

Ольшанский В.М., Гупало Е.В.*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЙ РАБОТОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

На основе аналитических решений задач нагрева тел в движущемся слое разработана упрощенная математическая модель кольцевой печи с вращающимся подом. Выполнены исследования различных способов управления тепловой работой печи в условиях переменной производительности трубопрокатного стана. Приведена сравнительная оценка экономичности рассмотренных способов управления.

Кольцевые печи проектировались в расчете на высокую производительность и стабильную работу трубопрокатных станов. Снижение уровня производства и переход на прокатку мелких партий труб с частой перестройкой станов привело к тому, что печи работают в режимах неполной загрузки с переменной производительностью, т. е. в условиях невыгодных по экономическим показателям. Снижение расхода топлива в такой ситуации может быть достигнуто на пути поиска рациональных режимов тепловой работы печей в зависимости от производительности трубопрокатных станов.

Особенностью конструкции кольцевых печей с вращающимся подом является рассредоточенный подвод топлива по длине отапливаемых зон и наличие зоны утилизации тепла (методической зоны), в которых условия движения газов и теплообмена заметно отличаются.

На основе аналитических решений задач нагрева тел в движущемся слое разработана математическая модель кольцевой печи.

Расчет нагрева в отапливаемых зонах производится при заданном графике изменения среднemasсовой температуры металла вдоль отапливаемых зон, обеспечивающeм требуемые конечные параметры нагрева металла на выдаче при соответствующей производительности печи. Математическая постановка задачи согласно [1] имеет вид:

-тепловой баланс по материалу

$$\frac{d\bar{t}_M}{d\tau} = \frac{\alpha k_1}{m R \rho_M C_M} (t_d - \bar{t}_M); \quad (1)$$

* Национальная металлургическая академия Украины
© В.М. Ольшанский, Е.В. Гупало, 2003

-тепловой баланс по газу

$$V_{\Gamma} V_{\text{д}} C_{\text{д}} \frac{dt_{\text{д}}}{d\tau} + (V_{\text{д}} C_{\text{д}} t_{\text{д}} - Q_{\text{н}}^{\text{р}} - Q_{\text{ф}}) \frac{dV_{\Gamma}}{d\tau} = \Pi C_{\text{м}} \frac{d\bar{t}_{\text{м}}}{d\tau} + \frac{K_{\text{кл}} F_{\text{кл}} \Pi}{M_{\text{м}}} t_{\text{д}}; \quad (2)$$

-закон изменения среднemasсовой температуры материала

$$\bar{t}_{\text{м}} = \beta_1 - (\beta_1 - \bar{t}_{\text{м1}}) \exp(-\beta_2 \tau). \quad (3)$$

Начальное условие: $\tau = 0, \bar{t}_{\text{м}} = \bar{t}_{\text{м1}}$.

Здесь τ – время, с; $t_{\text{д}}$ – текущая температура греющего газа, °С; α – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К); k_1, k_2, k_3 – коэффициенты формы тела, усреднения тепловых потоков и температур соответственно; $m = (k_3 - 1) \cdot Vi / (k_2 \cdot k_3) + 1$ – коэффициент массивности тела; $Vi = \alpha \cdot R / \lambda$ – число Био; R – радиус заготовки, м; λ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К); $\rho_{\text{м}}$ – плотность металла, кг/м³; $C_{\text{м}}$ – средняя удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К); V_{Γ} – текущий расход топлива, м³/с; $V_{\text{д}}$ – удельный выход продуктов сгорания, м³/м³; $C_{\text{д}}$ – средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м³·К); $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива, Дж/м³; $Q_{\text{ф}}$ – теплота, вносимая в печь с подогретым воздухом, Дж/м³; Π – производительность печи, кг/с; $K_{\text{кл}}$ – коэффициент теплопередачи через кладку печи, Вт/(м²·К); $F_{\text{кл}}$ – площадь поверхности кладки зоны теплообмена, м²; $M_{\text{м}}$ – масса нагреваемого в зоне металла, кг; β_1 и β_2 – коэффициенты аппроксимации кривой изменения среднemasсовой температуры материала, °С и с⁻¹ соответственно; $\bar{t}_{\text{м1}}$ – среднemasсовая температура металла на входе в отапливаемые зоны печи. Решение поставленной задачи приведено в работе [1].

В ходе расчета определяются распределение температуры продуктов сгорания и расхода топлива вдоль отапливаемых зон, а так же общий расход топлива на нагрев металла ($V_{\Gamma 0}$), температура ($t_{\text{д}0}$) и расход продуктов сгорания ($V_{\Gamma 0} V_{\text{д}}$) на входе в методическую зону.

Для расчета нагрева металла в методической зоне используется аналитическое решение задачи нагрева тел в противотоке при нелинейных граничных условиях с учетом потерь тепла рабочим пространством [2]. Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{k_1 - 1}{x} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} = \sigma_d (T_d^4 - T^4(R, \tau)); \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

$$T(x, 0) = T_{M0}; \quad (7)$$

$$V_{Г0} V_d C_d (T_{д0} - T_d) = PC_M (T_{МК} - \bar{T}_M) + K_p V_{Г0} V_d C_d (T_{д0} - T_d). \quad (8)$$

Начальные условия: $\bar{T}_M|_{\tau=0} = T_{M0}$, $\bar{T}_M|_{\tau=\tau_K} = \bar{T}_{M1}$, $T_d|_{\tau=\tau_K} = T_{д0}$.

Здесь $0 \leq x \leq R$ – координата тела, м; $a = \lambda / (\rho C_M)$ – коэффициент температуропроводности металла, м²/с; T_{M0} и $T_{д0}$ – температуры металла и греющего газа с которыми они вступают в теплообмен, °К; \bar{T}_{M1} – среднемассовая температура металла на выходе из методической зоны, °К; σ_d – приведенный коэффициент излучения продуктов сгорания, Вт/(м²·К⁴); $V_{Г0}$ – общий расход топлива на нагрев металла в отапливаемых зонах печи, м³/с; K_p – доля потерь тепла рабочим пространством методической зоны; τ_K – продолжительность нагрева металла в методической зоне, с. Решение задачи приведено в работе [2].

В ходе расчета определяются продолжительность нагрева металла в методической зоне (τ_K) до заданной температуры (\bar{t}_{M1}) и температура продуктов сгорания, уходящих из печи. В случае если расчетное значение продолжительности нагрева металла в методической зоне не соответствует его фактическому значению при заданной производительности печи, выполняется корректировка графика изменения среднемассовой температуры вдоль отапливаемых зон с уменьшением, либо увеличением начальной температуры металла \bar{t}_{M1} . Одновременно корректируются теплофизические свойства металла и продуктов сгорания, а так же коэффициенты теплообмена на расчетных участках печи (в методической и отапливаемых зонах).

Таким образом, при заданных конечных параметрах нагрева металла и законе изменения среднемассовой температуры по длине отапливаемых зон для данной производительности печи методом последовательных приближений производится стыковка решений двух задач на границе расчетных участков, в результате чего определяются общий расход топлива, его распределение по длине печи и температура уходящих продуктов сгорания.

В качестве объекта исследования выбрана кольцевая печь максимальной производительностью 65.7 т/ч, предназначенная для нагрева трубных заготовок перед прошивным прессом. Основные размеры

печи: средний диаметр— 24 м; ширина пода— 4.9 м; высота рабочего пространства 2.04 м; активная длина по среднему диаметру 70.68 м. Рабочее пространство печи разделено на четыре технологические зоны: не отапливаемую методическую зону длиной 16.49 м и три отапливаемых зоны общей длиной 54.19 м (1-я сварочная— 23.73 м, 2-я сварочная— 17.05 м и томильная зона— 13.41 м). На печи установлено 55 горелок типа ГНП. Подогрев воздуха до температур 200– 300 °С осуществляется в металлическом рекуператоре. Коэффициент рекуперации тепла— 0.3. При расчетах принято, что в печи нагреваются цилиндрические слитки диаметром 425 мм из Ст 20 до конечных температуры поверхности 1280 °С и перепада температур по сечению слитка 20 °С.

С использованием предложенной математической модели выполнены исследования трех способов управления тепловой работой печи при изменении ее производительности от 65.7 т/ч до 25 т/ч:

- 1) существующий способ управления при постоянной длине отапливаемых зон;
- 2) способ управления с изменением длины отапливаемых зон;
- 3) способ управления, обеспечивающий постоянство закона изменения среднемаховой температуры металла по длине отапливаемых зон независимо от производительности печи.

Существующий способ управления при постоянной длине отапливаемых зон осуществляется путем изменения температуры греющего газа по длине печи в зависимости от ее производительности. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Из рисунка видно, что при таком способе управления тепловой работой печи график изменения среднемаховой температуры по длине рабочего пространства изменяется. С уменьшением производительности с 65.7 т/ч до 25 т/ч температура металла на входе в отапливаемые зоны уменьшается с 580 °С до 440 °С.

Перевод печи с низкой производительности на более высокую должен осуществляться постепенно, в противном случае через некоторый промежуток времени возникнет необходимость остановки печи на подогрев.

Удельный расход условного топлива в зависимости от производительности печи показан на рис. 2 (кривая 1). Из рисунка видно, что для рассматриваемой печи минимальный расход условного топлива 50 кг/т обеспечивается при производительности печи 45 т/ч. Увеличение или уменьшение производительности печи сопровождается увеличением удельного расхода топлива.

Способ управления тепловой работой печи с изменением длины

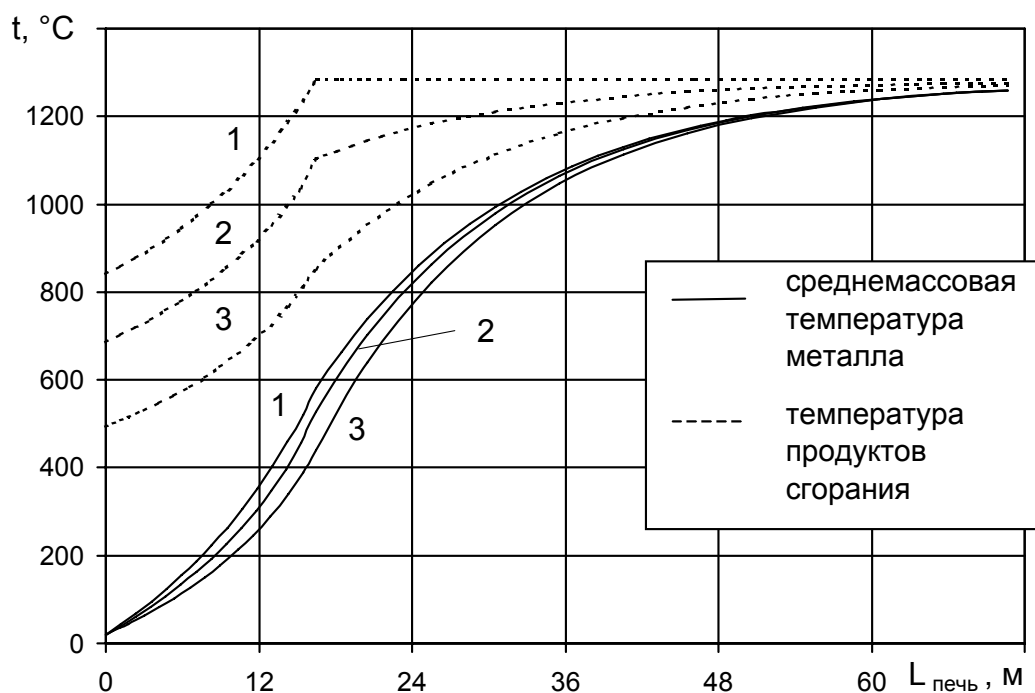


Рис. 1. Распределение температур по длине печи при существующем способе управления (способ 1).

Цифры у кривых соответствуют производительности печи:
1- 65.7 т/ч; 2- 45 т/ч; 3- 25 т/ч.

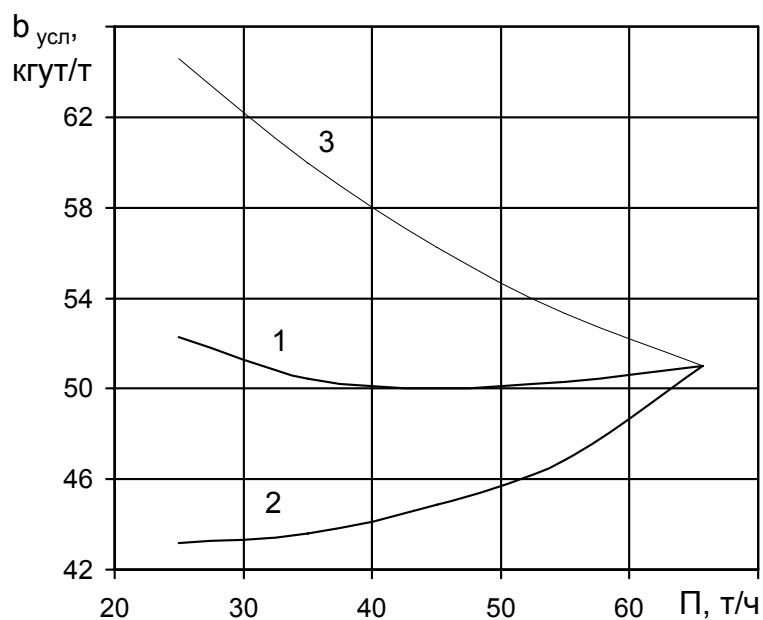


Рис. 2. Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи при различных способах управления.

Цифры у кривых соответствуют номеру способа управления

отапливаемых зон в зависимости от производительности обеспечивает минимальные расходы топлива [3]. Этот способ реализуется за счет отключения или включения либо части горелочных устройств, либо целых зон отопления. В остальных отапливаемых зонах поддерживается режим нагрева $t_d = \text{const}$. Таким образом, при снижении производительности печи общая длина отапливаемых зон сокращается, а длина методической зоны увеличивается и, как следствие этого, температура продуктов сгорания на выходе из печи снижается, что ведет к увеличению коэффициента использования топлива. Результаты расчетов распределения температур греющего газа и металла вдоль печи представлены на рис. 3, из которого видно, что с уменьшением производительности печи с 65.7 т/ч до 25 т/ч температура уходящего дыма снижается с 840 °С до 290 °С. Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи представлена на рис. 2 (кривая 2). Максимальная экономия топлива при производительности 25 т/ч по сравнению с предыдущим способом управления составляет 9.1 кгут/т. При производительности 45 т/ч – 5.15 кгут/т. Зависимость длины отапливаемых зон от производительности печи представлена на рис. 4, из которого видно, что длина отапливаемых зон в зависимости от производительности изменяется практически по линейному закону. Поэтому реализация этого способа управления не вызывает особых затруднений и не требует больших инвестиций. Следует отметить, что переход печи с низкой производительности на высокую требует более длительного переходного периода, т. е. печь имеет значительно большую инерционность, чем при управлении по первому способу.

Известно, что при любых колебаниях производительности печи для обеспечения требуемого качества нагрева необходимо, чтобы распределение среднemasсовой температуры металла вдоль печи не изменялось и соответствовало распределению при максимальной производительности. Расчеты показывают, что первый способ управления не позволяет выполнить это условие при уменьшении производительности печи, поскольку энтальпия и расход продуктов сгорания на выходе из отапливаемых зон недостаточны, для того, чтобы нагреть металл до заданной температуры на существующей длине методической зоны. Увеличение расхода греющего газа без изменения его температуры на выходе из отапливаемых зон может быть достигнуто за счет сжигания топлива в 1-ой сварочной зоне с повышенным коэффициентом расхода воздуха, что и реализуется в третьем способе управления тепловой работой печи при изменении ее производительности.

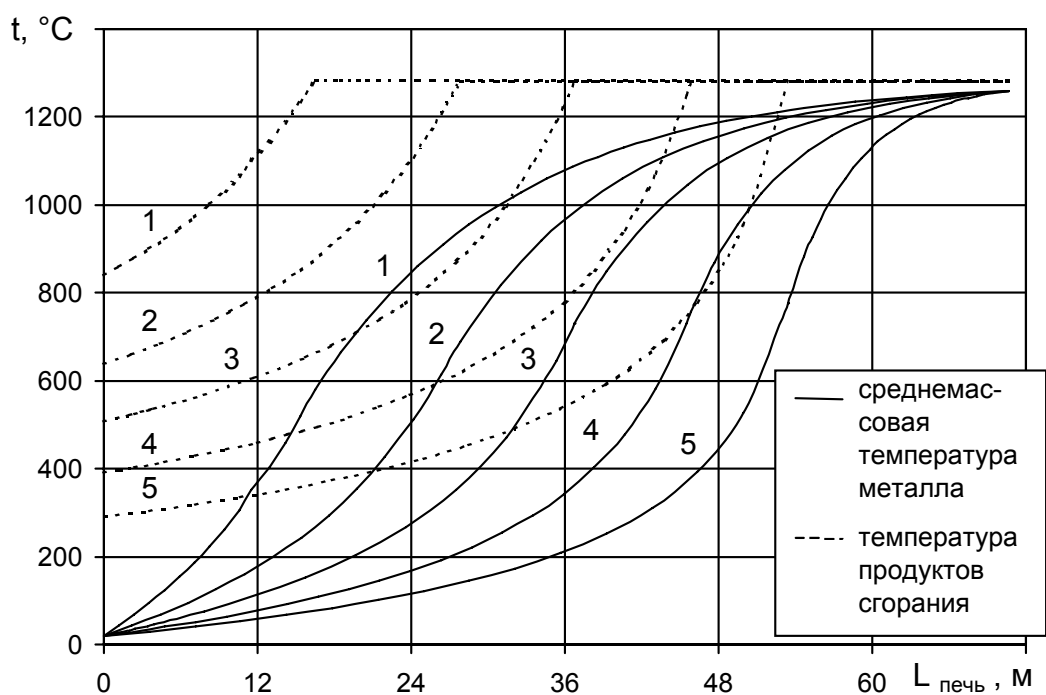


Рис. 3. Распределение температур по длине печи при способе управления 2.

Цифры у кривых соответствуют производительности печи:
 1- 65.7 т/ч; 2- 55 т/ч; 3- 45 т/ч; 4- 35 т/ч; 5- 25 т/ч.

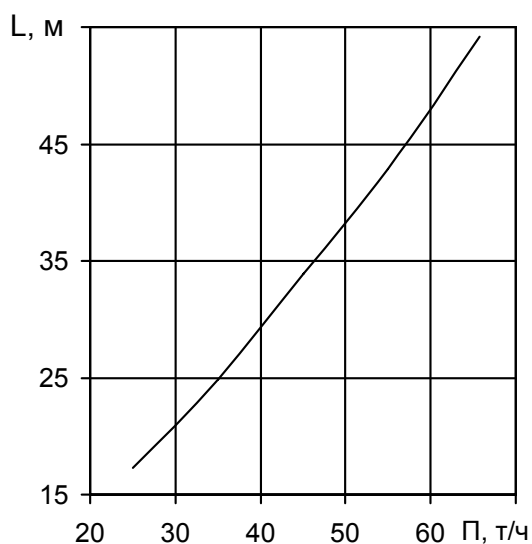


Рис. 4. Зависимость длины отапливаемых зон от производительности печи.

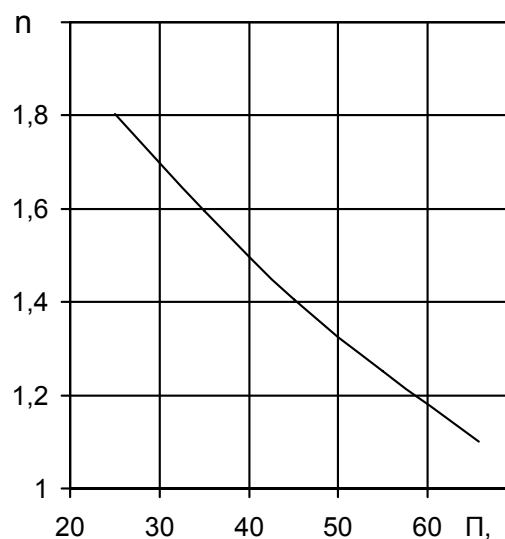


Рис. 5. Зависимость коэффициента расхода воздуха на первую отапливаемую зону от производительности печи.

Зависимость коэффициента расхода воздуха в 1-ой сварочной зоне от производительности печи приведена на рис. 5, из которого

видно, что для обеспечения постоянства распределения среднемассовой температуры металла вдоль печи при уменьшении производительности от 65.7 до 25 т/ч коэффициент расхода воздуха в 1-ой отапливаемой зоне увеличивается с 1.1 до 1.8.

Распределение температур вдоль печи в зависимости от ее производительности представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что температура уходящих из печи продуктов сгорания по сравнению с первым способом управления увеличивается тем больше, чем ниже производительность печи. Например, при производительности 45 т/ч эта разница составляет 70 °С, а при 25 т/ч – 130 °С.

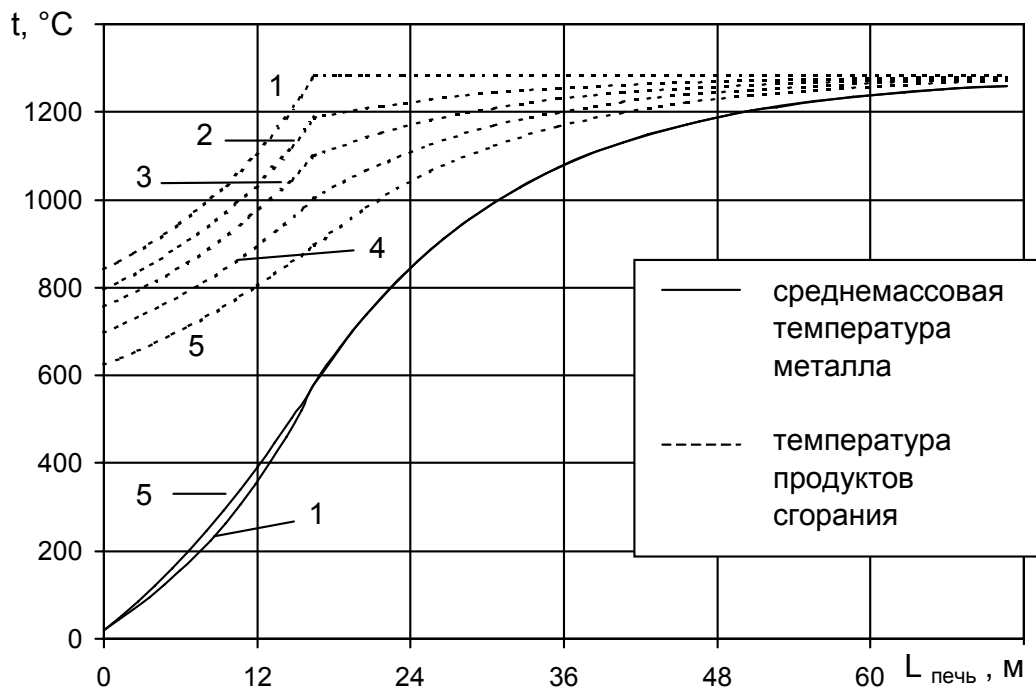


Рис. 6. Распределение температур по длине печи при способе управления 3.

Цифры у кривых соответствуют производительности печи:
1- 65.7 т/ч; 2- 55 т/ч; 3- 45 т/ч; 4- 35 т/ч; 5- 25 т/ч.

Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи при третьем способе управления представлена на рис. 2 (кривая 3). Из рисунка видно, что по сравнению с первым способом управления удельные расходы условного топлива при уменьшении производительности печи возрастают и достигают своего максимального значения 64.57 кг/т при 25 т/ч, что на 12.31 кг/т больше, чем при первом способе управления тепловой работой печи.

Реализация этого способа управления не вызывает затруднений, поскольку изменение коэффициента расхода воздуха в 1-ой отапливаемой зоне практически обратно пропорционально изменению про-

изводительности печи. Следует отметить, что такой способ управления тепловой работой печи является самым затратным с точки зрения расхода топлива и применение его оправдано лишь при нагреве дорогостоящих марок сталей, для которых необходимо высокое качество нагрева металла. Повышенные затраты на топливо в этом случае полностью или частично окупятся повышением качества продукции и выходом годного за счет снижения брака.

ВЫВОДЫ

Наиболее экономичным с точки зрения расхода топлива, является способ управления тепловой работой печи с изменением длины отапливаемых зон в зависимости от ее производительности. Применение его по сравнению с существующим способом управления при постоянной длине отапливаемых зон обеспечивает тем большую экономию топлива, чем ниже производительность печи. Однако этот способ повышает инерционность объекта управления при переводе его с низкой производительности на высокую.

Способ управления, обеспечивающий постоянное распределение среднemasсовой температуры металла по длине отапливаемых зон печи независимо от производительности, является практически безынерционным и позволяет выдерживать требуемое качество нагрева металла при колебаниях производительности в широком диапазоне, однако оказывается наиболее затратным, с точки зрения расхода топлива. Поэтому, применение этого способа управления экономически целесообразно, если дополнительные затраты на топливо окупаются за счет повышения качества продукции и выхода годного.

Внедрение рассмотренных способов управления тепловой работой кольцевых печей не требует больших инвестиций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольшанский В.М., Гупало Е.В. Нагрев тел в прямо- и противотоке с распределенным подводом теплоносителя по длине печи // Теория и практика металлургии.– Днепропетровск: ГМетАУ.– № 5.– 1999.– С. 24- 26.
2. Ольшанский В.М., Гупало Е.В. Нагрев тел излучением в прямо- и противотоке с учетом потерь тепла через кладку печи / Металлы и литье Украины.– 2000.– № 7- 8.– С. 23- 26.
3. Анализ режимов нагрева металла в проходных печах при переменном темпе нагрева/ Борбоц Ю.С., Гузов Л.А., Минаев А.Н., Ольшанский В.М., Розенгарт Ю.И.// Изв. вузов. Черная металлургия.– 1977.– № 10.– С. 147-150.