

И.Г. Яковлева, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

И.Н. Мных, ассистент

Е.Н. Барищенко, доцент, к.т.н.

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ В ТЕРМИЧЕСКИХ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПЕЧАХ ПРИ РЕВЕРСИВНОЙ ПОДАЧЕ ВОЗВРАТА

*Запорожская государственная инженерная академия*

Розглянуто вплив реверсивного методу управління рухом продуктів згорання на конвективний теплообмін у рециркуляційній печі. Одержано залежності для роз-рахунків швидкостей потоку продуктів згорання та коефіцієнта конвективної тепло-віддачі в робочому просторі рециркуляційної печі.

Рассмотрено влияние реверсивного метода управления движением продуктов сгорания на конвективный теплообмен в рециркуляционной печи. Получены зависи-мости для расчетов скоростей потока продуктов сгорания и коэффициента конвективной теплоотдачи в рабочем пространстве рециркуляционной печи.

*Введение.* Термическая обработка металла в рециркуляционных печах характеризуется появлением перепада температуры как по высоте садки стальных заготовок, так и по их сечению, наличие которого, в свою очередь, обусловлено неравномерным распределением температуры продуктов горения (греющей среды) в рабочем пространстве печных агрегатов.

В период нагрева заготовок имеет место высокая интенсивность теплообмена между садкой и продуктами горения, поскольку печь работает при максимальной мощности и скорость движения продуктов горения достаточно большая. В период вы-держки резко снижаются расходы топлива и воздуха. Как следствие, нарушается рециркуляционный контур, садка нагревается медленно и неравномерно.

В настоящее время для решения проблем, возникающих в период выдержки металла в печах данного типа, применяют импульсный способ подачи топлива, который позволяет при уменьшенных тепловых нагрузках сохранить максимальные мгновенные расходы продуктов горения, а, следовательно, их скорости и перемеще-вание.

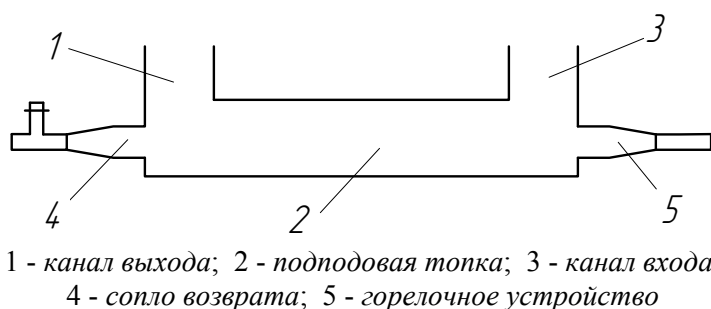
Однако при однонаправленном движении газов с использованием импуль-сной подачи наблюдается перепад температуры между входным и выходным каналами топки, а в случае применения многорядной садки – перепад температуры по высоте печи.

В связи с этим данную проблему предлагается решать путем управления ско-ростью перемещения продуктов горения и направлением их движения, то есть управ-лением теплообмена в рабочем пространстве термической печи.

*Постановка задачи.* Целью работы является улучшение качества тепловой обработки металла с помощью управления движением продуктов сгорания.

*Теоретические зависимости предложенного способа.* Реверсивный метод уп-равления движением продуктов горения по сравнению с однонаправленным является более совершенным, поскольку периодически изменяет направление теплоподвода по поверхности нагреваемого металла, тем самым обеспечивая более равномерный его нагрев [1]. Сочетание импульсной подачи топливоздушнoй смеси и реверса продуктов сгорания позволяет иметь наиболее положительный результат при выравнивании температуры в садке.

На рис. 1 представлена схема подподовой топки печи с использованием предложенного способа управления движением продуктов горения. Способ представляет собой попеременное поступление продуктов сгорания и возврата, то есть периодическое изменение движения газов.



**Рисунок 1** – Схема подподовой топки термической печи

В рабочем пространстве термических рециркуляционных печей конвективный теплообмен связан с омыванием обогреваемой садки стальных заготовок продуктами горения и осуществляется при вынужденном движении греющей среды [2].

Тепловой поток при конвективном теплообмене определяют по формуле:

$$Q_k = \alpha_k \cdot F_m \cdot (T_{cm} - T_m), \quad (1)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_m$  – площадь поверхности металла, м<sup>2</sup>;  $T_{cm}$  – температура смеси продуктов горения, омывающей металл, К;

$\dot{O}_{\tilde{n}i} = \frac{\dot{O}_c + \dot{O}_a \cdot [U + m \cdot (U + 1)]}{1 + U + m \cdot (U + 1)}$ ,  $T_c, T_a$  – температуры свежих продуктов сгорания и возврата

соответственно, К;  $U$  – первичная кратность рециркуляции;  $m$  – коэффициент возврата ( $m$  – доля в диапазоне 0...1 от расхода продуктов сгорания);  $T_m$  – температура поверхности металла, К.

Для определения значений коэффициента конвективной теплоотдачи использовано критериальное уравнение, описывающее теплоотдачу в рециркуляционной печи [3]:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{cm} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}}{d}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности смеси продуктов сгорания, Вт/(м·К),  $\lambda_{\tilde{n}i} = 1,2 \cdot 10^{-2} + 5,14 \cdot 10^{-5} \cdot \dot{O}_{\tilde{n}i}$ ;  $d$  – определяющий размер слоя газов, участвующих в теплообмене, в данном случае – зазора между кладкой печи и садкой металла, м;  $Re$  – критерий Рейнольдса, характеризующий режим движения смеси продуктов сгорания на поверхность заготовки,  $Re = W_{\partial.i.} \cdot d \cdot \rho_{\tilde{n}i} / \eta$ ;  $W_{p.n.}$  – скорость продуктов сгорания в рабочем пространстве, м/с;  $W_{\partial.i.} = V_{\tilde{n}i} / F_{\zeta}$ ,  $V_{cm}$  – расход смеси продуктов

сгорания в рабочем пространстве, м<sup>3</sup>/ч,  $V_{\tilde{n}i} = \Sigma V_{c0} \cdot (1 + \beta \cdot \dot{O}_{\tilde{n}i}) [U + m \cdot (1 + U) + 1] \cdot \chi$  [4],

$\Sigma V_{c0}$  – суммарный расход продуктов горения при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/ч;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, 1/К;  $\chi$  – коэффициент вторичной рециркуляции в рабочем пространстве печи;  $F_{\zeta}$  – площадь проходного сечения проточных зон рабочего пространства печи, м<sup>2</sup>;  $\rho_{cm}$  – плотность смеси продуктов сгорания, кг/м<sup>3</sup>,

$\rho_{\dot{n}i} = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot [1 + U + m \cdot (U + 1)]}{T_c + T_o \cdot U + T_a \cdot m \cdot (U + 1)}$ ,  $\rho_0$  – плотность продуктов сгорания при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;

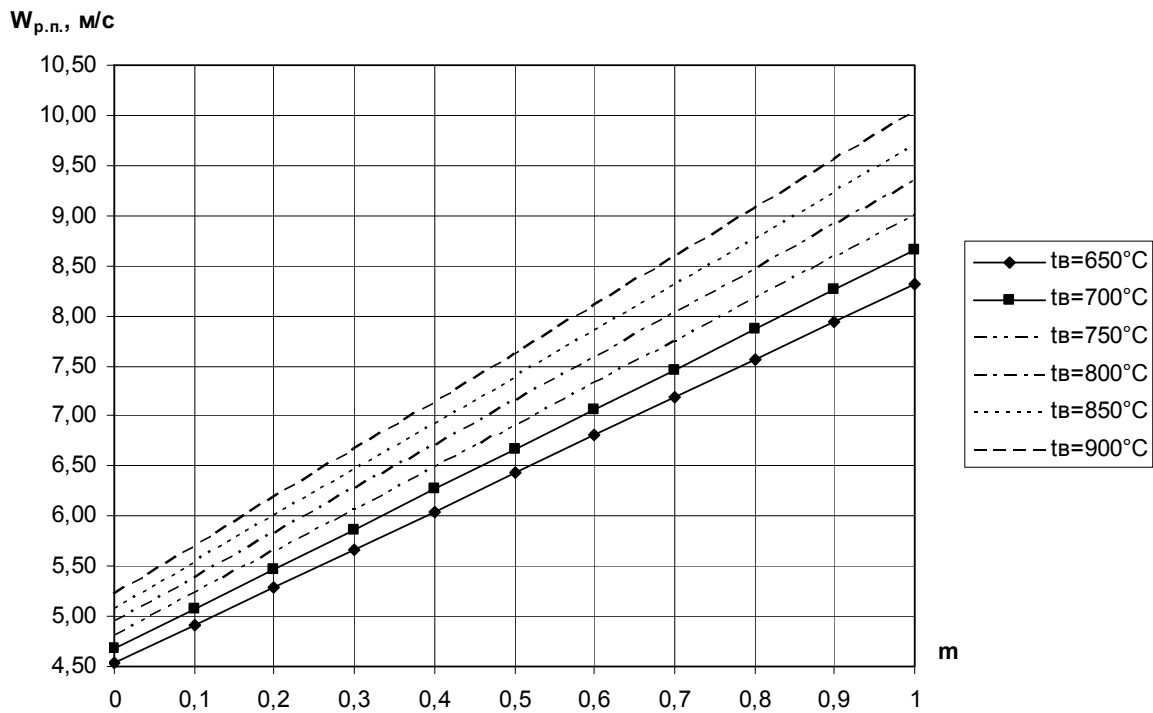
$\eta$  – коэффициент динамической вязкости смеси продуктов сгорания, кг/(м·с),

$\eta = \frac{669,08 \cdot 10^{-5}}{\dot{O}_{\dot{n}i} + 116} \cdot \sqrt{\left(\frac{\dot{O}_{\dot{n}i}}{273}\right)^3}$ ;  $Pr$  – критерий Прандтля, характеризующий

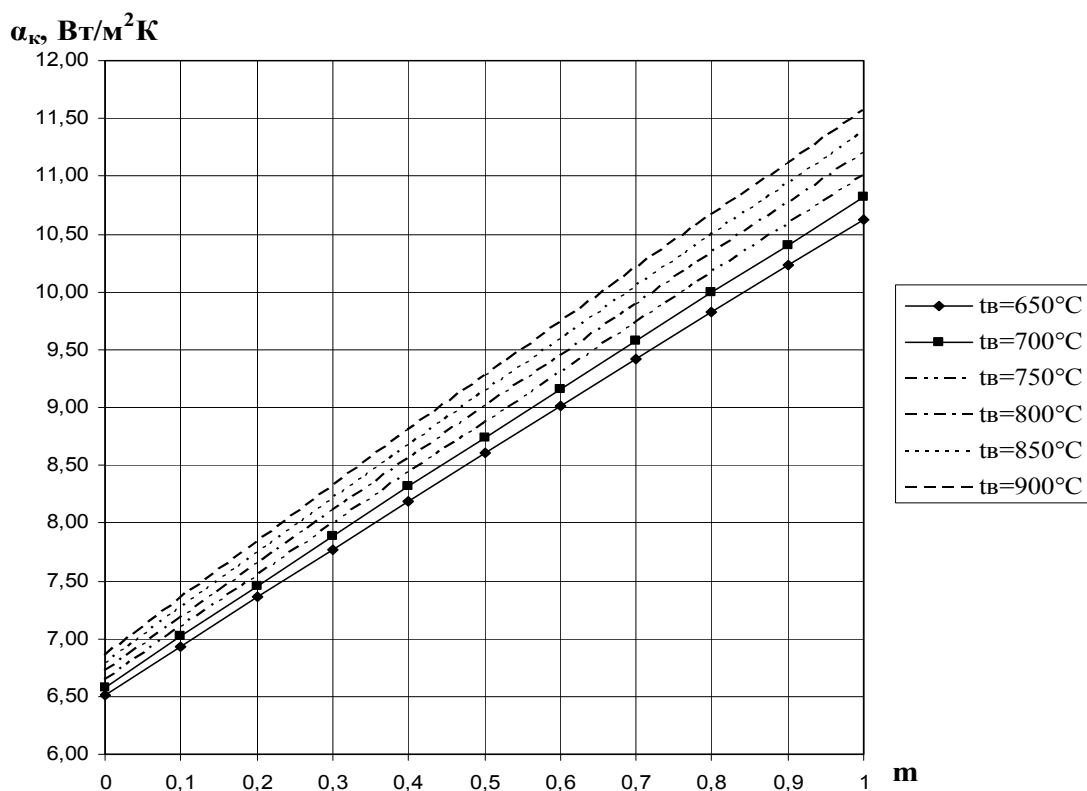
теплофизические свойства набегающего на металл теплоносителя при его температуре (тепловое число Прандтля для газов практически не зависит от температуры, давления и определяется только атомностью газов; для продуктов сгорания принимают  $Pr = 0,7$ ).

Для прямой зависимости  $\alpha_k$  от скорости движения продуктов горения формулу (2) представляют в виде:

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{см}}{d} \cdot \left( \frac{W_{п.н.} \cdot d \cdot \rho_{см}}{\eta} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4}. \quad (3)$$



**Рисунок 2** – Зависимость скорости движения в рабочем пространстве печи от коэффициента возврата при различной температуре возврата



**Рисунок 3** – Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи от коэффициента возврата при различной температуре возврата

Поскольку скорость продуктов сгорания в рабочем пространстве печи имеет линейную зависимость от коэффициента возврата, нагляднее представить  $\alpha_k$  как функцию от  $m$ . После подстановки численных значений [5] геометрических и температурных параметров для случая  $T_c = 1473$  К (как наиболее характерного) получены зависимости скорости движения продуктов сгорания в рабочем пространстве и коэффициента конвективной теплоотдачи от коэффициента возврата (рис. 2 и 3).

*Результаты теоретического эксперимента.* Установлено, что при достижении максимального значения коэффициента возврата скорость смеси продуктов сгорания и коэффициент конвективной теплоотдачи возрастают практически в два раза.

*Выводы.* Получены зависимости для расчета скоростей потока продуктов сгорания в рабочем пространстве и коэффициента конвективной теплоотдачи в рециркуляционной печи. Доказано влияние коэффициента возврата на скорость продуктов сгорания, и, соответственно, на коэффициент конвективной теплоотдачи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1171642 СССР, МПК<sup>4</sup> F 23 С 3/00. Рециркуляционная топка / Рыжков Г. М., Ченцов А. А., Пилипенко И. А. (СССР). – № 3681019/24-06; заявл. 28.12.83; опубл. 07.08.85. Бюл. № 29.
2. Металлургические печи. Теория и расчеты: [Учебник]. В 2 т. / В. И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. – Минск: Белорус. наука, 2007. – Т. 1. – 596 с.
3. Пуговкин А. У. Рециркуляционные пламенные печи в машиностроении / А. У. Пуговкин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 158 с.
4. Кравцов В. В. Новая концепция постановки и решения задачи оптимального управления тепловым режимом термических печей / В. В. Кравцов, А. И. Волошин, А. Б. Бирюков // Металургійна теплотехніка: збірник наукових праць НМетАУ. – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2006. – С. 173-181.
5. Технический отчет по теплотехнической наладке камерных термических печей №№ 9, 10, 12,

16-20, 22-24 площадью пода  $18,3 \text{ м}^2$  в термическом цехе ОАО «Днепроспецсталь». – Запорожье: ООО «Фирма ЗМС-93», 2003. – 188 с.

Стаття надійшла до редакції 22.12.2010 р.  
Рецензент, проф. О.І. Чепрасов