления в промышленности.* – 2019. – № 3 (81). – С. 56–59.
4. Автоматическое управление металлургическими процессами / А.М. Беленький, В.Ф. Бердников, О.М. Блинов, В.Ю. Каганов. – М.: *Металлургия*, 1989. – 384 с.
5. Епишин, А.В. Измерение температуры металла в печах станов горячей прокатки / А.В. Епишин, В.В. Кузнецов, Р.С. Бегинин // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. I Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2012) с междунар. участием, 29–30 марта 2012 г., [г. Екатеринбург].* – Екатеринбург: [УрФУ], 2012. – С. 46–50.
6. Шатохин, К.С. Совершенствование режимов нагрева металла в методических печах на основе развития экспериментальных методов исследования и информационно-теплотехнического моделирования: автореф. ... дис. канд. техн. наук / К.С. Шатохин. – М.: *МИСИС*, 1995. – 20 с.
7. Титаев, А.А. Совершенствование технологии нагрева горячедоформированных труб на основе анализа теплофизических процессов: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Титаев. – Екатеринбург: *УрФУ*, 2015. – 158 с.
8. Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович и др. – М.: *Металлургия*, 1981 – 196 с.
9. 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.

10. Парсункин, Б.Н. Изучение четырехзонной методической печи как объекта автоматического управления / Б.Н. Парсункин, Н.И. Иванов, А.В. Слесарев // *Сталь*. – 1975. – № 11. – С. 1056–1058.
11. Котов, К.И. Промышленные системы автоматизации металлургических агрегатов / К.И. Котов, М.А. Шершевер. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
12. К вопросу формирования импульса для системы автоматического регулирования теплового режима методических печей / Б.Н. Парсункин, В.И. Панферов, Г.Ф. Обухов и др. // *Теплотехника процессов выплавки стали и сплавов: межвуз. сб.* – Свердловск, 1984. – Вып. 8. – С. 119–124.
13. Парсункин, Б.Н. Энергосберегающий нагрев непрерывнолитых заготовок в нестационарных условиях работы методических печей / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов // *Сталь*. – 2014. – № 4. – С. 48–52.
14. Лисиенко, В.Г. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, Ю.К. Маликов. – М.: Металлургия, 1988. – 231 с.
15. Автоматизированная система контроля температуры нагревательной печи стана 2000 с применением микро-ЭВМ / А.Г. Картишевский, Л.И. Буглак, М.Б. Резников, М.Б. Каган // *Сталь*. – 1985. – № 1. – С. 90–92.
16. Капплер, Х. Промышленное измерение температуры в нагревательных и термических печах / Х. Капплер, Р. Клима, М. Шульте // *Черные металлы*. Пер. с нем. – 1996. – № 1. – С. 43–48.
17. Rudiger, A. Stock temperature in reheat furnaces / A. Rudiger // *Steel Times*. – 1989. – Vol. 217, no. 12. – P. 662.
18. Patent 4675826 USA. Temperatures control system / Charles B. Gentry, David R. Dietz, Granco-Clark Inc. – 1987.
19. Торопов, Е.В. Некоторые проблемы построения АСУ ТП нагревательных печей / Е.В. Торопов, В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1991. – № 2. – С. 93–96.
20. Панферов, В.И. Инструментально-расчетный контроль температуры металла в АСУ ТП методических печей / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1996. – № 8. – С. 63–66.
21. Панферов, В.И. Методы контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 10. – С. 57–61.
22. Панферов, В.И. Автоматизация протяжных термоагрегатов с ЭКН / В.И. Панферов, Г.П. Кулаченков, Ю.Н. Портсман // *Сталь*. – 1990. – № 2. – С. 75–77.
23. Бутковский, А.Г. Управление нагревом металла / А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.
24. Шупе, В. Опыт ведения процесса нагрева при помощи УВМ для различных типов печей и геометрических параметров загружаемых заготовок / В. Шупе // *Черные металлы*. Пер. с нем. – 1992. – № 8. – С. 14–20.
25. Автоматизированное задание температур зон печи с шагающими балками при помощи ПЭВМ / Ф. Кестер, Х.Й. Вик, А. Фунгини, Б. Пасторино // *Черные металлы*. Пер. с нем. – 1991. – № 11. – С. 15–22.
26. Лисиенко, В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, А.Л. Гончаров. – Киев: Наукова думка, 1984. – 230 с.
27. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
28. Гончаров, А.Л. Использование математической модели пламенной печи для разработки АСУ ТП нагрева металла / А.Л. Гончаров, В.Г. Лисиенко, И.М. Резник // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1991. – № 4. – С. 77–81.
29. Статистическое моделирование нагрева металла в проходных печах с учетом профиля греющей среды / С.П. Герасимов, С.Ю. Ефроймович, М.Д. Климовицкий, В.Н. Хлопонин // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1984. – № 9. – С. 115–117.
30. Горячая загрузка балочных заготовок в методическую печь толкательного типа на комбинированном прокатном стане / Г. Кламмер, Х.Й. Хайдемюллер, Б. Циммерман, Г. Лахман // *Черные металлы*. Пер. с нем. – 1998. – № 4. – С. 42–48.
31. Панферов, В.И. Моделирование нагрева окисляющихся слябов / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1994. – № 10. – С. 52–55.

32. Панферов, В.И. Выбор уставок регуляторов температуры нижних зон методических печей / В.И. Панферов, Е.В. Торопов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1991. – № 6. – С. 78–80.

33. Панферов, В.И. Оценка температурных полей массивных тел по наблюдаемым величинам процесса нагрева / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1988. – № 7. – С. 112–115.

34. Панферов, В.И. Оценка температуры массивного тела по измеряемым величинам процесса теплообмена / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, С.В. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 133–139. DOI: 10.14529/ctcr180116

35. Панферов, В.И. Об алгоритмах вычисления некоторых показателей качества нагрева массивных тел / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1988. – № 5. – С. 116–118.

36. Панферов, В.И. Алгоритмизация контроля качества нагрева металла в печах / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1989. – № 4. – С. 140–144.

37. Определение температурного состояния слябов перед прямой прокаткой на широкополосном стане с помощью математической модели / М.М. Сафьян, А.И. Молчанов, А.С. Солтан, В.П. Яланский // *Сталь*. – 1999. – № 8. – С. 37–40.

38. Определение конца отжига холоднокатаных рулонов 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.

Панферов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске; профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

Панферов Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Поступила в редакцию 6 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/met210408

TO THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF CONTROL OF METAL TEMPERATURE IN ACS TP OF METHODOICAL FURNACES

V.I. Panferov^{1,2}, tgsiv@mail.ru,
S.V. Panferov²

¹ Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Introduction. In the context of increasing requirements for the quality of metal heating before rolling, the task of improving the automated control systems for the technological process (APCS) of heating furnaces is quite urgent. **Purpose of the study.** To establish the most rational methods and procedures for solving the problem of metal temperature control within the framework of the automated process control system of methodical furnaces. **Materials and methods.** The analysis and generalization of literature data on the problem is carried out. Acceptable technical structures of control

subsystems are determined by means of a physical-technical approach. **Results.** A system is proposed that includes both a sensor for the temperature of the masonry or the temperature of the working space in the zone, and two pyrometers, one of which is connected to the metal located at the beginning of the zone, and the second – at its end section. Such a system, firstly, will determine the weighted average temperature of the metal in the zone, which is very important for the high-quality operation of automatic control systems (ACS) of the zone temperature regime, and, secondly, the systematic measurement error will be eliminated using a temperature sensor masonry or working space temperature. The reasons why it is preferable to use a radiation temperature sensor of the working space are indicated. Such corrected signals from the pyrometers can be used not only in the automatic control system of the temperature regime of the furnace zones, but, for example, to adapt the used heating models. The structure of the mathematical model is substantiated, suitable for the feedback loop of the process control system, the expediency of describing the heating of slabs by a one-dimensional heat conduction equation in combination with the zonal method of calculation and experimental tuning of external heat transfer models is shown. The characteristics of various algorithms for controlling the temperature fields of slabs are given. The admissibility of a conventionally symmetric description of the heating process is noted, due to the possibility of such a choice of settings (tasks) of the temperature regulators of the lower zones of the methodical furnaces, in which the dynamics of the average mass temperatures of the upper and lower halves of the slab will almost completely coincide. **Conclusion.** The results of the work can be used in the development and improvement of the automated process control system of heating furnaces.

Keywords: quality of metal heating before rolling, continuous furnace, slab surface temperature control, background radiation sensor, model for a feedback loop, automated control system.

References

1. Shupe V., Thaler G. [Review of the current state of control of furnaces using computer technology]. *Chernyye metally. Per. s nem.* [Ferrous metals. Translation from german], 1987, no. 20, pp. 9–14. (in Russ.)
2. Reinitzhuber F., Domels H.P. [Application of modern technologies in rolling mill furnaces]. *Chernyye metally. Per. s nem.* [Ferrous metals. Translation from german], 1990, no. 8, pp. 47–58. (in Russ.)
3. Sidortsev A.S., Zlobin V.A. [Measurement of high temperatures in ovens]. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti* [Informatization and Management Systems in Industry], 2019, no. 3 (81), pp. 56–59. (in Russ.)
4. Belen'kiy A.M., Berdnikov V.F., Blinov O. M., Kaganov V.Yu. *Avtomaticheskoye upravleniye metallurgicheskimi protsessami* [Automatic control of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 384 p.
5. Epishin A.V., Kuznetsov V.V., Beginin R.S. [Measurement of metal temperature in furnaces of hot rolling mills]. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2012) s mezhdunarodnym uchastiyem.* [Heat engineering and informatics in education, science and production: collection of reports of the I All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists (TIM'2012) with international participation, March 29–30, 2012]. Ekaterinburg, UrFU, 2012, pp. 46–50. (in Russ.)
6. Shatokhin K.S. *Sovershenstvovaniye rezhimov nagreva metalla v metodicheskikh pechakh na osnove razvitiya eksperimental'nykh metodov issledovaniya i informatsionno-teplotekhnicheskogo modelirovaniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* [Improvement of metal heating modes in continuous furnaces based on the development of experimental research methods and information and heat engineering modeling. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow, MISIS, 1995. 20 p.
7. Titaev A.A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii nagreva goryachedeformirovannykh trub na osnove analiza teplofizicheskikh protsessov: dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of the technology of heating hot-deformed pipes based on the analysis of thermophysical processes. Cand. sci. diss.]. Ekaterinburg, UrFU, 2015. 158 p.
8. Buglak L.I., Wolfman I.B., Efroimovich S.Yu., Zakharov G.K., Klimovitsky M.D, Segal A.M. *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechey* [Automation of methodical furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 196 p.

9. Parsunkin B.N., Panferov V.I., Leontiev A.I., Obrezkov V.A. [Automated control of heat load of continuous heating furnaces]. *Stal'* [Steel], 1982, no. 7, pp. 88–89. (in Russ.)
10. Parsunkin B.N., Ivanov N.I., Slesarev A.V. [Study of a four-zone methodical furnace as an object of automatic control]. *Stal'* [Steel], 1975, no. 11, pp. 1056–1058. (in Russ.)
11. Kotov K.I., Shershever M.A. *Promyshlennyye sistemy avtomatizatsii metallurgicheskikh agregatov* [Industrial automation systems for metallurgical units]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 256 p.
12. Parsunkin B.N., Panferov V.I., Obukhov G.F., Obrezkov V.A., Degtyarev V.V. [On the issue of impulse formation for the system of automatic control of the thermal regime of continuous furnaces]. *Teplotekhnika protsessov vyplavki stali i splavov: mezhvuzovskiy sbornik* [Heat engineering of steel and alloy melting processes: interuniversity collection]. Sverdlovsk, 1984, iss. 8, pp. 119–124. (in Russ.)
13. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U. [Energy-saving heating of continuously cast billets in non-stationary operating conditions of continuous furnaces]. *Stal'* [Steel], 2014, no. 4, pp. 48–52. (in Russ.)
14. Lisienko V.G., Volkov V.V., Malikov Yu.K. *Uluchsheniye toplivoispol'zovaniya i upravleniye teploobmenom v metallurgicheskikh pechakh* [Improving fuel utilization and heat transfer control in metallurgical furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 231 p.
15. Kartshevsky A.G., Buglak L.I., Reznikov M.B., Kagan M.B. [Automated system for controlling the temperature of the heating furnace of Mill 2000 using a micro-computer]. *Stal'* [Steel], 1985, no. 1, pp. 90–92. (in Russ.)
16. Kappler H., Klima R., Schulte M. [Industrial temperature measurement in heating and thermal furnaces]. *Chernyye metally. Per. s nem.* [Ferrous metals. Translation from german], 1996, no. 1, pp. 43–48. (in Russ.)
17. Rudiger A. Stock temperature in reheat furnaces. *Steel Times*, 1989, vol. 217, no. 12, p. 662.
18. Charles B. Gentry, David R. Dietz, Granco-Clark Inc. *Temperatures control system*. Patent 4675826 USA, 1987.
19. Toropov E.V., Panferov V.I. [Some problems of creating automated process control systems for heating furnaces]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1991, no. 2, pp. 93–96. (in Russ.)
20. Panferov V.I. [Instrumental and calculation control of metal temperature in the process control system of continuous furnaces]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1996, no. 8, pp. 63–66. (in Russ.)
21. Panferov V.I. [Metal temperature control techniques in automation of continuous furnaces]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 2002, no. 10, pp. 57–61.
22. Panferov V.I., Kulachenkov G.P., Portsman Yu.N. [Automation of broaching thermo-units with EKN]. *Stal'* [Steel], 1990, no. 2, pp. 75–77. (in Russ.)
23. Butkovskiy A.G., Malyy S.A., Andreyev Yu.N. *Upravleniye nagrevom metalla* [Metal heating control]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 272 p.
24. Shupe V. [Experience in conducting the heating process using the UVM for various types of furnaces and geometric parameters of the loaded blanks]. *Chernyye metally. Per. s nem.* [Ferrous metals. Translation from german], 1992, no. 8, pp. 14–20. (in Russ.)
25. Kester F., Vic H.J., Fungini A., Pastorino B. [Automated setting of temperatures of zones of a walking beam furnace using a personal computer]. *Chernyye metally. Per. s nem.* [Ferrous metals. Translation from german], 1991, no. 11, pp. 15–22. (in Russ.)
26. Lisienko V.G., Volkov V.V., Goncharov A.L. *Matematicheskoye modelirovaniye teploobmena v pechakh i agregatakh* [Mathematical modeling of heat transfer in furnaces and units]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1984. 230 p.
27. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoye modelirovaniye teplovoy raboty promyshlennykh pechey* [Mathematical modeling of the thermal performance of industrial furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 239 p.
28. Goncharov A.L., Lisiyenko V.G., Reznik I.M. [The use of a mathematical model of a combustion furnace for the development of an automated process control system for heating metal]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1991, no. 4, pp. 77–81. (in Russ.)
29. Gerasimov S.P., Efroymovich S.Yu., Klimovitskiy M.D., Khloponin V.N. [Statistical modeling of metal heating in continuous furnaces taking into account the profile of the heating medium]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1984, no. 9, pp. 115–117. (in Russ.)

30. Klammer G., Heidemüller H.J., Zimmerman B., Lachman G. [Hot loading of beam blanks into a pusher type continuous furnace on a combined rolling mill]. *Chernyye metally. Per. s nem.* [Ferrous metals. Translation from german], 1998, no. 4, pp. 42–48. (in Russ.)
31. Panferov V.I. [Simulation of heating of oxidizing slabs]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1994, no. 10, pp. 52–55. (in Russ.)
32. Panferov V.I., Toropov E.V. [The choice of the settings of the temperature regulators of the lower zones of the methodological furnaces]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1991, no. 6, pp. 78–80. (in Russ.)
33. Panferov V.I. [Estimation of the temperature fields of massive bodies from the observed values of the heating process]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1988, no. 7, pp. 112–115. (in Russ.)
34. Panferov V.I., Trenin N.A., Panferov S.V. Estimation of the temperature of a massive body by the measured values of the heat exchange process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 133–139. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180116
35. Panferov V.I. [Algorithms for calculating some indicators of the quality of heating of massive bodies]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1988, no. 5, pp. 116–118. (in Russ.)
36. Panferov V.I. [Algorithmization of quality control of metal heating in furnaces]. *The news of high schools. Ferrous metallurgy*, 1989, no. 4, pp. 140–144. (in Russ.)
37. Saf'yan M.M., Molchanov A.I., Soltan A.S., Yalanskiy V.P. [Determination of the temperature state of slabs before direct rolling on a broadband mill using a mathematical model]. *Stal'* [Steel], 1999, no. 8, pp. 37–40. (in Russ.)
38. 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, no. 2, pp. 44–46. (in Russ.)

Received 6 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панферов, В.И. К решению задачи контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 63–75. DOI: 10.14529/met210408

FOR CITATION

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, vol. 21, no. 4, pp. 63–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210408