

В.Ю. Зинченко, доц., к.т.н.

И.Г. Яковлева, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ ГАЗОВЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Запорожская государственная инженерная академия

За результатами розрахункового аналізу спалювання газоподібного палива встановлено, що для термічних печей найбільш раціональним є спосіб опалення, котрий передбачає роздільне подавання паливних газів і комбінування їх співвідношення залежно від температури у печі із забезпеченням витрати пічних димових газів, яку задають з умови забезпечення раціонального газодинамічного режиму.

По результатам расчетного анализа сжигания газообразного топлива установлено, что для термических печей наиболее рациональным является способ отопления, предусматривающий раздельную подачу топливных газов и комбинирование их соотношения в зависимости от температуры в печи с обеспечением расхода печных дымовых газов, задаваемого из условия обеспечения рационального газодинамического режима.

Введение. Выбор технологии отопления газовых термических печей осуществляется исходя как из их конструктивных и теплотехнологических особенностей, так и возможности управления тепловой мощностью агрегатов движением дымовых газов в рабочих камерах.

Камерные термические печи отличаются от других аналогичных печей тем, что нагрев и охлаждение садки металла осуществляется вместе с печью, рабочая температура дымовых газов, покидающих рабочую камеру, обычно не превышает 1000 °С, температурно-временные режимы термической обработки – многоступенчатые, а допустимая неравномерность температурного поля в печах не превышает 20...30 °С. Греющие дымовые газы получают путем сжигания газообразного топлива, как правило, в выносных топках, реже – путем факельного сжигания непосредственно в рабочих камерах. Большинство печей не имеют теплоутилизационных устройств.

Этим объясняется существование таких различных технологий отопления, как стадийное сжигание, импульсное отопление, сжигание газа с постоянным расходом воздуха, использование управляемой рециркуляции газов, отопление с раздельной подачей топливных газов и т.д. Нередко возникает необходимость выбора той или иной технологии отопления.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы является определение условий и методики выбора рационального способа управления отоплением с возможностью анализа различных его технологий.

Основная часть. При выборе способа управления отоплением исходят из необходимости одновременного решения двух задач:

- обеспечения тепловой мощности печи, достаточной для реализации технологически необходимых температурно-временных режимов термической обработки;
- организации движения греющих газов, обеспечивающего равномерное распределение температуры в рабочей камере и тем самым стандартность нагрева садки металла.

Теплотехническую оценку отопления печи осуществляют при помощи коэффициента использования топлива (η_T), который характеризует термодинамическую, техническую и экономическую стороны технологии отопления [1].

В случае отсутствия подогрева газа и воздуха выражение для данного коэффициента можно записать как

$$\eta_T = \frac{q^T - q^\delta}{q^T}, \quad (1)$$

где q^T – тепловая мощность печи, обеспечиваемая за счет сжигания топлива, кВт; q^δ – потери тепловой мощности с дымовыми газами, покидающими рабочую камеру печи, кВт.

Представляем q^T и q^δ в виде

$$q^T = V_{22} \cdot C_{22}^{t_{кал}} \cdot t_{кал}; \quad (2)$$

$$q^\delta = V_\delta \cdot C_\delta^{t_\delta} \cdot t_\delta, \quad (3)$$

где V_{22} и V_δ – объемные расходы греющих и дымовых газов соответственно, м³/с; $t_{кал}$, t_δ – калориметрическая температура греющих газов и температура дымовых газов соответственно, °С; $C_{22}^{t_{кал}}$, $C_\delta^{t_\delta}$ – средняя объемная теплоемкость греющих газов при $t_{кал}$ и дымовых газов при t_δ соответственно, кДж/(м³·К).

Тогда, принимая, что в установившемся режиме при отсутствии подсосов холодного воздуха и выбивания дымовых газов из печи $V_{22} = V_\delta$ и $C_{22}^{t_{кал}} = C_\delta^{t_\delta} = C$, получаем:

$$\eta_T = 1 - \frac{t_\delta}{t_{кал}} = \frac{t_{кал} - t_\delta}{t_{кал}}. \quad (4)$$

Однако в действительности $C_\delta^{t_\delta} < C_{22}^{t_{кал}}$ и значения η_T , рассчитанные по формуле (4), всегда ниже фактической величины, то есть выражение (4) осуществляет оценку минимальной величины данного показателя.

Учитывая, что t_δ является конечной температурой дымовых газов, покидающих рабочую камеру печи, отношение

$$\frac{t_\delta}{t_{кал}} = \eta_{пир} \quad (5)$$

является пирометрическим коэффициентом печи, характеризующим как топливо, так и тепловую мощность печи, а также условия теплопередачи в ее рабочей камере.

С учетом отношения (5) выражение (4) принимает вид

$$\eta_T + \eta_{пир} = 1. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо только для принятых допущений и отсутствии подогрева газа и воздуха, величину $\eta_{пир}$ определяют из уравнения теплового баланса печи.

Таким образом, по величине КИТ возможно оценить не только эффективность использования топлива, но и режима отопления в целом.

Таблица 1 – Результаты расчета горения природного и доменного газов с с различным коэффициентом расхода воздуха

| Вид топлива | $\alpha = 1,0$ | | | | | $\alpha = 2,0$ | | | | |
|---------------|---|---|-------------------|----------------------------|------|---|---|-------------------|----------------------------|------|
| | V , м ³ /м ³ | L , м ³ /м ³ | $t_{кал}$, °С | η_T при t_d , °С | | V , м ³ /м ³ | L , м ³ /м ³ | $t_{кал}$, °С | η_T при t_d , °С | |
| | | | | 500 | 1000 | | | | 500 | 1000 |
| Доменный газ | 1,67 | 0,82 | 1487 | 0,64 | 0,33 | 2,49 | 1,64 | 1051 | 0,56 | 0,05 |
| Природный газ | 10,62 | 9,62 | 20,65 | 0,75 | 0,50 | 20,24 | 19,24 | 1233 | 0,60 | 0,19 |

Примечание: V - объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1,0 м³ топлива, м³/м³;

L - теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1,0 м³ топлива, м³/м³

В термических печах температура дымовых газов, покидающих рабочую камеру, изменяется обычно в диапазоне 500...1000 °С. Проведен расчетный анализ пригодности для данного диапазона изменения температуры двух видов топлива: доменного газа как самого низкокалорийного газообразного топлива ($Q_n^p = 4190$ кДж/м³) и природного газа – самого высококалорийного топлива ($Q_n^p = 36200$ кДж/м³). Оценочные расчеты выполнены по упрощенным методикам [1], результаты представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, с учетом величины η_T предпочтительнее использование природного газа. Однако при термической обработке, зачастую, приоритетным считается обеспечение заданного качества обрабатываемого металла. Повышение однородности температурного поля в печи возможно за счет увеличения объема, а, следовательно, скорости движения дымовых газов. Известно, что увеличение объемного расхода газов приводит к повышению турбулентности потока, способствует выравниванию температурного поля в поперечном сечении потока, что равносильно повышению температуры вблизи поверхности изделия.

Тепловая мощность печей изменяется в процессе всего цикла термической обработки от максимального значения в начальный период нагрева до минимального – в конце периода выдержки. Соответственно изменяется объемный расход продуктов сгорания (дымовых газов). При коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 2$ эффективность использования теплоты в обоих случаях снижается.

Для получения одинакового объема продуктов сгорания, равного, например, объему продуктов горения от сжигания 1,0 м³ природного газа, потребуется 8,1 м³ доменного газа, для обеспечения одинаковой тепловой мощности печи расход доменного газа должен быть в 8,6 раз больше, чем природного, а при перерасчете на теплоту, которая остается в печи, при температуре 500 и 1000 °С – соответственно в 10,1 и 13,1 раз больше, чем природного газа, при этом объем продуктов сгорания возрастает в 1,6 и 2,1 раза соответственно.

$$q_1^T < q_2^T \dots < q_n^T, \quad q_1^\partial < q_2^\partial \dots < q_n^\partial$$

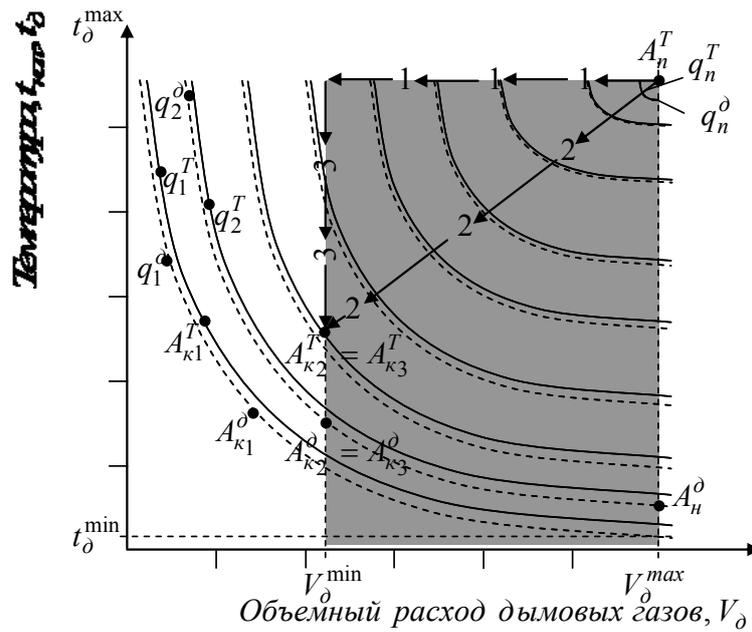


Рисунок 1 – Взаимосвязь режимных параметров отопления печи

Следовательно, с позиции увеличения расхода дымовых газов в качестве топлива предпочтительнее использование доменного газа. Однако рациональный режим отопления печи, очевидно, обеспечивается при использовании смеси доменного и природного газов.

Из приведенного анализа также следует, что режим отопления можно достаточно полно характеризовать при помощи таких режимных переменных: объемный расход дымовых газов V_{∂} ; calorimetric temperature of combustion $t_{кал}$; final temperature of flue gases at the furnace exit t_{∂} , accepted as equal to the temperature in the furnace t_n . Other thermo-technical evaluations: furnace heat power and fuel efficiency coefficient KИТ, – are derivatives of the given values.

On fig. 1 on two overlapping coordinate planes $V_{\partial} - t_{кал}$ and $V_{\partial} - t_{\partial}$ are shown dependencies of heat power q^T and q^{∂} from the considered variables, which can be used for illustration of the choice of a rational heating regime.

Let, for example, at the beginning of heating the points are located on the indicated planes in positions, corresponding to A_n^T and A_n^{∂} .

When choosing a heating regime for the fulfillment of a thermal balance, the following conditions should be observed: during heating $t_{кал} > t_{\partial}$, during cooling $t_{кал} < t_{\partial}$. According to the formulas (4) and (5), depending on the ratio of $t_{кал}$ and t_{∂} , it is possible to evaluate the change in the values of η_T and $\eta_{мур}$ during the entire cycle of thermal processing.

In practice, it is possible to use two methods of controlling heat power:

- by changing the fuel consumption at a constant calorimetric temperature;
- by changing the temperature of the furnace gases at a constant volume of the combustion products.

Конечные положения изображающих точек для первого ($A_{\kappa_1}^T, A_{\kappa_1}^{\partial}$) и второго ($A_{\kappa_2}^T, A_{\kappa_2}^{\partial}$) способов показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в первом случае обеспечивается большее значение η_T , во втором к концу цикла термической обработки – уменьшение η_T за счет выравнивания температур $t_{\text{кал}}$ и t_{∂} , а также снижается экономичность отопления.

Однако в первом случае расход дымовых газов изменяется настолько, что нарушается, согласно [2], автомодельный режим течения газов. Во втором случае расход газа не выходит из области, выделенной темным цветом, тем самым обеспечивается однородность температурного поля в газовом потоке.

Очевидно, что рациональным следует считать комбинированный режим управления – в начале нагрева при максимальной тепловой мощности управление осуществляется изменением расходов природного и доменного газов. При уменьшении значений параметров до величины, соответствующей выходу из выбранной области рациональных значений, управление следует осуществлять путем изменения калориметрической температуры газов в зависимости от температуры в печи. Допустимый диапазон изменения V_{∂} задается в зависимости от вида и объема садки.

Кривые $q_1^T \dots q_n^T$ соответствуют количеству теплоты, выделяемой при сжигании топлива в единицу времени при различной калориметрической температуре $t_{\text{кал}}$, пунктирные кривые $q_1^{\partial} \dots q_n^{\partial}$ – количеству теплоты, удаляемой из печи при различной температуре дымовых газов t_{∂} . Характер зависимостей одинаковый, но для наглядности кривые, соответствующие удаляемой теплоте, показаны пунктиром.

Для конкретной печи, исходя из конструктивно-технологических параметров, можно выделить область допустимых изменений режимных параметров. Так, вводя ограничения по максимальному $V_{\partial}^{\text{max}}$ и минимальному $V_{\partial}^{\text{min}}$ расходу дымовых газов, можно задаться диапазоном изменения их расхода, обеспечивающего рациональный режим отопления, из условия однородности температурного поля. При этом область ограничивается как максимально допустимой температурой дымовых газов $t_{\partial}^{\text{max}}$, так и минимально возможной температурой дымовых газов $t_{\partial}^{\text{min}}$.

Выводы

1. По результатам расчетного анализа сжигания газообразного топлива установлено, что такие режимные параметры, как калориметрическая температура $t_{\text{кал}}$, температура дымовых газов t_{∂} , покидающих рабочую камеру печи, и объемный расход дымовых газов V_{∂} , позволяют достаточно полно охарактеризовать тепловой и газодинамический режимы, экономичность отопления, а также определить рациональный режим отопления и способ управления им.

2. Показано, что для термических печей наиболее рациональным является способ отопления, включающий отдельную подачу топливных газов и комбинирования их соотношения в зависимости от температуры в печи с обеспечением расхода печных дымовых газов, задаваемого из условия обеспечения рационального газодинамического режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семикин И. Д. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М: Металлургия, 1965. – 392 с.

2. *Ревун М. П.* Оптимизация низкотемпературного нагрева в пламенных нагревательных печах / М. П. Ревун, В. Ю. Зинченко, А. Н. Андриенко // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 1-2 (44-45). – С. 60-63.

Стаття надійшла до редакції 21.03.2011 р.
Рецензент, проф. Є.М. Крючков