

УДК 519.2

**А. Д. ДИМИТРОВ**, канд. техн. наук, доц.; доц. ОНПУ, Одесса;  
**А. Н. ШРАМЕНКО**, аспірант ОНПУ, Одесса;  
**В. А. ПЯДУХОВ**, інженер ОНПУ, Одесса

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Рассмотрено влияние предварительного подогрева материала и подогрева компонентов горения за счёт теплоты уходящих газов на экономию топлива в промышленных печах при известных значениях коэффициента регенерации и коэффициента полезно использованной теплоты рабочей камеры. В выводах сделаны рекомендации по выбору целесообразного способа внутреннего использования теплоты уходящих из рабочей камеры продуктов сгорания с позиций повышения производительности печи и экономии топлива.

**Ключевые слова:** экономия топлива, печь, уходящие газы, рекуперация тепла.

**Введение.** В современных печных установках полезно использованная теплота в зависимости от их типа и назначения составляет (10–40) %, а потери теплоты с уходящими продуктами сгорания достигают (40–70) % [1], поэтому использование теплоты уходящих продуктов сгорания, представляющего мощный резерв вторичных энергоресурсов промышленности, создаёт исключительные возможности повышения коэффициента использования теплоты топлива и имеет важное народнохозяйственное значение [2].

Внутренне направление использования теплоты регенерации ( $Q_{\text{рег}}$ ) связано с предварительным подогревом материала, поступающего в печь, или для подогрева компонентов сгорания, или для того и другого одновременно.

**Целью** данной работы является выявление зависимости экономии топлива от технологических условий работы печи для выбора оптимального направления внутреннего топливоиспользования.

### Анализ условий работы печи

При оценке располагаемых запасов вторичных энергоресурсов следует учитывать влияние рода топлива на величину потерь теплоты с уходящими продуктами сгорания. Особое значение имеет качественная характеристика топлива, и прежде всего наличие в нём негорючих составляющих.

Показательной в этом отношении является величина «приведённого» объёма продуктов сгорания, представляющего количество продуктов сгорания, приходящегося на 1 МДж теплоты в топливе

$$\vartheta_{\text{д}}^{\text{пр}} = \frac{\vartheta_{\text{д}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (1)$$

где  $\vartheta_{\text{д}}$  – объём продуктов сгорания на 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – низшая теплота сгорания топлива, МДж/м<sup>3</sup>.

С понижением теплоты сгорания топлива  $\vartheta_{\text{д}}^{\text{пр}}$  увеличивается, так:

- для мазута  $\vartheta_{\text{д}}^{\text{пр}} = 0,263$ ;
- для природного газа  $\vartheta_{\text{д}}^{\text{пр}} = 0,285–0,295$ ;
- для коксового газа  $\vartheta_{\text{д}}^{\text{пр}} = 0,287$ ;

© А.Д. Димитров, А.Н. Шраменко, В.А. Пядухов, 2015

– для генераторного газу  $\vartheta_d^{\text{np}} = 0,342$ ;

– для доменного газу  $\vartheta_d^{\text{np}} = 0,437$ .

Таким образом, даже при сохранении того же значения температуры уходящих продуктов сгорания, использование в печах топлива с малым значением  $Q_n^p$  приводит к повышению потерь теплоты с уходящими продуктами сгорания именно в силу увеличения  $\vartheta_d^{\text{np}}$ .

Однако влияние рода топлива на величину рассматриваемой потери существенно и с позиции изменения эффективности теплообмена в рабочем пространстве.

Рассмотрим среднюю температуру продуктов сгорания, К

$$\bar{T}_d = \sqrt{\beta_c T_r T_{yx}}, \quad (2)$$

где  $\beta_c$  – коэффициент, учитывающий условия теплообмена и степень заполнения рабочего пространства факелом;  $T_r$  – теоретическая температура горения топлива, К;  $T_{yx}$  – температура продуктов сгорания на выходе из рабочего пространства.

Если учесть, что  $T_r$  снижается с уменьшением  $Q_n^p$  в силу указанного выше увеличения  $\vartheta_d^{\text{np}}$ , то при данном значении  $T_{yx}$  понижение теплоты сгорания топлива должно повлечь за собой уменьшение  $\bar{T}_d$ , а отсюда и снижение лучистого теплового потока от газов и стенок к материалу, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_u = \sigma_b (\bar{T}_d^4 - T_m^4), \quad (3)$$

где  $\sigma_b$  – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\bar{T}_d$  – средняя температура продуктов сгорания в рабочем пространстве печи, К;  $T_m$  – температура материала, К.

Необходимость сохранения производительности печи на требуемом уровне неизбежно ведёт к увеличению  $T_{yx}$ , что достигается увеличением расхода топлива, и тем большему, чем ниже  $Q_n^p$ .

Следовательно, при работе печи на топливе с низкой теплотой сгорания располагаемые запасы теплоты уходящих продуктов сгорания повышаются в силу следующих причин:

- увеличивается приведённый объём продуктов сгорания;
- увеличивается температуры уходящих продуктов сгорания;
- повышается секундный расход топлива для сохранения необходимой производительности печи.

Изложенное можно проиллюстрировать данными, полученными из расчёта нагревательной печи (табл. 1).

Эффективность использования теплоты уходящих продуктов сгорания можно оценить величиной коэффициента регенерации теплоты  $R$ , представляющего собой отношение теплоты уходящих из рабочего пространства печи продуктов сгорания, полезно используемых для указанных выше целей, к теплоте, вносимой в камеру.

$$R = \frac{Q_{\text{per}}}{\vartheta_d^{\text{per}} i_1}, \quad (4)$$

Данные расчёта нагревательной печи

Теплота сгорания топлива, МДж/м <sup>3</sup>	28,5	24,7	20,5	16,8
Температура уходящих продуктов сгорания, °С	754	794	829	874
Потеря с уходящими продуктами сгорания, %	53,0	57,0	61,5	66,0
Удельный расход условного топлива, %	15,7	18,2	21,7	24,4
Теплота уходящих продуктов сгорания на 1 кг стали, МДж/кг	2,44	3,04	3,92	4,70

где  $Q_{\text{пер}}$  – полезно используемая теплота продуктов сгорания, кВт;  $i_1$  – энтальпия продуктов сгорания при теоретической температуре сгорания ( $t_r$ ), МДж/м<sup>3</sup>;  $\vartheta_d^{\text{пер}}$  – расход продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/с.

Если отношение полезно использованного тепла камеры к теплу, вносимому в камеру, обозначим через  $\eta$ , то есть  $\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{\vartheta_d i_1}$ , а отношение тепловых потерь камеры к теплу, вносимому в камеру, через  $\omega$ , то из (3) получим

$$\vartheta_d = \frac{Q_{\text{кам}}}{i_1(\eta + \omega)}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{кам}}$  – расход теплоты на нагрев материала и покрытие тепловых потерь в камере, кВт.

При наличии внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания уравнение теплового баланса камеры запишется в следующем виде

$$\vartheta_d^{\text{пер}} i_1 (1 + R) = Q_{\text{кам}} + \vartheta_d^{\text{пер}} i_1 [(1 - R) - (\eta + \omega)]. \quad (6)$$

При этом допущено, что  $Q_{\text{кам}}$  сохраняется при наличии регенерации таким же, как и при её отсутствии.

Из последнего выражения определяется расход продуктов сгорания при регенерации

$$\vartheta_d^{\text{пер}} = \frac{Q_{\text{кам}}^{\text{пер}}}{(2R + \eta + \omega) i_1}. \quad (7)$$

При работе печи на топливе с низкой теплотой сгорания снижение расхода топлива достигается использованием теплоты уходящих продуктов сгорания на подогрев компонентов сгорания и предварительный нагрев материала. При неизменной величине  $Q_{\text{кам}}$  относительная величина теплоты уходящих продуктов сгорания может быть уменьшена за счёт регенерации теплоты уходящих продуктов сгорания. Теплота, уносимая продуктами сгорания из камеры

$$Q_{\text{yx}} = [1 - (\eta + \omega)] \vartheta_d i_1, \quad (8)$$

а теплота, вносимая в камеру при наличии регенерации

$$Q_1 = (1 + R)g_d i_1. \quad (9)$$

Тогда относительная величина теплоты уходящих продуктов сгорания

$$q_2 = \frac{Q_{yx}}{Q_1} = \frac{1 - (\eta + \omega)}{1 + R}. \quad (10)$$

Как видно из формулы (10), с увеличением коэффициента регенерации  $R$  величина  $q_2$  уменьшается. На основании формулы (10) построен график изменения  $q_2$  в зависимости от  $R$  для различных значений  $\eta$  при  $\omega = 0,12$  (рис. 1). На графике видно, что  $q_2$  можно значительно уменьшить одновременным увеличением  $R$  и  $\eta$ .

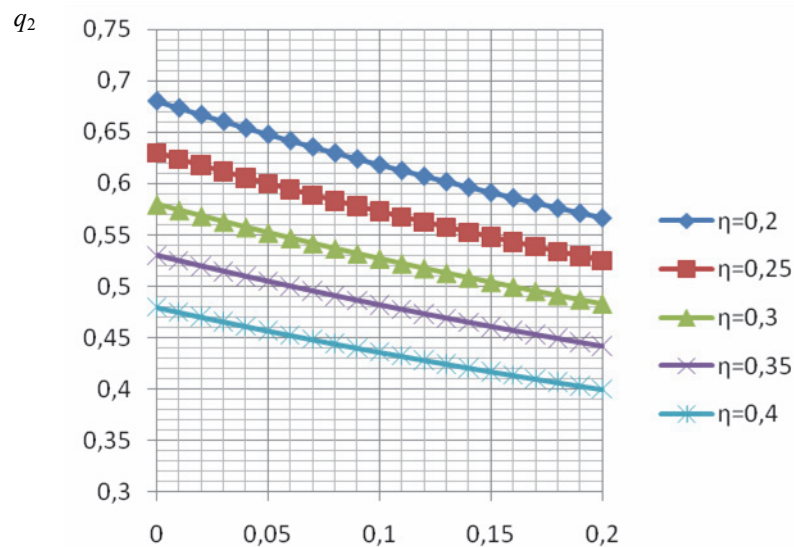


Рис. 1 – График зависимости относительной величины теплоты уходящих продуктов сгорания от коэффициента регенерации  $R$  при разных значениях  $\eta$

Изменение производительности печи при предварительном подогреве материала уходящими из камеры продуктами сгорания равно:

$$\frac{g_{гор}}{g_{хол}} = \frac{\Delta i_{хол}}{\Delta i_{гор}} \sqrt{1 - \frac{T_{мгор}^4}{T_{yx}^4}} = \frac{\Delta i_{хол}}{\Delta i_{гор}} K. \quad (11)$$

В формуле (11)  $\frac{\Delta i_{хол}}{\Delta i_{гор}}$  есть отношение приращения энтальпии материала в камере при холодном посаде к приращению энтальпии материала при горячем посаде, где

$$K = \sqrt{1 - \frac{T_{мгор}^4}{T_{yx}^4}}.$$

В зависимости от коэффициента использования теплоты в камере и

коэффициента регенерации теплоты уходящих продуктов сгорания, величину  $\frac{\Delta i_{\text{хол}}}{\Delta i_{\text{гор}}}$  можно представить в следующем виде

$$\frac{\Delta i_{\text{хол}}}{\Delta i_{\text{гор}}} = \frac{\eta}{\eta - R^*}.$$

С учётом последнего выражения формулу (11) можно записать в следующем виде

$$\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}} = \frac{\eta}{\eta - R^*} K. \quad (12)$$

Допуская линейную зависимость между энтальпией металла и температурой и энтальпией продуктов сгорания и температурой, что вносит в расчёты ошибку до 6 % в широком диапазоне изменения температур, с учётом заданных значений  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $R$ , выразим коэффициент  $K$  через  $T_{\text{м}}''$  и  $T_{\text{г.хол}}$ . (Предварительно введём  $R^* = \frac{R(\eta + \omega)}{2R + \eta + \omega}$ )

$$K = \sqrt{1 - \left\{ \frac{\frac{R^*}{\eta} t_{\text{м}}'' + 273}{[1 - (\eta + \omega)] t_{\text{г.хол}} + 273} \right\}^4} < 1. \quad (13)$$

Расход продуктов сгорания (топлива) при горячем и холодном посаде будет при  $Q_{\text{пот}} = \text{const}$ :

$$g_{\text{д}}^{\text{хол}} = \frac{Q_{\text{пол}}^{\text{хол}} + Q_{\text{пот}}}{i_1 - i_2}, \quad (14)$$

$$g_{\text{д}}^{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{пол}}^{\text{гор}} + Q_{\text{пот}}}{i_1 - i_2}. \quad (15)$$

Изменение расхода топлива при предварительном подогреве материала

$$\frac{B_{\text{гор}}}{B_{\text{хол}}} = \frac{g_{\text{д}}^{\text{гор}}}{g_{\text{д}}^{\text{хол}}} = \frac{g_{\text{гор}} \Delta i_{\text{гор}} + Q_{\text{пот}}}{g_{\text{хол}} \Delta i_{\text{хол}} + Q_{\text{пот}}}. \quad (16)$$

После подстановки из (11)  $g_{\text{гор}} \Delta i_{\text{гор}}$  находим

$$\frac{B_{\text{гор}}}{B_{\text{хол}}} = \frac{K\eta + \omega}{\eta + \omega}. \quad (17)$$

#### **Определение экономии топлива**

Рассмотрим влияние каждого из способов внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания на экономию топлива.

При подогреве компонентов сгорания экономия расхода топлива за счёт регенерации теплоты уходящих продуктов сгорания составит, %:

$$\Theta = \frac{g_{\text{д}} - g_{\text{д}}^{\text{пер}}}{g_{\text{д}}} 100. \quad (18)$$

Подставив в последнее выражение  $\vartheta_d$  и  $\vartheta_d^{\text{рег}}$  из (5) и (7) получим

$$\vartheta = \left( 1 - \frac{Q_{\text{кам}}^{\text{рег}}}{Q_{\text{кам}}} \frac{1}{1 + \frac{2R}{\eta + \omega}} \right) 100 = \left( 1 - \frac{m}{1 + \frac{2R}{\eta + \omega}} \right) 100. \quad (19)$$

При  $m = 1$

$$\vartheta = \frac{100}{1 + \frac{2R}{\eta + \omega}}. \quad (20)$$

При предварительном подогреве материала экономия топлива за счёт регенерации теплоты уходящих продуктов сгорания

$$\vartheta = \frac{\vartheta_d^{\text{хол}} - \vartheta_d^{\text{гор}}}{\vartheta_d^{\text{хол}}} = 1 - \frac{\vartheta_d^{\text{гор}}}{\vartheta_d^{\text{хол}}}. \quad (21)$$

Подставив в это выражение  $\frac{\vartheta_d^{\text{гор}}}{\vartheta_d^{\text{хол}}}$  из (17), получим, %

$$\vartheta = \frac{\eta(1-k)}{\eta + \omega} 100. \quad (22)$$

Как видно из выражений (20) и (22) зависимость экономии топлива от степени регенерации  $R$  различна для рассмотренных вариантов внутреннего использования теплоты уходящих газов.

**Вывод.** Краткий теоретический анализ влияния использования теплоты уходящих продуктов сгорания для подогрева материала показывает, что внутреннее использование теплоты уходящих продуктов сгорания по обоим рассмотренным вариантам является эффективным средством повышения производительности и улучшения топливоиспользования в печных установках. При необходимости повышения производительности печи более выгодным является использование теплоты уходящих продуктов сгорания для предварительного подогрева материала, когда же экономия топлива стоит на первом плане, более эффективное использование теплоты уходящих продуктов сгорания будет иметь место при подогреве компонентов сгорания.

В реальных условиях, когда вопрос повышения производительности неразрывно связан с вопросом экономии топлива, оба варианта внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания следует рассматривать совместно.

**Список литературы:** 1. Семененко, Н. А. Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехнологическое комбинирование [Текст] / Н. А. Семененко. – М. : Энергия, 1976. – 296 с. 2. Ключников, А. Д. Теплотехническая оптимизация топливных печей [Текст] / А. Д. Ключников. – М. : Энергия, 1974. – 343 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Vtorichnye jenergoresursy promyshlennosti i jenergotehnologicheskoe kombinirovaniye.* Moscow : Jenergija, 1976. Print. 2. *Kljuchnikov, A. D. Teplotehnicheskaja optimizacija toplivnyh pechej.* Moscow : Jenergija, 1974. Print.

*Поступила (received) 05.01.2015*