

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТАДИЙНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Запорожская государственная инженерная академия

Уточнено причины обмеженого застосування способу стадійного спалювання палива в прохідних методичних печах, вплив розподілу тиску в печі на можливість використання зазначеного способу опалення. Розроблено спосіб стабілізації тиску в печі на заданому рівні протягом всього часу нагрівання металу за рахунок комбінування складу змішаного газу, що дозволяє забезпечити задану температуру та тиск у кожній камері прохідної печі за змінного теплового навантаження, а також мінімізувати теплообмін з навколишнім середовищем.

Уточнены причины ограниченного применения способа стадийного сжигания топлива в проходных методических печах, влияние распределения давления в печи на возможность использования указанного способа отопления. Разработан способ стабилизации давления в печи на заданном уровне в течение всего времени нагрева металла за счет комбинирования состава смешанного газа, позволяющий обеспечить заданную температуру и давление в каждой камере проходной печи при переменной тепловой нагрузке, а также минимизировать теплообмен с окружающей средой.

Определение проблемы. Наиболее перспективным применением стадийного сжигания топлива в металлургии является его использование в прокатных цехах при отоплении проходных многозонных нагревательных печей. Внедрение в таких печах послойно-методического режима стадийного сжигания газообразного топлива позволяет уменьшить окисление металла, снизить выбросы в атмосферу оксидов азота, а также повысить качество поверхности проката в 6...10 раз [1].

Стадийный режим сжигания газообразного топлива неоднократно испытывали в методических печах традиционных конструкций. Однако повсеместного распространения данная технология отопления не получила из-за несовершенства систем автоматического управления, прежде всего режима давления, приводящего к загазованности окружающей среды из-за попадания монооксида углерода в атмосферу при выбивании печных газов из печи. Особенно остро данный недостаток проявляется при уменьшении темпа прокатки, вынужденных простоях оборудования и выдержке в печи уже прогретых слэбов. При снижении тепловой нагрузки в печи система автоматического управления не способна полностью стабилизировать давление в ее рабочем пространстве, а также исключить газообмен с окружающей средой.

Решение данной проблемы в настоящее время осуществляют за счет применения при простоях водяного пара, подаваемого в горелочные каналы вместе с газозвдушной смесью, изменением конструкции печей, герметизации рабочих камер с помощью дополнительных кожухов, систем вентиляции и т.п.

Исходные предпосылки и постановка задачи. Известно, что газообмен рабочих камер печей с окружающей средой определяется, прежде всего, величиной избыточного статического давления в печи. Выбивание газов, попадание оксида углерода на рабочие места возможно только при положительном давлении в печи. Распределение давления по длине печи определяется, при прочих равных условиях,

объемным расходом греющих газов и изменяется с изменением тепловой нагрузки. Характер движения газов и распределения давления в печи также определяется динамическим воздействием струй, истекающих из горелок. В областях, прилегающих к выходным от-верстиям горелочных устройств, образуются зоны разрежения, в местах удара струй о кладку или металл давление повышается. Неоднородность распределения давления в печи, обусловленная динамическим воздействием струй, накладывается на распределение давления, связанное с неоднородностью поля температуры.

Задачей системы автоматического регулирования является поддержание нулевого избыточного давления на заданном уровне. Камеры проходных печей оказываются взаимосвязанными, и изменение давления в одной из них сказывается на распределении давления по всей печи. В связи с этим необходимо решить задачу обеспечения автономности управления гидродинамическим режимом печи.

Очевидно, что газообмен в печи можно минимизировать только путем выбора и обеспечения на протяжении всей ее работы оптимального распределения статического давления в рабочем объеме, обеспечивающего как наименьшее выбивание газов, так и минимальный подсос холодного атмосферного воздуха. Первая часть проблемы обычно решается с использованием физического моделирования процесса и проверки при опытно-промышленной эксплуатации, вторая часть – путем оперативного управления режимом отопления.

Задачей данной работы является выбор и обоснование способа управления стадийным сжиганием топлива, обеспечивающего стабилизацию давления в различных зонах печи при переменных тепловых нагрузках.

Общее решение задачи. Решение поставленной задачи возможно только при схемах отопления с управляемым объемом продуктов сгорания. Известен способ отопления [2], при котором изменение тепловой мощности осуществляется путем комбинирования нескольких видов топливных газов, когда при различной тепловой нагрузке объем продуктов сгорания остается постоянным.

Применительно к методическим печам стадийное сжигание реализуется путем сжигания газообразного топлива в томильной и сварочных зонах с коэффициентом расхода первичного воздуха $\alpha_I < 1$ и дожиганием в методической зоне за счет дополнительного вторичного воздуха или кислорода при коэффициенте его расхода $\alpha_{II} > 1$.

Управление сводится к изменению во времени тепловой нагрузки, обеспечивающей заданную температуру $t_{зад}$ по зонам печи, объемного расхода продуктов сгорания, при котором распределение статического давления P_{ji} в объеме отдельных зон соответствует заданному обеспечению α_{II} , при котором сжигание завершается в пределах печи.

Если допустить, что количество теплоты, выделяемой при сжигании топливных газов с теплотой сгорания $[Q_n^p]_k$ при недостатке первичного воздуха, уменьшается в α_I раз, то количество теплоты, вводимой в камеру смешанным газом, можно представить в виде:

$$\sum_{k=1}^m \alpha_I \cdot B_{T_{ik}} [Q_n^p]_k + q_m + q_v = Q_i(t_{zi}), \quad (1)$$

где $B_{T_{ik}}$ – расход k -го топлива, сжигаемого в i -ой зоне; q_m, q_v – физическая теплота топлива и воздуха соответственно.

При отсутствии выбивания печных газов и подсоса холодного атмосферного воздуха равновесная температура в зонах t_{3i} может быть определена из уравнений теплового баланса для каждой зоны:

$$Q_{i-1,i} + \sum_{k=1}^m \alpha_1 \cdot B_{T_{ik}} [Q_n^p]_k + q_m + q_g = \alpha_i^{\Sigma} \cdot F_i \cdot (t_{3i} - t_{нов_i}) + Q_{i,i+1} + Q_{nom_i}, \quad (2)$$

где $Q_{i-1,i}$, $Q_{i,i+1}$ – соответственно теплота, передаваемая газами в i -ую зону из предыдущей ($i - 1$)-ой зоны и теплота, передаваемая газами из i -ой зоны в последующую ($i+1$)-ую зону; $k = 1, 2 \dots m$, $i = 1, 2 \dots n$; α_i^{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи в i -той зоне; F_i – тепловоспринимающая поверхность металла в i -ой зоне; $t_{нов_i}$ – температура поверхности металла в i -ой зоне; Q_{nom_i} – потери теплоты в i -ой зоне.

Объемный расход продуктов сгорания $V(P_i)$, проходящих через каждую i -ую зону печи и определяющих избыточное статическое давление в каждой зоне, может быть определен из уравнения материального баланса:

$$V_{i=1} + \sum_{k=1}^m \alpha_1 \cdot B_{T_{ik}} V_{ik} = V(P_i). \quad (3)$$

Расход воздуха L_{e1} , необходимый для обеспечения первой стадии сжигания в i -ой зоне, определяется как

$$L_{e_i}^I = \sum_{k=1}^m \alpha_1 \cdot L_{0_i} \cdot B_{T_{ik}}, \quad (4)$$

где L_{0_i} – теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания единицы k -го топлива.

При отсутствии линейной зависимости между $[Q_n^p]_k$ и V_k решением системы уравнений (1) и (3) можно определить комбинацию расходов топливных газов, обеспечивающих управляющее воздействие для температуры $Q_i(t_{3i})$ и давления $V(P_i)$.

При $k = 2$ решение системы указанных уравнений единственное, при $k > 2$ имеет место множество решений. С использованием метода линейного программирования можно минимизировать текущую стоимость отопления [2]. В работе [3] показано, что данный способ управления применим для топливных газов с различной природой горючих компонентов.

На второй стадии сжигания воздух или кислород подают через специальные сопла в зависимости от содержания горючих компонентов в продуктах недожога. Стехиометрически необходимый расход воздуха на второй стадии сжигания можно определить из уравнения:

$$L_{e_i}^{II} = \sum L_{0_k} \cdot B_{e_{ik}} \cdot (1 - \alpha_1) = L_e^{II}. \quad (4)$$

Фактически текущий расход воздуха L_e^{II} зависит от α_1 и условий перемешивания воздуха с продуктами недожога.

Управление расходом воздуха на второй стадии возможно согласно уравнению (4) с коррекцией по содержанию кислорода в продуктах сгорания на выходе из печи.

Пример функциональной реализации способа управления. Рассмотрено стадийное отопление трехзонной методической печи смесью природного и доменного газов.

Рациональный график распределения статического давления задают по результатам математического моделирования в виде величины давления в каждой из зон P_1 , P_2 и P_3 . Температурный режим – трехступенчатый: задают температуру по зонам t_{31} , t_{32} , t_{33} .

Природный и доменный газы подводят к печи отдельно, комбинирование и смешивание газов осуществляют непосредственно перед их подачей в горелки.

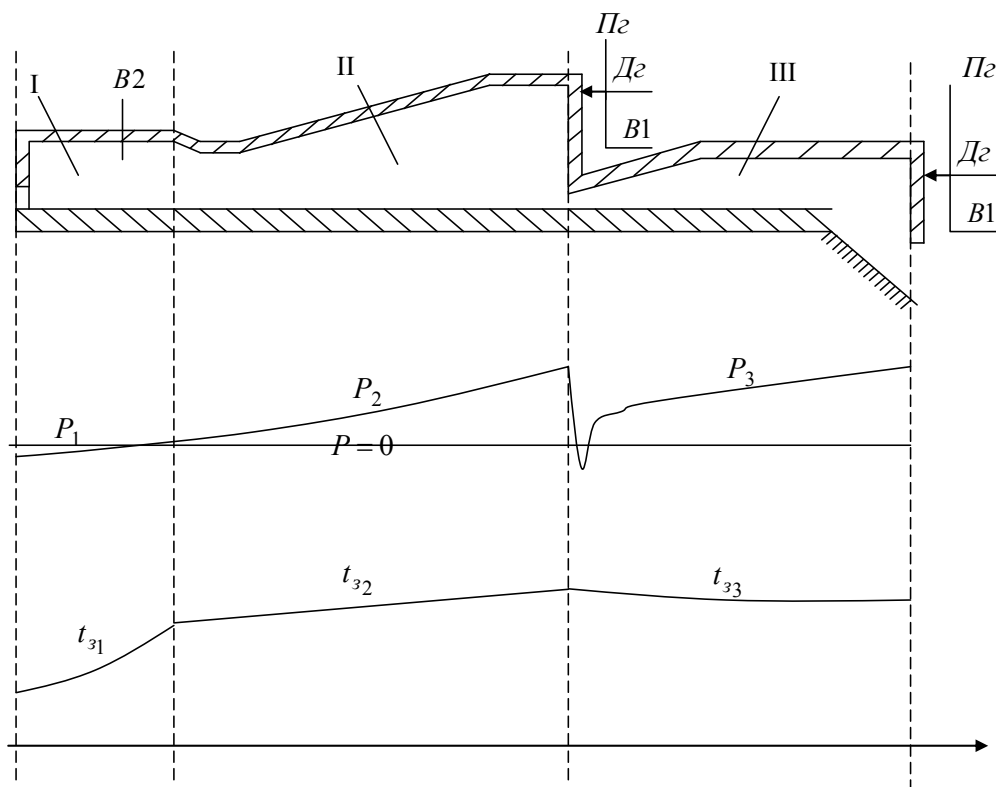


Рисунок 1 – Типовая трехзонная печь, режим давления и температурный график

На рис. 1 показано продольное сечение трехзонной методической печи. Горелки установлены в торцевых стенках рабочих камер. Изменение скорости газов по длине камер при переменной подаче топлива обуславливает непостоянство распределения давления в зонах печи, возможен подсос холодного воздуха, а также разрежение в области горелок.

Уравнения (1) и (2) для рассматриваемого случая могут быть представлены в виде системы уравнений для каждой отапливаемой зоны:

$$\begin{cases} \alpha_{I_i} \cdot B_{n2_i} \cdot [Q_H^p]_{n2} + \alpha_{I_i} \cdot B_{\partial2_i} \cdot [Q_H^p]_{\partial2} = Q_i(t_{3_i}), \\ \alpha_{I_i} \cdot B_{n2_i} \cdot V_{n2} + \alpha_{I_i} \cdot B_{\partial2_i} \cdot V_{\partial2} = V(P_i). \end{cases} \quad (5)$$

При режиме отопления с постоянным объемом $V(P_i)$ можно обеспечить изменение тепловой нагрузки от максимального значения $Q_i(t_{3_i})^{\max}$ до минимального $Q_i(t_{3_i})^{\min}$ согласно соотношению:

$$U = \frac{Q_i(t_{3_i})^{\max}}{Q_i(t_{3_i})^{\min}} = \left[\frac{Q_H^p}{Q_H^p} \right]_{n_2} \cdot \frac{V_{\partial_2}}{V_{n_2}}. \quad (6)$$

При $[Q_H^p]_{n_2} = 33495 \text{ кДж/м}^3$ и $[Q_H^p]_{\partial_2} = 3350 \text{ кДж/м}^3$ получают $U = 1,5$.

Аналогичное соотношение имеет место и для управления давлением в зонах при постоянной тепловой нагрузке. Расширить диапазон регулирования можно применением третьего топливного газа или водяного пара.

На рис. 2 показана упрощенная функциональная схема взаимосвязанного каскадного управления тепловой нагрузкой и давлением в одной из отапливаемых камер печи.

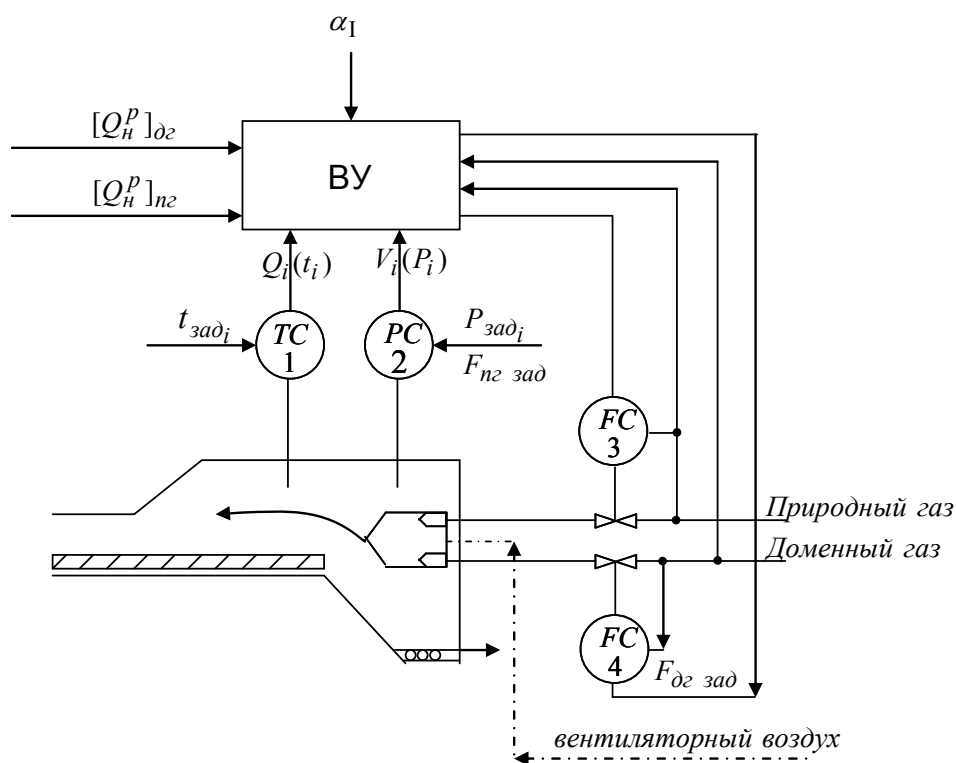


Рисунок 2 – Упрощенная функциональная схема взаимосвязанного каскадного управления тепловой нагрузкой и давлением

Регуляторы температуры 1 и давления 2 в зависимости от отклонения регулируемой величины относительно заданного значения $t_{зад_i}$ и $P_{зад_i}$ формируют управляющие воздействия $Q(t_i)$ и $V(P_i)$. Вычислительное устройство на основании уравнений (1) и (2) корректирует задание регуляторам расхода природного $F_{np_зад}$ (3) и доменного $F_{дг_зад}$ (4) газов. Исходя из того, что объектами управления для регуляторов расхода 3 и 4 являются участки трубопроводов, заключенные между точками измерения и дросселирования, регуляторы расходов реализуют простейшие «И» или «П» законы регулирования.

Регулирование горения топлива возможно или типовыми схемами соотношения «топливо–воздух» или при помощи спаренных дросселей, но с учетом того, что $\alpha_1 < 1$.

Общая схема регулирования давления в печи – типовая схема с управляющим воздействием на положение общего шибер в сборном борове. При этом изменяется положение поверхности нулевого давления, а регулятор 2 корректирует его до требуемого значения в каждой зоне.

Реализацию всей системы в целом осуществляют на типовых микропроцессорных средствах управления с возможностью включения в АСУ ТП нагрева металла.

Задания зонным регуляторам температуры и давления для каждого режима работы устанавливают дистанционным путем или автоматически в зависимости от информации о течении процесса и тепловом состоянии металла.

Заклучение. Способ отдельной подачи топливных газов с комбинированием их непосредственно при сжигании позволяет обеспечить требуемую температуру и давление в каждой камере проходной печи при переменной тепловой нагрузке и, тем самым, обеспечить рациональный график по длине печи, минимизируя газообмен с окружающей средой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шульц Л. А.* По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии / Л. А. Шульц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 62-69.
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. – С. 60-63.
3. *Зинченко В. Ю.* Организация распределения температуры и давления в рабочих камерах термических печей / В. Ю. Зинченко, М. П. Ревун // Металургійна теплотехніка: збірник наукових праць НМетАУ. – Дніпропетровськ: «Новая идеология», Вып. 1-2. – 2008. – С. 102-103.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2010 р.
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева