

*Бирюков А.Б. – канд. техн. наук, доц., ДонНТУ*

*Кравцов В.В. – д-р техн. наук, проф., ДонНТУ*

## **ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ ДЛЯ НАГРЕВА И ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ**

*Показано, каким образом усиление конвективного теплообмена влияет на улучшение теплотехнических характеристик работы высокотемпературной печи и сокращение расхода топлива на нагрев металла.*

Сегодня одним из самых актуальных вопросов повышения потенциала отечественного металлургического комплекса является сокращения удельного расхода энергоносителей на всех этапах передела. Особенно остро стоит вопрос снижения удельного расхода природного газа.

Одним из крупнейших потребителей природного газа на металлургических предприятиях являются печи для нагрева стальных слитков и заготовок под прокатку: нагревательные колодцы и методические печи, относящиеся к классу высокотемпературных печей [1]. Традиционно принято считать, что в высокотемпературных печах, в которых преобладает лучистый теплообмен, влияние конвективного теплообмена можно не учитывать.

Целью данной работы является исследование вопроса о том, насколько эффективным может оказаться влияние повышения доли конвективного теплообмена на показатели тепловой работы печей для нагрева заготовок и сокращение расхода газообразного топлива (в качестве такового обычно используется чистый природный газ или его смесь с коксовым или доменным газами).

Суммарный тепловой поток, падающий на поверхность нагреваемого металла, представляет собой сумму двух составляющих: лучистой и конвективной.

Как известно, лучистый тепловой поток, падающий на материал, может быть определен при помощи одного из следующих выражений:

$$q_l = C_\delta \cdot \left[ \left( \frac{T_\delta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right] = C_{печь} \cdot \left[ \left( \frac{T_{печь}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right] = C_{кл.м} \cdot \left[ \left( \frac{T_{кл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right],$$

где  $C_{\partial}$ ,  $C_{\text{печь м}}$ ,  $C_{\text{кл м}}$  – приведенные коэффициенты излучения для систем тел газ-кладка-металл, печь-металл, кладка-металл, соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\partial}$ ,  $T_{\text{печь}}$ ,  $T_{\text{кл}}$ ,  $T_{\text{н}}$  – температуры продуктов сгорания, печи, кладки и поверхности нагреваемого металла, соответственно, К.

Для определения приведенных коэффициентов излучения выше-названных систем тел в каждом конкретном случае известны специальные зависимости. Так для нагревательных колодцев применяют следующие выражения [2]:

$$C_{\partial} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\partial} \cdot \varepsilon_{\text{м}}}{\varepsilon_{\partial} + \varphi_{\text{км}} \cdot \varepsilon_{\text{м}} \cdot (1 - \varepsilon_{\partial})};$$

$$C_{\text{печь м}} = C_0 \cdot \frac{\varepsilon_{\text{м}} \cdot \varphi_{\text{мк}}}{1 - \varphi_{\text{мм}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}})};$$

$$C_{\text{км}} = C_0 \cdot \varepsilon_{\text{м}},$$

где  $C_0 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_{\partial}$ ,  $\varepsilon_{\text{м}}$  – степени черноты продуктов сгорания и поверхности материала, соответственно;  $\varphi_{\text{км}}$ ,  $\varphi_{\text{мм}}$  – угловые коэффициенты для систем тел кладка-металл и металл-металл, соответственно.

На практике степень черноты окисленной поверхности нагреваемого металла принимают, равной 0,8-0,85.

Для определения степени черноты газов используют следующую зависимость [3]:

$$\varepsilon_{\partial} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \xi \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

где  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ ,  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – степени черноты углекислоты и водяных паров, соответственно, определяются в зависимости от средней длины хода луча между поверхностями теплообмена  $S$ , парциального давления соответствующих компонентов и температуры продуктов сгорания по соответствующим номограммам [2];  $\xi$  – поправочный коэффициент, учитывающий неодинаковую степень влияния толщины газового слоя и парциального давления на энергию излучения водяных паров; определяется в зависимости от средней длины хода луча между поверхностями теплообмена  $S$ , парциального давления водяных паров по соответствующей номограмме.

Средняя длина хода луча между поверхностями теплообмена определяется как:

$$S = 3,6 \frac{V_{\partial}}{F_{\text{м}} + F_{\text{кл}}},$$

где  $V_{\partial}$  – объем камеры, заполненный газом, представляет собой разницу полного объема камеры и объема металла, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{м}}$ ,  $F_{\text{кл}}$  – поверхности металла и кладки, участвующие в лучистом теплообмене, м<sup>2</sup>.

Угловые коэффициенты для систем тел кладка-металл и металл-металл определяются следующим образом:

$$\varphi_{км} = \frac{F_M}{F_{кл} + F_M};$$

$$\varphi_{мк} = \frac{F_{кл}}{F_{кл} + F_M}.$$

Для последующих расчетов в данной работе использована представленная на рис. 1 зависимость приведенного коэффициента излучения системы тел газ-кладка-металл от температуры, полученная на основании приведенных выше зависимостей для геометрических характеристик и номинальных условий работы одного из агрегатов, относящихся к классу высокотемпературных печей.

Конвективный тепловой поток определяется при помощи закона Ньютона-Рихмана:

$$q_k = \alpha \cdot (t_d - t_n),$$

где  $\alpha$  – значение коэффициента конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности нагреваемого металла, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_d$ ,  $t_n$  – температуры продуктов сгорания и поверхности нагреваемого металла, °С.

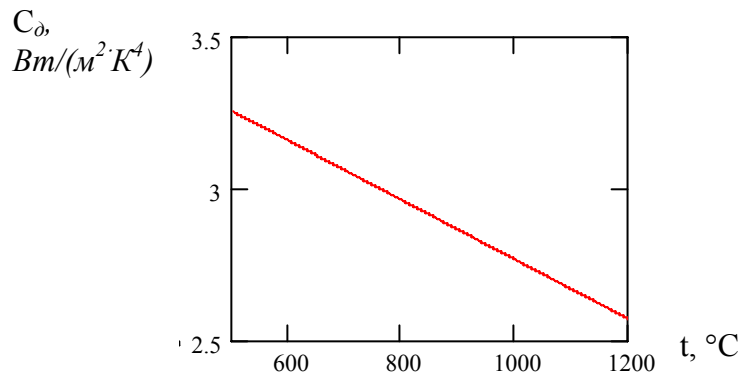


Рис. 1. Зависимость приведенного коэффициента излучения системы тел газ-кладка-металл от температуры для реального высокотемпературного агрегата

На конкретном примере проанализировано влияние конвективно-теплообмена на теплотехнические показатели работы печи. Для температуры поверхности металла 500 °С, с учетом зависимости коэффициента излучения системы тел газ-кладка-металл от температуры, приведенной на рис. 1, получены зависимости суммарной плотности теплового потока для трех уровней коэффициентов конвективной

теплоотдачи, полностью охватывающих диапазон возможных на практике значений (10, 20 и 30 Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

На рис. 2 для каждого из уровней представлены следующие кривые: плотность суммарного теплового потока, плотность лучистого теплового потока, плотность конвективного теплового потока. Анализ представленной информации позволяет заключить, что, несмотря на несомненное преобладание лучистого теплообмена, доля конвективного теплообмена может достигать 10 – 20 % даже в высокотемпературной области.

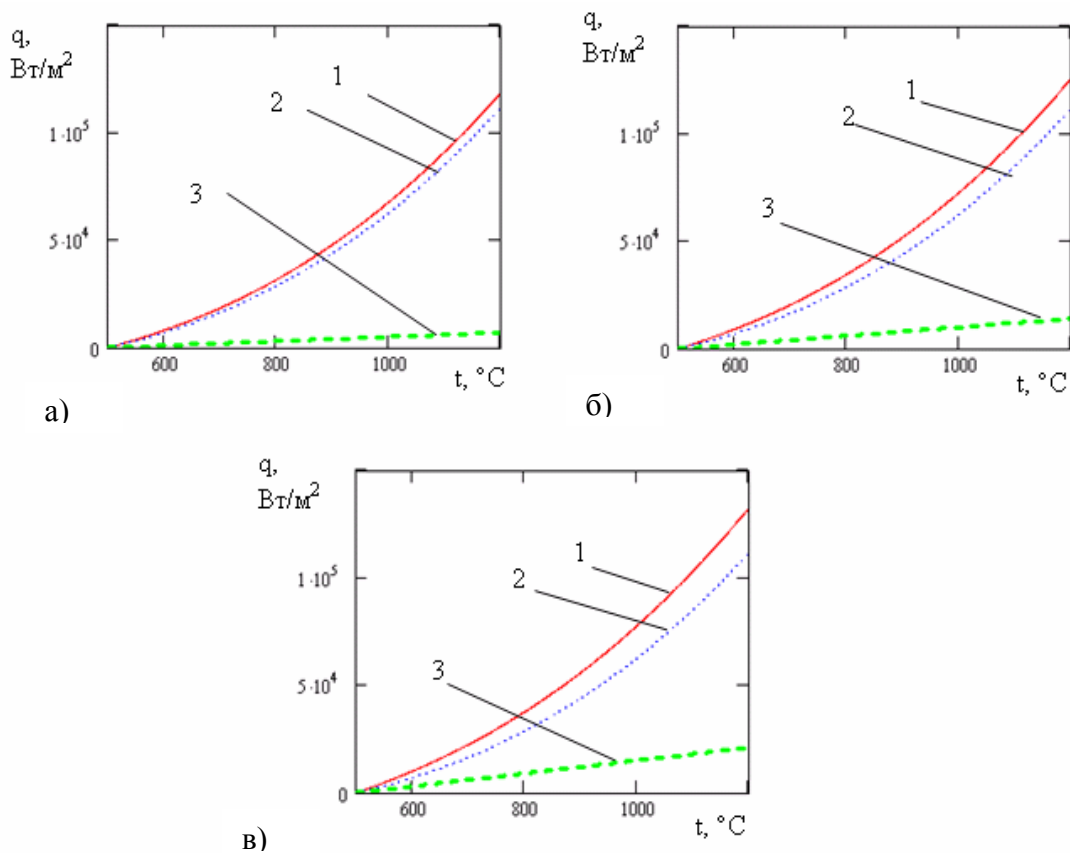


Рис. 2. Зависимость суммарного теплового потока на поверхность нагреваемого материала, а также лучистой и конвективной составляющих от температуры (1 – суммарный тепловой поток; 2 – лучистая составляющая теплового потока; 3 – конвективная составляющая теплового потока; а – при значении коэффициента конвективной теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К); б – при значении коэффициента конвективной теплоотдачи 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К); в – при значении коэффициента конвективной теплоотдачи 30 Вт/(м<sup>2</sup>·К))

Влияние значения конвективной теплоотдачи на уровень температуры продуктов сгорания, требуемый для достижения заданной плотности теплового потока, проиллюстрировано на рис. 3. На нем приведены кривые, описывающие зависимость суммарной плотности теплового потока от температуры для трех рассматриваемых уровней значений коэффициента конвективной теплоотдачи.

Из анализа представленной информации очевидно, что для достижения некоторой заданной плотности теплового потока при разных значениях коэффициента конвективной теплоотдачи требуются различные температуры продуктов сгорания. Так, например, при температуре поверхности материала  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  суммарная плотность теплового потока  $100\text{ кВт/м}^2$  достигается для значения  $\alpha_k = 10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  при температуре продуктов сгорания –  $1138\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; для значения  $\alpha_k = 20\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  при температуре продуктов сгорания –  $1114\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; для значения  $\alpha_k = 30\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  при температуре продуктов сгорания –  $1090\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

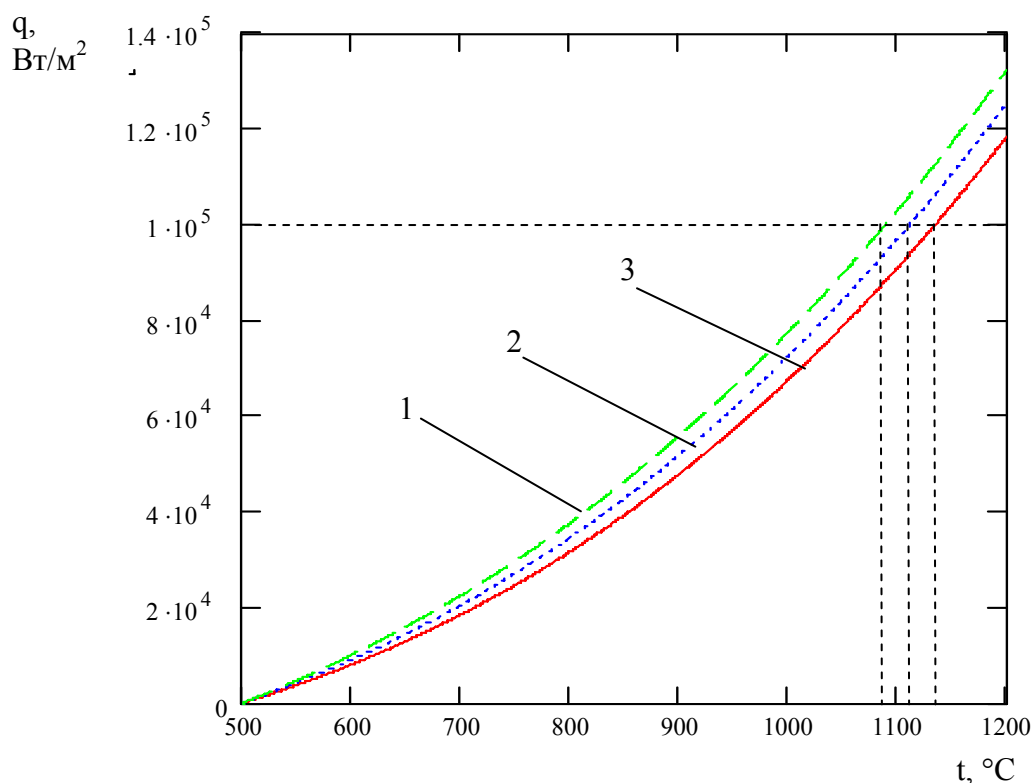


Рис. 3. Иллюстрация влияния интенсивности конвективного теплообмена в печи на требуемый уровень температуры продуктов сгорания для обеспечения заданного теплового потока (1 – при значении коэффициента конвективной теплоотдачи  $30\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ; 2 – при значении коэффициента конвективной теплоотдачи  $20\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ; 3 – при значении коэффициента конвективной теплоотдачи  $10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ )

Текущие значения коэффициента использования топлива определяются следующим образом:

$$\eta = \frac{Q_n^p - V_{yx} \cdot c^{tyx} \cdot t_{yx} \cdot (1 - k_r)}{Q_n^p},$$

где  $Q_n^p$  – теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $V_{yx}$  – выход продуктов сгорания с 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c^{tyx}$  – средняя теплоемкость продуктов сгорания, покидающих камеру при их температуре, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);  $t_{yx}$  – температура продуктов сгорания, покидающих камеру, °С;  $k_r$  – коэффициент рекуперации (доля теплоты уходящих из рабочей камеры продуктов сгорания, возвращаемая в нее с подогретым в рекуператоре воздухом, идущим на сгорание топлива).

Принята следующая зависимость теплоемкости продуктов сгорания от температуры (кДж/(м<sup>3</sup>·К)):  $c_o(t) = 1.348 + 1.65 \cdot 10^{-4} \cdot t$ .

Приняв значение коэффициента рекуперации 0,2 и выход продуктов сгорания с единицы топлива 12 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (для природного газа), получим следующие значения коэффициентов использования топлива для температур 1090, 1114 и 1138 °С, соответственно: 0,543, 0,532 и 0,521.

Текущий расход топлива определяется следующим образом:

$$V = \frac{q \cdot F_m + Q_{пот}}{\eta \cdot Q_n^p}, \quad (1)$$

где  $Q_{пот}$  – мощность потерь тепла камерой печи, кВт.

Если считать, что значение коэффициента конвективной теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К) является базовым, то его повышение до 20 и 30 Вт/(м<sup>2</sup>·К), как видно из зависимости (1), позволяет сократить текущий расход топлива на 2,1 и 4,2 %, соответственно. Необходимо отметить, что этот результат достигается при сохранении скорости нагрева металла (тепловой поток 100 кВт/м<sup>2</sup> и температура поверхности металла 500 °С).

На практике конкретные текущие значения сокращения расхода топлива зависят от требуемых значений тепловых потоков, температуры поверхности металла, состава продуктов сгорания, геометрических и оптических характеристик печи и садки, а также конкретных значений коэффициентов конвективной теплоотдачи.

Приведенные в качестве примера уровни повышения коэффициента конвективной теплоотдачи, а, соответственно, и экономия топлива дают усредненное представление о том, какие результаты могут быть реально достигнуты на практике.

Исходя из вышесказанного, при конструировании новых печных агрегатов и реконструкции существующих целесообразно применять

технические решения, позволяющие существенно поднять уровень значений конвективной теплоотдачи. В качестве таковых можно рекомендовать многоструйную атаку продуктами сгорания поверхности металла, колебательный характер подачи топлива и воздуха. Кроме того, усиление перемешивания способствует более равномерному нагреву металла и, соответственно, улучшает условия последующей обработки давлением.

### **Выводы**

В работе показано, каким образом усиление конвективного теплообмена в печи влияет на улучшение теплотехнических характеристик работы печи и сокращение расхода топлива. Показанный уровень экономии топлива до 4 % при нагреве заготовок под прокатку с сохранением заданной скорости нагрева является достаточно весомым в рамках отечественной отрасли.

### **Список литературы**

1. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургия, 1962. – 568 с.
2. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчета и проектирования, 2-е издание дополненное и переработанное.– М.: Металлургия, 1975.– 368 с.
3. Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Вопросы тепло- и массообмена в материалах, нагрева и охлаждения металла: Учебн. пособие. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. –162 с.

*Рукопись поступила 28.05.2009 г.*