

## Исследование перспектив экономии топлива на реализацию операций тепловой обработки металла за счет интенсификации конвективного теплообмена

Созданы расчетные зависимости для определения значений коэффициента конвективной теплоотдачи, согласно которым можно достичь заданной относительной экономии топлива при сохранении темпа тепловой обработки (по сравнению с конкретной ситуацией, характеризуемой базовым набором конструктивных и технологических параметров). Показано, что получаемая при этом относительная экономия топлива за счет снижения температуры уходящих газов в практических условиях для высокотемпературных агрегатов не может быть более 5-10 %.

**Ключевые слова:** тепловая обработка, конвективный теплообмен, интенсификация, темп нагрева, расход топлива

Снижение расхода топливно-энергетических ресурсов на реализацию операций тепловой обработки металла – одна из наиболее актуальных задач на современном этапе развития металлургической теплотехники [1].

Известно, что сокращение расхода топлива можно осуществить за счет повышения средневзвешенного значения коэффициента использования топлива за процесс нагрева и сокращения потерь тепла рабочей камерой [1-3]. Для увеличения этого коэффициента в общем случае можно использовать такие инструменты, как сокращение количества продуктов сгорания, покидающих печь; увеличение коэффициента рекуперации [4]; снижение температуры продуктов сгорания на выходе из рабочей камеры печи.

Расход топлива на реализацию тепловой обработки металла в печи периодического действия можно определить по формуле

$$V = \frac{mc\Delta t + Q_{\text{пот}}\tau_{\text{н}}}{\eta_{\text{св}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса нагреваемого металла, кг;  $c$  – средняя теплоемкость нагреваемого металла для интервала температур тепловой обработки, Дж/(кг·°С);  $\Delta t$  – требуемое повышение среднemasсовой температуры, °С;  $Q_{\text{пот}}$  – средняя мощность теплотерь рабочей камеры за период нагрева, Вт;  $\tau_{\text{н}}$  – время нагрева металла, с;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>.

Средневзвешенное значение коэффициента использования топлива определяют в зависимости от текущих коэффициентов, соответствующих им средних тепловых потоков и времени действия данных сочетаний. Однако очевидно, что для увеличения средневзвешенного коэффициента использования топлива необходимо, чтобы возрастали текущие коэффициенты, которые определяют из выражения

$$\eta = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} - V_{\text{yx}} c_{\text{yx}}^t t_{\text{yx}} (1 - k_r)}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (2)$$

где  $k_r$  – коэффициент рекуперации;  $V_{\text{yx}}$  – количество

продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру печи и приходящееся на единицу топлива (при отсутствии присосов численно равно выходу продуктов сгорания от горения 1 м<sup>3</sup> топлива при заданном значении коэффициента расхода воздуха), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{yx}}^t$  – средняя теплоемкость продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, при их температуре, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{\text{yx}}$  – температура продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, °С.

Каждое из этих направлений снижения расхода топлива в настоящее время в достаточной мере проработано на теоретическом и практическом уровнях. Вопрос об оценке предельных эффектов, которых можно достичь при работе по каждому из названных направлений, достаточно важен.

*Цель работы* – перспективы получения экономии топлива, достигаемой при снижении температуры уходящих продуктов сгорания на примере случая, когда темп тепловой обработки сохраняется за счет интенсификации конвективного теплообмена.

С целью решения вопроса о том, какой именно должна быть температура уходящих газов для достижения заданного уровня экономии топлива при сохранении производительности агрегата, предложено следующее соотношение:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{Q_{\text{нр}} - V_{\text{yx}}(1 - k_r(V_1, F))c_{\text{yx}}(t_{1\text{yx}})t_{1\text{yx}}}{Q_{\text{нр}} - V_{\text{yx}}(1 - k_r(V_2, F))c_{\text{yx}}(t_{2\text{yx}})t_{2\text{yx}}}, \quad (3)$$

где  $V_1, V_2$  – расходы топлива по базовому и предлагаемому режимам отопления, м<sup>3</sup>/с;  $k_r(V, F)$  – зависимость коэффициента рекуперации от расхода топлива (и соответственно расходов воздуха и продуктов сгорания) и поверхности теплообмена рекуператора [4];  $t_{1\text{yx}}, t_{2\text{yx}}$  – температуры продуктов сгорания, покидающих печь при базовом и предлагаемом режимах, °С.

При составлении выражения (3) использовано предположение, согласно которому мощность теплотерь рабочей камеры остается неизменной. Такой подход дал возможность получить простую

расчетную зависимость для анализа влияния снижения температуры уходящих продуктов сгорания на расход топлива и значение коэффициента использования топлива. Однако нужно иметь в виду, что в действительности существует две противоположные тенденции, которые могут повлиять на величину теплопотерь рабочей камеры: снижение температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи (определяет снижение потенциала теплопотерь); интенсификация теплообмена в камере печи (нацелена на сохранение темпа нагрева материала), которая должна привести к росту теплопотерь. Предложенная зависимость (3) дает возможность произвольного момента работы по базовому режиму нагрева вычислить требуемое значение температуры уходящих газов, переход на которое позволил бы достичь заданный уровень моментальной экономии топлива. Для решения уравнения (3) необходимо задать расход топлива  $V_2$ , соответствующий заданному уровню экономии топлива, и найти величину  $t_{2yx}$ .

В качестве базового значения температуры уходящих продуктов сгорания принято значение 1200 °С. Рассмотрено три варианта с условно выбранными керамическими рекуператорами площадью поверхности нагрева 500, 300 и 100 м<sup>2</sup> с применением их динамических тепловых характеристик (рис. 1).

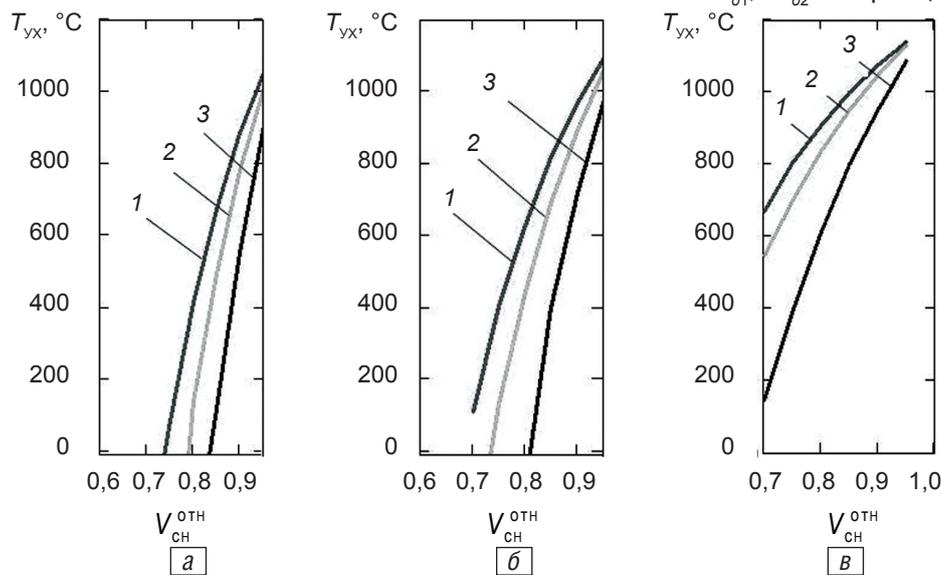


Рис. 1. Требуемая температура уходящих продуктов сгорания для достижения заданной экономии топлива с сохранением неизменной производительности с поверхностью рекуператора (м<sup>2</sup>): 500 (а); 300 (б); 100 (в) и расходом топлива (м<sup>3</sup>/с): 1 – 0,5; 2 – 0,3; 3 – 0,1

Анализ данных дает возможность сделать вывод о том, что снижение температуры уходящих продуктов сгорания как отдельное мероприятие вряд ли приведет к экономии топлива более 5-10 %, так как температура продуктов сгорания в каждый момент времени должна быть выше температуры поверхности нагреваемого металла, а для достижения заданного темпа тепловой обработки (даже при интенсификации теплообмена) разница температур греющей среды и нагреваемого металла должна быть существенна. Кроме того, очевидно (рис. 1), что эффект роста коэффициента использования топлива и соответственно сокращения расхода топлива только за

счет снижения температуры уходящих газов в относительном выражении, при прочих равных условиях, легче достичь для больших расходов топлива и меньших значений коэффициента рекуперации.

Для сохранения темпа тепловой обработки при снижении температуры уходящих продуктов сгорания необходима интенсификация теплообмена, и при этом должно выполняться условие

$$q = \alpha_{k1}(t_{1yx} - t_{nm}) + C_{\partial 1}(t_{1yx}) \times \left[ \left( \frac{t_{1yx} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{nm} + 273}{100} \right)^4 \right] = \alpha_{k2}(t_{2yx} - t_{nm}) + C_{\partial 2}(t_{2yx}) \times \left[ \left( \frac{t_{2yx} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{nm} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где  $\alpha_{k1}$ ,  $\alpha_{k2}$  – значения коэффициентов конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности нагреваемого материала в камере печи для базового и предлагаемого режимов нагрева, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{1yx}$ ,  $t_{2yx}$ ,  $t_{nm}$  – температуры продуктов сгорания в печи по базовому и предлагаемому режимам, а также поверхности нагреваемого материала соответственно, °С;  $C_{\partial 1}$ ,  $C_{\partial 2}$  – приведенные коэффициенты излучения

для системы тел газ-кладка-материал базового и предлагаемого режимов нагрева, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Согласно (4) задачу сохранения заданной плотности теплового потока, передаваемой поверхности металла, и соответственно темпа нагрева можно решить за счет интенсификации только конвективной либо только лучистой теплопередачи или при одновременном их усилении. В данной работе проанализирован вопрос усиления исключительно конвективной составляющей.

Для прямого определения коэффициентов теплоотдачи, которые дают возможность выполнить условие сохранения темпа нагрева для температуры  $t_{2yx}$  (определенной по (3) и соответствующей заданному уровню экономии топлива), предложена следующая зависимость:

$$\alpha_{k2} = \frac{q(t_{nm}) - C_{\partial}(t_{2yx}) \left[ \left( \frac{t_{2yx} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{nm} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{2yx} - t_{nm}}, \quad (5)$$

где  $q(t_{nm})$  – зависимость итоговой плотности теплового потока, падающего на поверхность материала, от температуры его поверхности (зависимость взята из базовой технологии нагрева и поддерживается на

том же уровне для разрабатываемого экономического варианта).

Решение зависимостей (3) и (5) привело к получению информации, представленной на рис. 2. При этом использованы те же исходные данные, что и при получении результатов по рис. 1.

Анализ всей информации с учетом достигаемых на практике значений коэффициентов конвективной теплоотдачи от газообразных сред (даже при наиболее благоприятных условиях они не превышают 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К) – для печей эта величина составляет 10-25 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) дает возможность заключить, что более реализуемым является процесс получения экономии топлива за счет интенсификации конвективного теплообмена в начальные периоды нагрева с более низкой температурой поверхности нагреваемого материала.

Также очевидно, что достижение экономии топлива более 5-10 % при сохранении темпа нагрева для любой температуры поверхности нагреваемого металла только за счет усиления конвективной составляющей теплообмена реализовать сложно. Итак, можно сделать вывод о том, что при конструировании новых печных агрегатов и реконструкции существующих целесообразно применять технические решения, позволяющие существенно поднять уровень значений конвективной теплоотдачи. В качестве таких 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

Получены новые аналитические выражения для определения значений коэффициента конвективной теплоотдачи, при которых достигается заданная относительная экономия топлива при сохранении темпа тепловой обработки. Обосновано, что в реальных условиях эксплуатации высокотемпературных печных агрегатов реальная экономия топлива за счет интенсификации конвективного теплообмена не превышает 5-10 %.

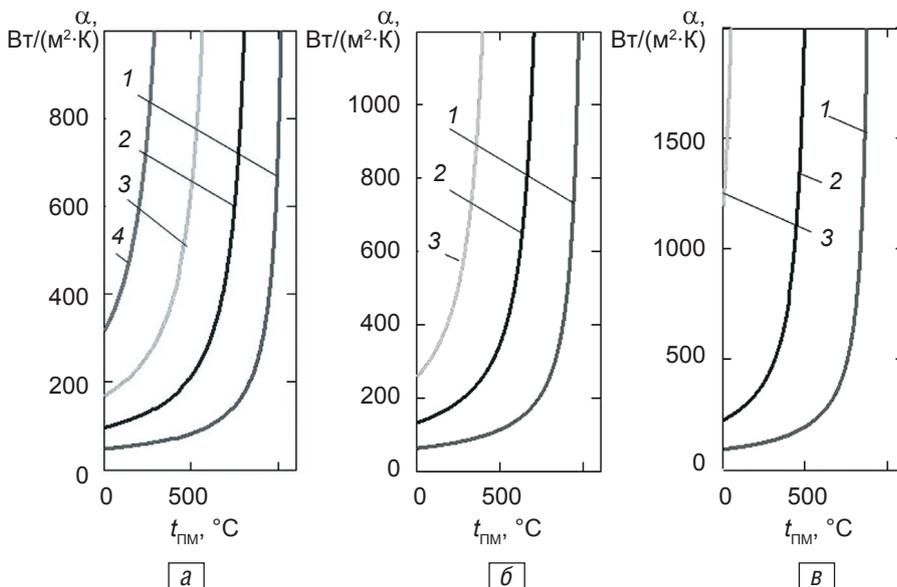
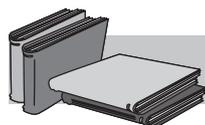


Рис. 2. Требуемое значение коэффициента конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к нагреваемому материалу для достижения заданного уровня экономии топлива в зависимости от температуры поверхности обрабатываемого материала: расход топлива (м<sup>3</sup>/с) – 0,5 (а); 0,3 (б); 0,1 (в); экономия топлива (%) – 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; поверхность нагрева рекуператора – 500 м<sup>2</sup>



## ЛИТЕРАТУРА

1. Губинский В. И. *Металлургические печи: учеб. пособие.* – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.
2. Бирюков А. Б. *Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах.* – Донецк: Ноулидж, 2012. – 250 с.
3. Бирюков А. Б., Кравцов В. В., Некрасова И. Ю. Анализ эффективности реконструкции футеровки нагревательных и термических печей // *Металлургическая теплотехника.* – 2011. – Вып. 3 (18). – С. 10-17.
4. Бирюков А. Б., Кравцов В. В., Косолюкин Д. А. Анализ мероприятий по повышению эффективности тепловой работы рекуператоров нагревательных печей // *Металл и литье Украины.* – 2011. – № 7. – С. 11-15.

### Анотація

Бірюков О. Б.

Дослідження перспектив економії палива на реалізацію операцій теплової обробки металу за рахунок інтенсифікації конвективного теплообміну

Створено розрахункові залежності для визначення коефіцієнту конвективної тепловіддачі, відповідно до яких можливо досягти заданої відносної економії палива при збереженні темпу теплової обробки (у порівнянні з конкретною ситуацією, що характеризується базовим набором конструктивних та технологічних параметрів). Показано, що економія, яку отримують при цьому за рахунок зниження температури газів, що йдуть, в практичних умовах для високотемпературних агрегатів не може перевищувати 5-10 %.

**Ключові слова**

теплова обробка, конвективний теплообмін, інтенсифікація, темп нагрівання, витрати палива

**Summary**

*Birukov A. B.*

Research of fuel economy prospects for metal heat processing operations realization due to convective heat exchange intensification

*Set of calculation dependences for determining value of heat transfer coefficient that allows achieving specified relative fuel economy with saving heat processing speed as compared with concrete situation which is characterized by base set of constructive and technological parameters is created. It is proved that relative fuel economy that can be achieved in this case due to leaving waste gases temperature decrease cannot be more than 5-10 % for high-temperature aggregates.*

**Keywords**

*heat processing, convective heat exchange, intensification, heating speed, fuel flow rate*

Поступила 30.07.13

**Предлагаем разместить в нашем журнале  
рекламу продукции или рекламного материала  
о Вашем предприятии**

**РАСЦЕНКИ НА РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ**  
(цены приведены с учетом налога на рекламу)

2, 3-я страницы обложки		страница внутри журнала	
цветная	1400 грн.	цветная	1050 грн.
черно-белая	700 грн.	черно-белая	500 грн.
1/2 страницы формата		1/2 страницы формата А4	
цветная	900 грн.	цветная	800 грн.
черно-белая	500 грн.	черно-белая	450 грн.
1/4 страницы формата		1/4 страницы формата А4	
цветная	550 грн.	цветная	300 грн.
черно-белая	300 грн.	черно-белая	200 грн.

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %