

В.Ю. Зинченко <sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

А.И. Чепрасов <sup>(1)</sup>, профессор, к.т.н.

И.Г. Яковлева <sup>(1)</sup>, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

Е.В. Гупало <sup>(2)</sup>, доцент, к.т.н.

## ОЦЕНКА ОТОПЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ С ПОЗИЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

<sup>(1)</sup> Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup> Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

Наведено методику оцінки економічності опалювання термічних камерних печей за середньоінтегральним значенням коефіцієнта використання палива, виконано аналіз технологій опалювання з позиції управління.

Приведена методика оценки экономичности отопления термических камерных печей по среднеинтегральному значению коэффициента использования топлива, выполнен анализ технологий отопления с позиции управления.

*Введение.* Управление процессом отопления термических печей сводится к регулированию их тепловой мощности с обратной связью по температуре в какой-либо представительной точке нагревательной камеры и разомкнутому управлению движением греющих газов для обеспечения технологически необходимой равномерности температурного поля. В отличие от высокотемпературных нагревательных печей при организации внешнего теплообмена в термических печах решающее влияние оказывает не столько температура греющих газов, сколько объем, скорость и характер их движения в рабочей камере, что и объясняет наличие многообразия применяемых технологий отопления.

Помимо традиционного факельного сжигания топлива, осуществляемого непосредственно в рабочих камерах или выносных топках с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha = 1,05 \dots 1,15$ , в печах данного типа применяют:

– отопление со стадийным сжиганием топлива, как правило, в две стадии: на первой стадии с недостатком воздуха ( $\alpha < 1$ ), на второй – с дожиганием продуктов неполного сгорания за счет дополнительного воздуха или кислорода [1];

– отопление путем объемного сжигания топлива непосредственно в рабочих камерах печи [2];

– отопление с объемно-регенеративным сжиганием предварительно нагретых в рекуператорах печи топлива и воздуха [3,4], при котором воздействие на движение греющих газов осуществляют путем реверсирования факела;

– отопление с рециркуляцией продуктов сгорания [2], когда часть продуктов сгорания возвращается в рабочую камеру и перемешивается со свежим газом;

– импульсное отопление [5], при котором топливо и воздух или только топливо или только воздух подают импульсами;

– сжигание газа с постоянным расходом воздуха, то есть при переменном коэффициенте расхода воздуха [4];

– сжигание со стабилизацией объемного расхода продуктов сгорания за время цикла термообработки [6], обеспечиваемой путем комбинирования различных топливных газов непосредственно в процессе сжигания.

Перечисленные технологии отопления отличаются друг от друга, как используемым видом топлива, так и видом управляющего воздействия на движение газов: рециркуляция, реверсирование, импульсная подача топлива, воздуха, применение качающихся горелок, стабилизация объемных расходов путем подачи избыточного воздуха, комбинирование топливных газов и т.д. Естественно, что данные технологии отопления отличаются друг от друга также и технико-экономическими показателями, а также условиями их реализации. Применимость той или иной технологии зависит как от конкретных особенностей печей и условий производства, так и от требуемых технико-экономических показателей процесса термообработки.

В связи с этим при выборе технологии и определении способа управления необходима оценка ожидаемых показателей отопления и тепловой работы печи в целом.

*Постановка задачи.* Целью работы является определение показателей тепловой работы печей, пригодных для сравнительной оценки различных технологий и способов управления отоплением.

*Основная часть.* Технологии отопления определяются во многом видом и способом сжигания газообразного топлива. Известно, что работоспособность топлива можно оценить коэффициентом использования топлива  $\eta_T$ , который, как показано И.Д. Семикиным [7], обладает «универсальным свойством одновременно освещать термодинамическую, техническую и экономическую стороны вопроса об использовании топлива» и представляет собой отношение количества теплоты, образующейся при сжигании единицы топлива и оставшейся в рабочей камере печи, к общей теплоте сгорания единицы данного топлива и теплоемкостей дымовых газов при калориметрической температуре  $t_{кал}$  и температуре печи  $t_n$ . При отсутствии химического недожога топлива и допущении равенства теплоемкостей дымовых газов при калориметрической температуре  $t_{кал}$  и температуре печи  $t_n$ , исключении газообмена рабочих камер с окружающей средой в установившемся режиме оценку  $\eta_T$  определяют в упрощенном виде [8]:

$$\eta_T = 1 - \frac{t_n}{t_{кал}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что использование топлива тем эффективнее, чем выше температура греющих газов, вводимых в рабочую камеру.

Учитывая, что в действительности теплоемкости газов на входе и выходе из рабочей камеры отличаются друг от друга, значения коэффициента использования топлива, рассчитанные по формуле (1), всегда ниже фактических, то есть данный коэффициент является оценкой эффективности «снизу». При переменном во времени ( $\tau$ ) температурном режиме коэффициент  $\eta_T$  изменяется в процессе термообработки, то есть  $\eta_T = f(\tau)$ , и в таком представлении не может быть использован для сравнительной оценки различных технологий отопления в целом.

В случае предварительного подогрева топлива или воздуха в теплоутилизирующих устройствах прирост коэффициента использования учитывается через приращение калориметрической температуры газа. При неполном сгорании топлива значение коэффициента  $\eta_T$  должно быть уменьшено на величину, соответствующую доле потерь теплоты топлива от неполного его сгорания.

Для печей периодического действия целесообразно использование среднеинтегрального значения  $\bar{\eta}_T$  за весь цикл термообработки  $\tau_u$ , выраженного как:

$$\bar{\eta}_T = \frac{\int_0^{\tau_u} \eta_T(\tau) \cdot d\tau}{\tau_u}. \quad (2)$$

Тепловую экономичность печей в целом оценивают при помощи коэффициента полезного действия  $\eta_T$ , который представляет собой отношение полезной тепловой мощности, затраченной на нагрев металла, к общей мощности, выраженной через общий расход топлива и его теплоту сгорания. Текущее значение  $\eta_n$  может быть выражено через отношение полезной теплоты  $Q_m$ , усвоенной металлом, к общей теплоте сгорания единицы топлива  $Q_H^p$  и представленного в виде:

$$\eta_n = \frac{Q_m}{Q_H^p} = \eta_T - \frac{Q_{кл} + Q_{ном}}{Q_H^p}, \quad (3)$$

где  $Q_{ном}$  – потери теплоты в рабочей камере за счет излучения через технологические отверстия, на нагрев оснастки и среды, печные конструкции и др.;  $Q_{кл}$  – теплота, аккумулированная кладкой, а также теплообмен кладки с окружающей средой.

Оценка  $\eta_n$  с использованием формулы (3) также является оценкой «снизу», так как фактическая оценка  $\eta_n$  всегда выше, чем  $\eta_T$ .

Для печей периодического действия используют среднеинтегральное значение коэффициента  $\bar{\eta}_n$  за весь цикл термообработки, величину которого определяют аналогично  $\bar{\eta}_T$ . Если принять, что  $\bar{\eta}_n = \bar{\eta}_T \cdot \varepsilon$ , то общую теплоту  $Q_{общ}$ , необходимую для нагрева садки металла массой  $M$  от начальной температуры  $t_M^H$  до ее конечного значения  $t_M^K$ , можно выразить как:

$$Q_{общ} = \frac{M \cdot C_M \cdot (t_M^K - t_M^H)}{\varepsilon \cdot \bar{\eta}_T}, \quad (4)$$

где  $C_M$  – средняя теплоемкость металла;  $\varepsilon$  – динамический коэффициент, определяемый для конкретной печи за весь период нагрева, и обычно, как показано в работе [2],  $\varepsilon = \text{const}$ .

Согласно выражения (1) при постоянной калориметрической температуре  $t_{кал}$  коэффициент  $\eta_T$  зеркально отображает изменение температуры в печи  $t_n$ , как показано на рис. 1. Учитывая, что задаваемые температурные графики термообработки, как правило, легко аппроксимируются кусочно-линейными зависимостями, операцию интегрирования можно свести к графическому определению площади, выделенной на рис. 1 серым цветом. Таким образом, появляется возможность оценить значения  $\bar{\eta}_T$  и  $\bar{\eta}_n$  до начала цикла термообработки, а с учетом выражения (2) выполнить оценку общего расхода

топлива и пересчитать на удельный объемный расход условного топлива, являющийся важным плановым и отчетным показателем.

Равномерность температурного поля, как вторая управляемая величина после общей температуры  $t_n$ , зависит, прежде всего, от объемного расхода дымовых газов, образующихся при сжигании топлива. В связи с этим сравнение различных технологий отопления целесообразно осуществлять также с позиции обеспечения рационального газодинамического режима за счет управления объемным расходом греющих газов. Из-за отсутствия прямых количественных оценок характера движения газов в рабочих камерах возможно только косвенное сравнение различных технологий отопления по выходу дымовых газов на 1000 кДж теплоты.

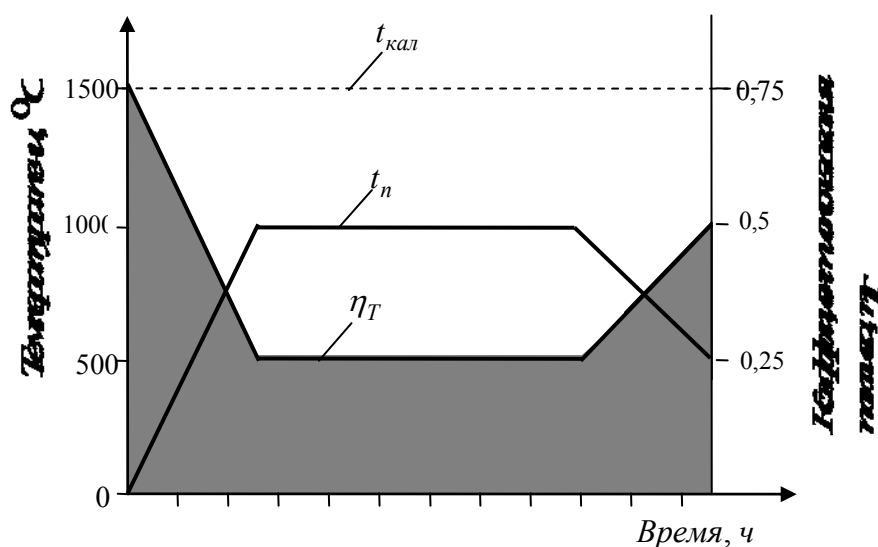


Рисунок 1 – Зависимость  $\eta_T$  и температуры печи  $t_n$  во времени при постоянном значении  $t_{кал}$

По результатам расчетного анализа коэффициента  $\eta_T$  (при температуре печи  $t_n = 1000$  °C) на рис. 2 представлен объем продуктов сгорания и соотношение частей теплоты, остающейся и покидающей рабочую камеру с продуктами сгорания в расчете на 1000 кДж теплоты для различных видов топливных газов и условий сжигания.

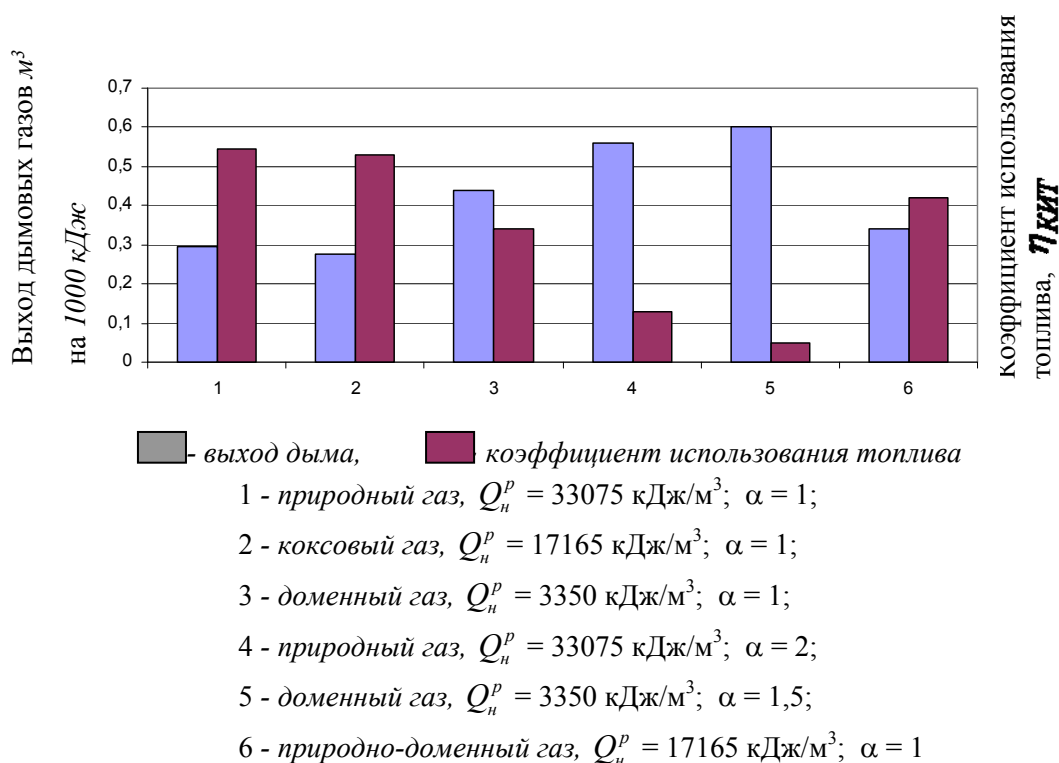
Как следует из рис. 2, с позиции повышения  $\eta_T$  целесообразно применение высококалорийных газов (природного, коксового), с позиции увеличения объемного расхода – низкокалорийного (доменного) топлива или разбавления газов избыточным воздухом.

Повышение коэффициента расхода воздуха  $\alpha$  приводит к уменьшению  $t_{кал}$ , а, следовательно, и существенному снижению величины  $\eta_T$  и при  $t_{кал} = t_n \Rightarrow \eta_T$  равен нулю, то есть вся вводимая в рабочее пространство печи теплота удаляется с продуктами сгорания.

Несмотря на разнообразие технологий отопления, управление тепловой работы печей возможно по двум тепловым схемам, определяющим выбор топлива, способ сжигания и организацию движения газов.

Согласно первой, наиболее распространенной схеме, объемный расход греющих газов определяется только тепловой нагрузкой, то есть расходом

сжигаемого топлива. При этом температура газов, вводимых в рабочую камеру, близка к калориметрической температуре в случае сжигания в выносных топках или равна калориметрической при факельном сжигании и остается постоянной в течение всего цикла термообработки. По мере нагрева садки расход топлива уменьшается, а следовательно уменьшается объемный расход греющих газов, что соответствует традиционной технологии отопления большинства камерных термических печей. Управление тепловой нагрузкой осуществляется по температуре участков садки, которые наиболее интенсивно нагреваются, а производительность печи определяется отстающими по нагреву участками садки. Управление температурой в печи и движением газов оказывается взаимосвязанным и нередко неэффективным, сужается диапазон регулирования тепловой нагрузки. Однако, при применении высококалорийного топлива, как следует из рис. 2, обеспечивается сравнительно высокий коэффициент использования топлива ( $\eta_T = 0,5 \dots 0,6$ ).



**Рисунок 2** – Выход дыма на 1000 кДж теплоты и коэффициент использования топлива  $\eta_{KIT}$  для различных топливных газов и условий их сжигания

Согласно второй тепловой схеме управление осуществляется также путем изменения тепловой мощности при постоянном объемном расходе вводимых греющих газов, но за счет изменения их температуры. Подготовку греющих газов осуществляют, как правило, вне рабочей камеры и их температура обеспечивается за счет разбавления уходящими продуктами сгорания (рециркуляция), использования избыточного воздуха, комбинирования нескольких видов топливных газов и т.п. Появляется возможность снижения температуры газов до температуры поверхности нагреваемых изделий, что необходимо для реализации многоступенчатых графиков термообработки садок металла, состоящих из заготовок, различных по массе и геометрическим размерам. При управлении по

этой схеме удастся обеспечить требуемый газодинамический режим с позиции стандартности и точности нагрева изделий. Однако, согласно выражению (1), снижается  $\eta_T$ , то есть экономичность нагрева, которая несколько компенсируется повышением производительности печи. Во многих случаях во главу оценки отопления ставится качество термообработки, а экономия топлива не играет существенной роли.

Существует целый ряд технологий отопления, где управление тепловой мощностью и температурным полем реализуется автономно, независимо друг от друга. Температурное поле формируется распределением горения в объеме рабочей камеры, как, например, при стадийном, объемном и объемно-регенеративном сжигании. Реализация указанных технологий позволяет обеспечить высокое значение  $\eta_T$  и требуемое качество термообработки.

Известны промежуточные способы управления, в частности, различные варианты импульсного отопления и рециркуляции продуктов сгорания.

Выбор способа управления и его реализация непосредственно связаны с выбором технологии отопления и по своей значимости соизмеримы с модернизацией и реконструкцией термических печей.

*Заключение.* Приведенные оценки качества, расчетный анализ и анализ способов управления позволяют обосновать и произвести выбор рациональной технологии отопления с позиции управления, а предложенный метод оценки среднеинтегрального значения коэффициента использования топлива применять при разработке плановой нормы потребления топлива, в частности, природного газа в зависимости от технологически заданных температурных графиков термообработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульц, Л. А. По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии [Текст] / Л. А. Шульц // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 62-69.
2. Еремин, А. О. Современные способы отопления нагревательных печей [Текст] / А. О. Еремин // Металлургическая теплотехника : сб. научн. трудов НМетАУ. – Днепропетровск : Новая идеология, 2008. – С. 139-151.
3. Реконструкция системы отопления камерной закалочной печи с применением шариковых регенераторов [Текст] / В. И. Губинский, А. О. Еремин, С. Л. Губинская, Г. Л. Шевченко // Металлургическая теплотехника : сб. научн. трудов НМетАУ. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – Т. 5. – С. 84-87.
4. Єрьомін, О. О. Дослідження об'ємно-регенеративного опалення камерної печі на основі математичного моделювання руху газів і теплообміну [Текст] / О. О. Єрьомін, А. В. Си-бір, В. Й. Губинський // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : зб. наук. праць НМетАУ. – Дніпропетровськ : Пороги, 2010. – Вип. 2. – С. 96-106.
5. Ревун, М. П. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей [Текст] / М. П. Ревун, Е. Н. Барищенко, А. И. Чепрасов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 97-100.
6. Зинченко, В. Ю. Стабилизация газодинамического режима камерных печей путем комбинирования составляющих смешанного газа [Текст] / В. Ю. Зинченко, М. П. Ревун // Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2007. – Вип. 16. – С. 114-120.
7. Семикин, И. Д. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов [Текст] / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М. : Металлургия, 1965. – 392 с. – Библиогр. : с. 380-383.

8. *Зинченко, В. Ю.* Выбор рационального способа управления отоплением газовых термических печей [Текст] / Зинченко В. Ю., Яковлева И. Г // *Металургія : наукові праці ЗДІА.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2010. – Вип.24. – С. 133-138.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2011 р.

Рецензент проф. Є.М. Крючков