

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

## ПОДОГРЕВ КОМПОНЕНТОВ ГОРЕННЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

Приводится сравнение различных вариантов внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания при работе высокотемпературных теплотехнологических установок (ВТТУ). Показано влияние на эти величины коэффициента регенерации тепла и коэффициента полезно использованного тепла рабочей камеры для конкретных условий работы ВТТУ. В выводах даны рекомендации по выбору рационального способа использования теплоты уходящих продуктов сгорания (не согласовано) с точки зрения конструктивных особенностей и экономичности работы при различных режимах эксплуатации.

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

**Введение.** На современном уровне развития промышленные теплотехнологические установки остаются наиболее крупными потребителями энергоресурсов.

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. Внешнее направление предполагает использование теплоты уходящих продуктов сгорания для стороннего потребителя, например, для выработки пара в котлах-утилизаторах.

В современной практике принято, что тепловая эффективность внутреннего теплоиспользования одинакова для обоих возможных направлений (подогрев компонентов горения и предварительный подогрев материала) [1, 2]. Однако достоверность данного предположения вызывает сомнения.

**Целью** данного исследования является выявление зависимости эффективности работы печей от направления внутреннего использования теплоты уходящих из зоны основной технологической обработки продуктов сгорания.

**Постановка задачи.** Выполнить анализ теплообмена в ВТТУ для определения зависимости удельного расхода топлива и производительности от коэффициента регенерации и коэффициента полезно использованного тепла рабочей камеры.

### Определение эффективности внутреннего использования теплоты регенерации.

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 [3]

$$R = \frac{Q_{\text{рег}}}{\vartheta_{\text{д}}^{\text{рег}} i_1}, \quad (1)$$

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

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

Если пренебречь зависимостью теплоёмкости продуктов сгорания от температуры, то влияние подогрева компонентов на изменение теоретической температуры сгорания можно выразить следующей формулой

$$t_{\text{г}}^{\text{гоп}} = t_{\text{г}}^{\text{хол}}(1 + R), \quad (2)$$

где  $t_{\text{г}}^{\text{гоп}}$ ,  $t_{\text{г}}^{\text{хол}}$  – теоретические температуры сгорания при работе на подогретых и холодных компонентах сгорания, °С.

Расход продуктов сгорания при отсутствии регенерации ( $R = 0$ )

$$\mathfrak{G}_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{кам}}}{i_1 - i_2}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{кам}}$  – расход теплоты на нагрев материала и покрытие тепловых потерь в камере, кВт;  $i_2$  – энтальпия продуктов сгорания, покидающих камеру, МДж/м<sup>3</sup>.

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

$$\mathfrak{G}_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{кам}}}{i_1(\eta + \omega)}, \quad (4)$$

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

$$\mathfrak{G}_{\text{д}}^{\text{рег}} i_1(1 + R) = Q_{\text{кам}} + \mathfrak{G}_{\text{д}}^{\text{рег}} i_1[(1 - R) - (\eta + \omega)]. \quad (5)$$

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

$$\mathfrak{G}_{\text{д}}^{\text{рег}} = \frac{Q_{\text{кам}}^{\text{рег}}}{(2R + \eta + \omega)i_1}. \quad (6)$$

При данном коэффициенте расхода воздуха величина  $\mathfrak{G}_{\text{д}}$  пропорциональна расходу топлива, поэтому при определении изменения расхода топлива можно пользоваться отношениями расходов продуктов сгорания. Из выражения (6) видно, что при прочих равных условиях увеличение коэффициента регенерации ( $R$ ) приводит к уменьшению расхода топлива.

Рассмотрим влияния обоих направлений внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания на показатели работы печи.

#### **Предварительный подогрев материала**

В упрощённом виде основное уравнение теплообмена в рабочей камере печи методического типа имеет вид

$$\sigma_{\text{в}} \sqrt{(T_{\text{д}}^4 - T_{\text{м}}^{\prime\prime 4})(T_{\text{yx}}^4 - T_{\text{м}}^{\prime 4})} = gc(T_{\text{м}}^{\prime\prime} - T_{\text{м}}^{\prime}). \quad (7)$$

где  $T_{\text{д}}$  – температура продуктов сгорания в рабочей камере печи;  $T_{\text{yx}}$  – температура уходящих из камеры продуктов сгорания, К;  $T_{\text{м}}^{\prime}$  – начальная температура нагрева материала, К;  $T_{\text{м}}^{\prime\prime}$  – конечная температура подогрева материала, К;  $\sigma_{\text{в}}$  – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $g$  – напряжение площади пода печи, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $c$  – теплоёмкость материала, кДж/(кг·К).

Допуская постоянство температуры продуктов сгорания  $T_d$ , температуры нагрева металла  $T_m''$ , а также температуры уходящих из камеры продуктов сгорания, выражение (7) для холодного посада можно записать в следующем виде

$$\sigma_{\text{в}} \sqrt{B(T_{\text{yx}}^4 - T_{\text{мхол}}'^4)} = g_{\text{хол}} c_{\text{хол}} (t_m'' - t_{\text{мхол}}') = g_{\text{хол}} \Delta i_{\text{хол}}, \quad (8)$$

а при работе печи на горячем посаде

$$\sigma_{\text{в}} \sqrt{B(T_{\text{yx}}^4 - T_{\text{мгор}}'^4)(T_{\text{yx}}^4 - T_m''^4)} = g_{\text{гор}} \Delta i_{\text{гор}}. \quad (9)$$

Тогда, при  $t_{\text{мхол}}' = 0$ , изменение производительности печи при предварительном подогреве материала уходящими из камеры продуктами сгорания можно получить, разделив (9) на (8)

$$\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}} = \frac{\Delta i_{\text{хол}}}{\Delta i_{\text{гор}}} \sqrt{1 - \frac{T_{\text{мгор}}'^4}{T_{\text{yx}}^4}} = \frac{\Delta i_{\text{хол}}}{\Delta i_{\text{гор}}} K. \quad (10)$$

В формуле (10)  $\frac{\Delta i_{\text{хол}}}{\Delta i_{\text{гор}}}$  есть отношение приращения энтальпии материала в камере при холодном посаде к приращению энтальпии материала при горячем посаде, где

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

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 (10) можно записать в следующем виде

$$\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}} = \frac{\eta}{\eta - R^*} K. \quad (11)$$

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  $T_m''$  и  $T_{\text{гхол}}$ . (Предварительно введём  $R^* = \frac{R(\eta + \omega)}{2R + \eta + \omega}$ )

$$K = \sqrt{1 - \left\{ \frac{\frac{R^*}{\eta} t_m'' + 273}{[1 - (\eta + \omega)] t_{\text{гхол}} + 273} \right\}^4} < 1. \quad (12)$$

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

$$g_{\text{д}}^{\text{хол}} = \frac{Q_{\text{пол}}^{\text{хол}} + Q_{\text{пот}}}{i_1 - i_2}, \quad (13)$$

$$g_d^{гор} = \frac{Q_{пол}^{гор} + Q_{пот}}{i_1 - i_2} \quad (14)$$

Изменение расхода топлива при предварительном подогреве материала

$$\frac{B_{гор}}{B_{хол}} = \frac{g_d^{гор}}{g_d^{хол}} = \frac{g_{гор} \Delta i_{гор} + Q_{пот}}{g_{хол} \Delta i_{хол} + Q_{пот}}$$

После подстановки из (10)  $g_{гор} \Delta i_{гор}$  находим

$$\frac{B_{гор}}{B_{хол}} = \frac{K\eta + \omega}{\eta + \omega} \quad (15)$$

Изменение удельного расхода топлива, определяемое как отношение (15) к (11)

$$\frac{b_{гор}}{b_{хол}} = \frac{(\eta - R^*)(K\eta + \omega)}{K\eta(\eta + \omega)} \quad (16)$$

Из формул (11), (15) и (16) видно, что предварительный подогрев материала приводит к значительному увеличению производительности печи и заметному повышению её экономичности.

Рассмотрим влияние подогрева материала на увеличение производительности и повышение экономичности печи. Топливо – коксодоменная смесь с  $Q_n^p = 6 \text{ МДж/м}^3$ ;  $T_m'' = 1523 \text{ К}$ . При коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1,1$ , а затем по формуле (16) для принятых значений  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $R$  определяем  $K$ . Изменение производительности печи и удельного расхода топлива определяем по (11), и (16). Принимаем  $\eta = 0,4$ ,  $\omega = 0,12$ .

Таблица 1.

Изменение производительности печи и удельного расхода топлива при предварительном подогреве материала

Параметр	R			
	0	0,065	0,12	0,18
$\frac{g_{гор}}{g_{хол}}$	1	1,165	1,3	1,45
$\frac{b_{гор}}{b_{хол}}$	1	0,842	0,712	0,571

Как известно, наиболее совершенная форма осуществления предварительного подогрева материала имеет место в методической печи, в которой камера предварительного подогрева органически связана с зоной окончания нагрева.

#### Подогрев компонентов сгорания

В реальных условиях подогрев компонентов сгорания приводит к повышению теоретической температуры сгорания топлива ( $T_r$ ), что при прочих неизменных температурах ( $T_{yx}$ ,  $T_m'$ ,  $T_m''$ ) ведёт к увеличению плотности теплового потока на металл и, следовательно, к повышению производительности печи.

При работе печи на холодных компонентах сгорания уравнение теплообмена в печи запишется

$$\sigma_B \sqrt{(T_r^4 - T_m''^4)(T_{yx}^4 - T_m'^4)} = g_{хол} \Delta i, \quad (17)$$

а при работе печи на горячих компонентах сгорания

$$\sigma_{\text{в}} \sqrt{(T_{\text{Ггор}}^4 - T_{\text{М}}''^4)(T_{\text{ух}}^4 - T_{\text{М}}''^4)} = g_{\text{гор}} \Delta i. \quad (18)$$

Изменение производительности печи при подогреве компонентов сгорания получим, разделив (18) на (17)

$$\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}} = \sqrt{\frac{T_{\text{Ггор}}^4 - T_{\text{М}}''^4}{T_{\text{Гхол}}^4 - T_{\text{М}}''^4}}. \quad (19)$$

Рассмотрим влияние подогрева воздуха на повышение производительности печи на конкретном примере. Топливо – коксодоменная смесь с  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 6 \text{ МДж/м}^3$ ;

$T_{\text{М}}'' = 1523 \text{ К}$ . При коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1,1$  определяем по (19)  $\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}}$ .

Таблица 2.

Изменение производительности печи и удельного расхода топлива при предварительном подогреве материала

$t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	0	200	400	600
$\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}}$	1	1,215	1,395	1,59

Следовательно, применение горячего воздуха является эффективным средством повышения производительности печей.

С учётом выражения (2) зависимость (19) будет

$$\frac{g_{\text{гор}}}{g_{\text{хол}}} = \sqrt{\frac{(1+R)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}''}{T_{\text{Гхол}}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_{\text{М}}''}{T_{\text{Гхол}}}\right)^4}}. \quad (20)$$

При одновременно увеличении производительности печи и тепловосприятости в камере изменение расхода топлива за счёт подогрева компонентов сгорания можно получить на основании выражений (3) и (5)

$$\frac{B^{\text{пер}}}{B} = \frac{m}{1 + \frac{2R}{\eta + \omega}}, \quad (21)$$

где  $m = Q_{\text{кам}}^{\text{пер}} / Q_{\text{кам}}$ .

На основании (20) и (21) определяем изменение удельного расхода топлива при подогреве компонентов сгорания

$$\frac{b^{\text{пер}}}{b} = \frac{m}{1 + \frac{2R}{\eta + \omega}} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{T_{\text{М}}''}{T_{\text{Гхол}}}\right)^4}{(1+R)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}''}{T_{\text{Гхол}}}\right)^4}}. \quad (22)$$

Следовательно, подогрев компонентов сгорания способствует:

а) повышению температурного уровня в камере печи до пределов, обеспечивающих проведение технологического процесса;

б) интенсификации работы печи;

в) снижению расхода топлива в единицу времени и уменьшение удельного расхода топлива.

Таким образом, внутреннее использование теплоты уходящих продуктов сгорания, независимо от его направления ведёт к интенсификации работы печи, уменьшению расхода топлива и повышению экономичности печной установки.

На рис. 1, 2 показаны графики изменения удельного расхода топлива при использовании теплоты уходящих продуктов сгорания на подогрев материала и компонентов сгорания в зависимости от коэффициента регенерации ( $R$ ), рассчитанные по формулам (16) и (22) для следующих условий:  $Q_H^p = 6 \text{ МДж/м}^3$ ,  $Q_{\text{пот}} = 0,129_{\text{в}} i_1$ ,  $\alpha = 1,1$ ,  $m = 1,0$ ,  $t_m'' = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура воздуха  $t_{\text{в}} = 0; 200; 400; 600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как видно из графиков, внутреннее использование теплоты уходящих продуктов сгорания по обоим направлениям способствует уменьшению удельного расхода топлива. Причём, изменение удельного расхода топлива при предварительном подогреве материала (рис. 1) зависит от  $\eta$  сильнее, чем при подогреве компонентов сгорания (рис. 2).

#### Сравнение показателей эффективности работы печи.

Значительный интерес представляет сопоставление обоих вариантов внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания, то есть выявление какой из них более эффективен в отношении повышения производительности печи и снижения удельного расхода топлива.

Такое сопоставление можно сделать по выражениям, полученным от деления формулы (20) на (11) и деления формулы (22) на (16):

$$\frac{g^{\text{ПКГ}}}{g^{\text{ПМ}}} = \frac{\eta - R^*}{\eta K} \sqrt{\frac{(1+R)^4 - \left(\frac{T_m''}{T_{\text{Г хол}}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_m''}{T_{\text{Г хол}}}\right)^4}}, \quad (23)$$

$$\frac{b^{\text{ПКГ}}}{b^{\text{ПМ}}} = \frac{mK\eta(\eta + \omega)}{\left(1 + \frac{2R}{\eta + \omega}\right)(\eta - R^*)(K\eta + \omega)} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{T_m''}{T_{\text{Г хол}}}\right)^4}{(1+R)^4 - \left(\frac{T_m''}{T_{\text{Г хол}}}\right)^4}}. \quad (24)$$

На основании формул (23) и (24) построены графики (рис. 3, 4) отношения производительности печи и удельного расхода топлива при использовании теплоты уходящих продуктов сгорания для подогрева компонентов сгорания к производительности печи и удельному расходу топлива при предварительном подогреве материала. Условия для расчёта графиков (рис. 3, 4) приняты такими же, как и при построении графиков (рис. 1, 2).

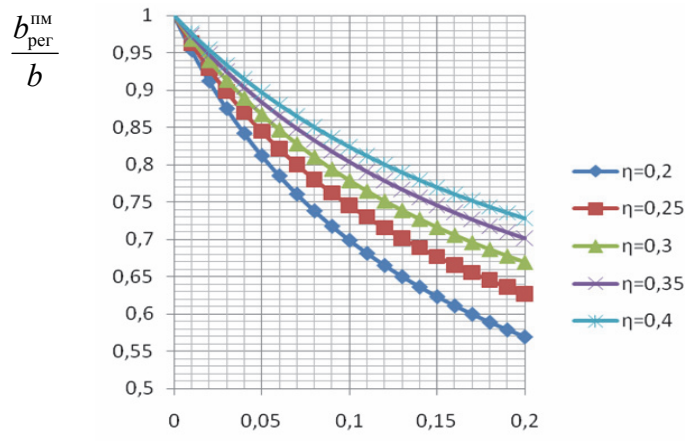


Рис. 1 – Изменение удельного расхода топлива при предварительном подогреве материала

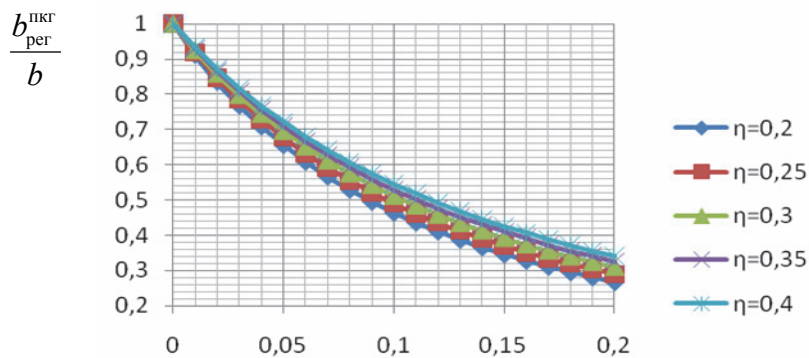


Рис. 2 – Изменение удельного расхода топлива при подогреве компонентов горения

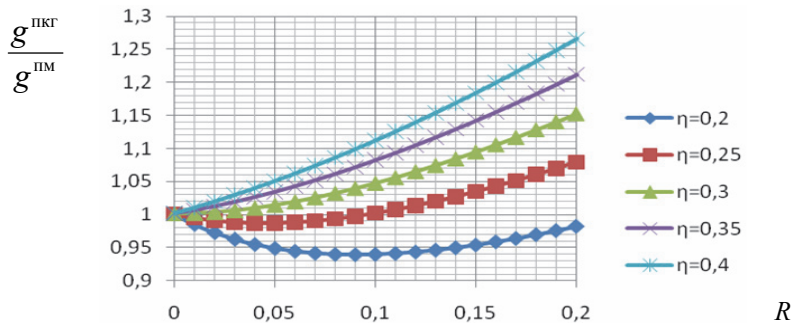


Рис. 3 – Отношение производительности печи при подогреве компонентов горения к производительности печи при предварительном подогреве материала

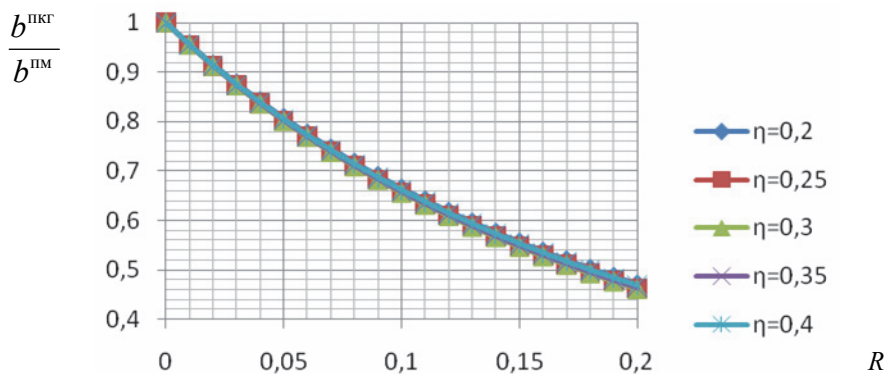


Рис. 4 – Отношение удельного расхода топлива при подогреве компонентов горения к удельному расходу топлива при предварительном подогрева материала

### Сопоставление результатов

Зависимость отношения производительности печи при работе на горячих компонентах сгорания к производительности печи при работе на горячем посаде от коэффициента регенерации при различных значениях коэффициентов использования теплоты в камере представлена на рис. 3. Как видно из графика, при одинаковых  $R$  повышение производительности печи за счёт подогрева компонентов сгорания более эффективно начиная с  $\eta > 0,25$ , а при значениях  $\eta < 0,25$  предварительный подогрев материала дает большее значение производительности, чем при подогреве компонентов сгорания. При  $\eta = 0,25$  отношение  $\frac{g_{\text{пкг}}}{g_{\text{пм}}}$  для всех значений  $R$  является величиной

постоянной и равной 1. Это указывает на то, что при  $\eta = 0,25$  оба способа внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания дают одинаковый эффект.

На рис. 4 представлена зависимость отношения удельного расхода топлива при работе печи на горячих компонентах сгорания к удельному расходу топлива при работе печи на горячем посаде от коэффициента регенерации  $R$  при различных значениях  $\eta$ . Из рис. 4 видно, что с увеличением коэффициента использования теплоты  $\eta$  предварительный подогрев компонентов сгорания за счёт теплоты уходящих продуктов сгорания приводит к большему снижению удельного расхода топлива. Чем при подогреве материала.

**Вывод.** Полученные данные, касающиеся зависимости экономии топлива при разных значениях  $\eta$  позволяют выбрать направление внутреннего теплоиспользования в зависимости от технологических условий работы и назначения ВТТУ. Подогрев компонентов горения предпочтителен для нагревательных печей, (т.к. они работают при  $\eta > 0,25$ ), а предварительный подогрев материала – для плавильных печей.

Самым рациональным следует считать одновременное применение обоих направлений внутреннего использования теплоты уходящих продуктов сгорания, так как в этом случае проявляются преимущества обоих направлений в отношении повышения производительности печи и уменьшении удельного расхода топлива.

**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. 3. Равич, М. Б. Топливо и эффективность его использования [Текст] / М. Б. Равич. – М. : Наука, 1971. – 358 с. : ил.

**Bibliography (transliterated):** 1. Semenenko, N. A. *Vtorichnye jenergoresursy promyshlennosti i jenergotehnologicheskoe kombinirovanie*. Moscow : Jenergija, 1976. Print. 2. Kljuchnikov, A. D. *Teplotehnicheskaja optimizacija toplivnyh pechej*. Moscow : Jenergija, 1974. Print. 3. Ravich, M. B. *Toplivo i jeffektivnost' ego ispol'zovanija*. Moscow : Nauka, 1971. Print.

Поступила (received) 05.01.2015