

ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук, **И.А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет

В работе предложены принципы регулирования технологическим процессом в печах химико-термической и термической обработки. Разработаны функциональные схемы управления тепловой нагрузки и состава атмосферы зоны топливной и электрической печи (одно- и многозонной) химико-термической обработки.

Ключевые слова: *регулирование технологических процессов, печи, термическая и химико-термическая обработка, функциональные схемы управления.*

PRINCIPLES OF REGULATING TECHNOLOGICAL PROCESSES IN FURNACES OF THERMAL AND CHEMICAL-THERMAL TREATMENT

P.E. RATNIKOV, Ph. D in Technical Sciences, **I.A. TRUSOVA**,
Dr. of Engineering Sciences
Belarusian National Technical University

The paper proposes the principles of regulation of the technological process in the furnaces of chemical-thermal and heat treatment. Functional schemes for controlling the heat load and the composition of the atmosphere in the zone of the fuel and electric furnace (single and multi-zone) of chemical-thermal treatment have been developed.

Keywords: *regulation of technological processes, furnaces, thermal and chemical-thermal treatment, functional control schemes.*

Введение. Управление тепловой работой топливных высокотемпературных агрегатов является весьма важной задачей для печей термической и химико-термической обработки, так как управление температурой печной среды позволяет регулировать температуру

металла, подвергаемого обработке. Особую актуальность это имеет для многозонных проходных термических и химико-термических печей, так как каждая зона таких печей является самостоятельным объектом регулирования температуры в рабочем пространстве, соотношения «топливо-воздух» и давления. К химико-термическим печам предъявляется еще и требование регулирования состава защитной атмосферы.

Печи, как объекты регулирования, относятся к статическим объектам (объектам с самовыравниванием) [1]. Температурный режим отдельных зон печи определяет характер их статических характеристик, причем режим работы смежных зон может оказывать существенное влияние на статические характеристики рассматриваемой зоны (статические характеристики зависят от тепловой нагрузки и соотношения температур в рассматриваемых зонах).

Алгоритм регулирования тепловой работой топливных печей. При описании динамики объекта регулирования введем ряд допущений:

- теплоемкость (теплосодержание) зоны будем рассматривать как некую приведенную теплоемкость (теплосодержание) без разделения ее на отдельные элементы (теплоемкость садки, футеровки, газов);

- прирост приведенной теплоемкости зоны не зависит от увеличения температуры;

- давление печной атмосферы является постоянным, что позволяет рассматривать энтальпию, как произведение удельной теплоемкости на массу и температуру.

Уравнение теплового баланса зоны будет иметь вид

$$Q_{\Sigma \text{прих}} = Q_{\text{пр}} + \sum Q_{\text{расх}}, \quad (1)$$

где $Q_{\Sigma \text{прих}}$ – суммарный приход теплоты в зону, Дж; $Q_{\text{пр}}$ – теплоемкость зоны (теплота, аккумулированная садкой, кладкой и т. д.), Дж; $\sum Q_{\text{расх}}$ – суммарные теплотери в зоне, Дж.

Пренебрежем химическим и механическим недожогами и тепловой экзотермических реакций, что имеет место для печей термической и химико-термической обработки. Тогда запишем

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{расх}} &= Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{охл.ср}} + Q_{\text{ух.г}} + Q_{\text{з.атм}}; \\ Q_{\sum \text{прих } p} &= B[Q_{\text{р}}^{\text{н}} + L_{\text{в}}^{\text{д}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] = B(Q_{\text{р}}^{\text{н}} + K_{\text{рек}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}); \quad (2) \\ Q_{\text{пр}} &= Q_{\text{мет}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{акк}} + \delta Q_{\text{з.атм}} = M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} t, \end{aligned}$$

где $Q_{\text{кл}}$ – тепловые потери через кладку, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{изл}}$ – тепловые потери через излучением открытые окна и проемы, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{охл.ср}}$ – тепловые потери с охлаждающей средой, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{ух.г}}$ – тепловые потери с уходящими газами, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{з.атм}}$ – тепловые потери с защитной атмосферой, МВт (МДж/цикл); B – расход топлива, м³/с, (м³/цикл); $Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива, МДж/м³; $L_{\text{в}}^{\text{д}}$ – действительное количество воздуха для сжигания газообразного топлива, м³/м³; $V_{\text{д.г}}$ – объем уходящих дымовых газов, м³/м³; $i_{\text{д.г}}$ – энтальпия уходящих дымовых газов, МДж/м³; $i_{\text{в}}$ – энтальпия подогретого воздуха, МДж/м³; $i_{\text{в}}^0$ – начальная энтальпия воздуха, МДж/м³; $K_{\text{рек}}$ – коэффициент рекуперации теплоты отходящих газов; $Q_{\text{мет}}$ – теплота, затраченная на нагрев металла, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{тр}}$ – теплота, затраченная на нагрев транспортирующих устройств, МВт (МДж/цикл); $Q_{\text{акк}}$ – теплота, аккумулированная кладкой, МВт (МДж/цикл); $\delta Q_{\text{з.атм}}$ – теплота, аккумулированная защитной атмосферой, МВт (МДж/цикл).

Потери с уходящими газами будут учитывать и возможные подсосы воздуха $Q_{\text{ух.г}} = B(V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}} + V_{\text{подс}} i_{\text{в}}^{t_{\text{д.г}}})$, а потери теплоты с удалением защитной атмосферы рабочего пространства будут равны $Q_{\text{з.атм}} = G_{\text{з.атм}} c_{\text{з.атм}} t$. При расчете приведенного теплосодержания зоны необходимо учесть теплоту, аккумулированную защитной атмосферой

$$\delta Q_{\text{з.атм}} = G_{\text{з.атм}} (c_{\text{з.атм}}^{t_{\text{печ}}} t_{\text{печ}} - c_{\text{з.атм}}^{t_0} t_0).$$

Здесь введены следующие обозначения:

$G_{\text{з.атм}}$ – расход защитной атмосферы, м³/с, (м³/цикл); $i_{\text{в}}^{t_{\text{д.г}}}$ – энтальпия воздуха (подсосы), нагретого до температуры дымовых га-

зов, °С; $c^{t=t_{\text{печ}}}$ и $c^{t=t_0}$ – соответственно теплоемкости эндогаза при входе в печь и выходе из нее.

При подводе в печь дополнительной энергии увеличивается приведенное теплосодержание зоны и изменяются теплотопотери

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\Sigma \text{прих}} &= \frac{d}{dt} Q_{\text{пр}} + \Delta \Sigma Q_{\text{расх}}; \\ M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} \frac{dt}{dt} &= \Delta Q_{\Sigma \text{прих}} - \Delta \Sigma Q_{\text{расх}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) представляют собой уравнения динамики объекта регулирования.

Изменение теплоты, вносимой в печь, будет равно

$$\Delta Q_{\Sigma \text{прих}} = \Delta B [Q_{\text{р}}^{\text{н}} + L_{\text{в}}^{\text{д}} (i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] = \Delta B (Q_{\text{р}}^{\text{н}} + K_{\text{рек}} V_{\text{д.г}} i_{\text{д.г}}). \quad (4)$$

Расход топлива B является величиной переменной, зависящей от характеристик топлива, давления перед горелочным устройством и регулировки управляющего органа

$$B = B(k, m, p_{\text{в}}), \quad (5)$$

где k – соотношение «топливо-воздух» (учитывает теоретическое количество воздуха и коэффициент избытка воздуха), $\text{м}^3/\text{м}^3$; $p_{\text{в}}$ – избыточное давление воздуха перед горелкой, Па; m – степень открытия регулирующего органа.

Увеличение расхода теплоты

$$\Delta \Sigma Q_{\text{расх}} = \Delta Q_{\text{кл}} + \Delta Q_{\text{изл}} + \Delta Q_{\text{охл.ср}} + \Delta Q_{\text{у.г}} + \Delta Q_{\text{з.атм}}. \quad (6)$$

Слагаемые, входящие в уравнение (6), являются функциями следующих параметров

$$\begin{aligned} Q_{\text{кл}} &= f(t_{\text{кл}}, t_{\text{окр.ср}}, \alpha, \lambda_t, F_{\text{кл}}); \\ Q_{\text{изл}} &= f(\varepsilon, T_{\text{г}}^4, T_{\text{кл}}^4, F_{\text{кл}}, F_{\text{м}}, \tau); \\ Q_{\text{у.г}} &= f(B, V_{\text{д.г}}, c_{\text{д.г}}, t_{\text{д.г}}); \end{aligned} \quad (7)$$

$$Q_{3.атм} = f(t_{д.г});$$

$$Q_{охл.ср} = f(t_{кл}),$$

где $t_{кл}$ – температура кладки, °С; $t_{окр.ср}$ – температура окружающей среды, °С; α – коэффициент теплоотдачи от кладки к воздуху, Вт/(м²·°С); λ_i – коэффициент теплопроводности i -того слоя кладки, Вт/(м·°С); $F_{кл}$ – площадь кладки, м²; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты газов, Вт/(м²·К⁴); F_M – площадь металла, м²; τ – время, с.

В уравнениях (7) потери теплоты $Q_{кл}$, $Q_{изл}$, $Q_{охл.ср}$, $Q_{ух.г}$, $Q_{3.атм}$ являются в общем случае нелинейными функциями исходных переменных $\varepsilon_{пр}$, $T_{г}^4$, $T_{кл}^4$, $F_{кл}$, F_M , B , $V_{д.г}$, $c_{д.г}$, $t_{д.г}$. и поэтому уравнение динамики (3) будет нелинейным. Выполним линеаризацию указанных функций по методу Ляпунова [2]:

$$B = f_1(m, p_B);$$

$$Q_{кл} = f_2(t);$$

$$Q_{ух.г} = f_3(B, t) = f_3(m, p_B, t); \quad (8)$$

$$Q_{охл} = f_4(t);$$

$$Q_{3.атм} = f_5(t).$$

Получим

$$\Delta B = \frac{\partial f_1}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial f_1}{\partial p_B} \Delta p_B;$$

$$\Delta Q_{кл} = \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t;$$

$$\Delta Q_{ух.г} = \frac{\partial f_3}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial f_3}{\partial p_B} \Delta p_B + \frac{\partial f_3}{\partial t} \Delta t; \quad (9)$$

$$\Delta Q_{охл} = \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t;$$

$$Q_{3.атм} = \frac{\partial f_5}{\partial t} \Delta t.$$

Подставляя выражение (9) в уравнение динамики (3), получим

$$M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} \frac{\partial t}{\partial \tau} = [Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] \left(\frac{\partial f_1}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial f_1}{\partial p_{\text{в}}} \Delta p_{\text{в}} \right) - \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial f_3}{\partial m} \Delta m - \frac{\partial f_3}{\partial p_{\text{в}}} \Delta p_{\text{в}} - \frac{\partial f_3}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial f_5}{\partial t} \Delta t \quad (10)$$

и

$$M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial f_3}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial f_5}{\partial t} \Delta t = \left([Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] \frac{\partial f_1}{\partial m} \Delta m - \frac{\partial f_3}{\partial m} \Delta m \right) + \left([Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] \frac{\partial f_1}{\partial p_{\text{в}}} \Delta p_{\text{в}} - \frac{\partial f_3}{\partial p_{\text{в}}} \Delta p_{\text{в}} \right). \quad (11)$$

Разделим уравнение (11) на максимальный приход теплоты $B_{\text{max}}[Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)]$ и перейдем к безразмерным переменным

$$\begin{aligned} & \frac{M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} t_{\text{H}}}{B_{\text{max}}[Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)]} \frac{d \frac{\Delta t}{t_{\text{H}}}}{d \tau} + \\ & + \frac{t_3}{B_{\text{max}}[Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)]} \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} + \frac{\partial f_5}{\partial t} \right) \frac{\Delta t}{t_{\text{H}}} = \\ & = \frac{m_{\text{max}}}{B_{\text{max}}[Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)]} \left([Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] \frac{\partial f_1}{\partial m} - \frac{\partial f_3}{\partial m} \right) \frac{\Delta m}{m_{\text{max}}} + \\ & + \frac{p_{\text{H}}}{B_{\text{max}}[Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)]} \left([Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)] \frac{\partial f_1}{\partial p_{\text{в}}} - \frac{\partial f_3}{\partial p_{\text{в}}} \right) \frac{\Delta p_{\text{в}}}{p_{\text{H}}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где t_{H} – номинальная (заданная) температура газов в зоне, °С; p_{H} – номинальное давление газа перед горелками, Па; m_{max} – максимальное открытие регулирующего органа.

Введем следующие обозначения и безразмерные параметры

$$T = \frac{M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} t_{\text{H}}}{B_{\text{max}}[Q_{\text{п}}^{\text{H}} + L_{\text{в}}^{\text{Л}}(i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^0)]};$$

$$A = \frac{t_3}{B_{\max}[Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)]} \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_3}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} + \frac{\partial f_5}{\partial t} \right);$$

$$a_1 = \frac{m_{\max}}{B_{\max}[Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)]} \left([Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)] \frac{\partial f_1}{\partial m} - \frac{\partial f_3}{\partial m} \right); \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{P_H}{B_{\max}[Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)]} \left([Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)] \frac{\partial f_1}{\partial p_H} - \frac{\partial f_3}{\partial p_H} \right);$$

$$\theta = \frac{\Delta t}{t_H}; \quad M = \frac{\Delta m}{m_{\max}}; \quad P = \frac{\Delta p_H}{P_H}.$$

В выражении (13) переменные имеют следующий смысл:

T – параметр, определяющий время нахождения материала в зоне, с; A – параметр саморегулирования объекта; a_1 – коэффициент эффективности регулирующего воздействия; a_2 – коэффициент эффективности возмущающего воздействия; θ – относительное изменение регулируемой величины; M – относительное изменение регулирующего воздействия; P – относительное изменение возмущающего воздействия.

После подстановки уравнение динамики (12) будет иметь вид

$$T \frac{d\theta}{dt} + A\theta = a_1 M + a_2 P. \quad (14)$$

Проанализируем коэффициенты этого уравнения. Поскольку $\frac{\partial f_2}{\partial t} > 0$ и $\frac{\partial f_3}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial f_4}{\partial t} > 0$ и $\frac{\partial f_5}{\partial t} > 0$, то и $A > 0$. Это означает, что печь (зона печи) обладает положительным регулированием. Другие частные производные также положительны $\frac{\partial f_1}{\partial m} > 0$, $\frac{\partial f_3}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial f_1}{\partial p_H} > 0$, $\frac{\partial f_3}{\partial p_H} > 0$.

Коэффициенты a_1 и a_2 тоже являются положительными, так как выполняются условия $[Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)] \frac{\partial f_1}{\partial m} > \frac{\partial f_3}{\partial m}$ и $[Q_p^H + L_B^D(i_B - i_B^0)] \frac{\partial f_1}{\partial p_B} > \frac{\partial f_3}{\partial p_B}$.

Полученное уравнение динамики (14) показывает, что объект регулирования (температура в зоне печи) является объектом с положительным саморегулированием.

Запишем уравнение общей тепловой нагрузки топливной печи через коэффициент использования топлива, который показывает долю теплоты, оставшуюся в рабочем пространстве от всей теплоты, поступившей в него

$$Q_{\Sigma \text{прих}} = \frac{Q_{\text{пол}} + \sum Q_{\text{пот}}}{\eta_{\text{и.т}}}, \quad (15)$$

где $Q_{\Sigma \text{прих}}$ – общий приход теплоты (тепловая нагрузка); $Q_{\text{пол}}$ – полезно усвоенная теплота; $\sum Q_{\text{пот}}$ – сумма потерь за исключением потерь с уходящими газами.

Полезная теплота равна

$$Q_{\text{пол}} = P \Delta i = M_{\text{заг}} \Delta i_M T_{\text{выд}}, \quad (16)$$

где P – производительность печи, кг/с или т/ч; $M_{\text{заг}}$ – масса 1 заготовки (1 ящика с деталями); Δi_M – прирост удельной энтальпии от начального до конечного значения, МДж/кг; $T_{\text{выд}}$ – темп выдачи, 1/с или 1/ч.

Коэффициент использования теплоты топлива определяется по выражению

$$\eta_{\text{и.т}} = \frac{Q_N^P + Q_{\text{физ}} - Q_{\text{ух.г}}}{Q_N^P} = \frac{\frac{Q_N^P}{V_{\text{д.г}}} + \frac{L_B^D}{V_{\text{д.г}}} c_B t_B + \frac{c_T t_T}{V_{\text{д.г}}} - c_{\text{д.г}} t_{\text{д.г}}}{Q_N^P / V_{\text{д.г}}}. \quad (17)$$

Разделив на $Q_N^P / V_{\text{д.г}}$, получим

$$\eta_{и.т} = 1 + \frac{L_B^D c_B t_B}{Q_H^P} + \frac{c_T t_T}{Q_H^P} - c_{д.г} t_{д.г} \frac{V_{д.г}}{Q_H^P}.$$

Введем обозначения $k_1 = \frac{L_B^D c_B}{Q_H^P}$; $k_2 = \frac{c_T}{Q_H^P}$; $k_3 = c_{д.г} \frac{V_{д.г}}{Q_H^P}$ и учтем,

что $\Sigma Q_{пот}$ в первом приближении величина постоянная ($\Sigma Q_{пот} = C$). Тогда

$$Q_{\Sigma прих} = \frac{M_{заг} \Delta i_M T_{выд} + C}{1 + k_1 t_B + k_2 t_T + k_3 t_{д.г}}. \quad (18)$$

Выражение (18) может использоваться при разработке алгоритма управления автоматической подачи топлива в горелочное устройство.

При решении вопроса о распределении тепловой нагрузки между зонами многозонной термической (химико-термической) печи нужно учитывать, что $Q_{\Sigma прих}$ соответствует температуре печи в период выдержки металла в зоне. В качестве регулирующих параметров следует принимать температуру металла в зонах печи согласно технологической карте нагрева.

Функциональные схемы регулирования тепловой нагрузки однозонной (камерной) и многозонной (на примере трехзонной) топливных печей показаны на рисунках 1 и 2. Пунктиром выделен блок, позволяющий находить управляемую величину $Q_{\Sigma прих}$ при переменном режиме работы печи. В качестве регулируемых параметров приняты температуры поверхности материала в технологических зонах.

Как видно из рисунков 1 и 2, блок-схемы управления тепловым режимом термических печей состоят из двух основных частей: контролера, позволяющего рассчитывать тепловую нагрузку печи (или отдельной ее зоны), исходя из заданных параметров и показаний датчиков (отдельной зоны печи), и регуляторов и корректоров температур металла в зонах.



Рисунок 1 – Функциональная схема регулирования тепловой нагрузки однозонной (камерной) топливной термической печи

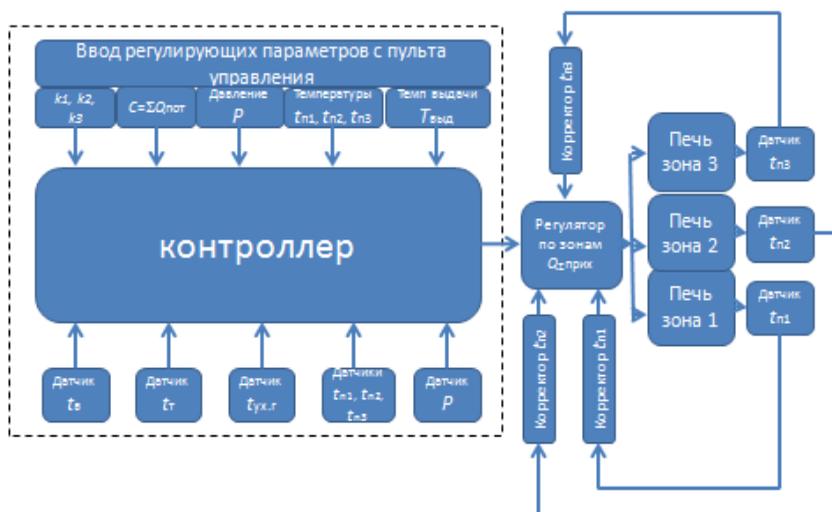


Рисунок 2 – Функциональная схема регулирования тепловой нагрузки трехзонной топливной термической печи

Если в печи осуществляется химико-термическая обработка, или термообработка происходит в восстановительной атмосфере, то возникает необходимость контролировать и регулировать состав печной атмосферы (например, углеродный потенциал в процессе

цементации). Функциональная схема регулирования тепловой нагрузки и состава атмосферы зоны химико-термической обработки печи приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Функциональная схема регулирования тепловой нагрузки и состава атмосферы зоны топливной печи химико-термической обработки

В процессе регулирования тепловой нагрузки печи (отдельных ее зон) необходимо организовывать процесс сжигания топлива с минимальным химическим и механическим недожогом, и возникает необходимость соответствующим образом подбирать типы горелочных устройств.

Алгоритм регулирования тепловой работы электрических печей. Регулирование температуры в печах сопротивления осуществить проще, чем в топливных печах. При пренебрежении экзотермическими реакциями уравнение (2) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Sigma Q_{\text{расх}} &= Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{охл.ср}} + Q_{\text{з.атм}}; \\ \Sigma Q_{\text{прих}} &= N_{\text{печи}} \cdot \tau; \\ Q_{\text{пр}} &= Q_{\text{мет}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{акк}} + \Delta Q_{\text{з.атм}} = M_{\text{пр}} c_{\text{пр}} t. \end{aligned} \quad (19)$$

Уравнение динамики в этом случае запишется

$$M_{\text{пр}c_{\text{пр}}} \frac{dt}{d\tau} = \Delta Q_{\Sigma \text{прих}} - \Delta Q_{\Sigma \text{расх}}, \quad (20)$$

где $\Delta Q_{\Sigma \text{прих}} = \Delta N_{\text{печи}}$, $\Delta Q_{\Sigma \text{расх}} = \Delta Q_{\text{кл}} + \Delta Q_{\text{изл}} + \Delta Q_{\text{охл.ср}} + \Delta Q_{\text{з.атм}}$.

Мощность, потребляемая печью, будет являться переменной величиной, зависящей лишь от регулировки управляющего органа. Регулирование мощностью печи можно осуществлять следующими способами:

- переключение нагревателей на другую схему подключения, например, с «треугольника» на «звезду» (недостаток – очень грубое ступенчатое регулирование);

- встройка в цепь подключения печи реостата (недостаток – большие потери энергии вне печи);

- осуществление питания печи через регулировочный трансформатор (недостаток – грубое регулирование, дополнительные потери энергии в трансформаторе, снижение коэффициента мощности);

- фазовое регулирование с помощью тиристорных преобразователей.

В последнем способе регулирования мощностью электропечи можно получить плавное регулирование в широких пределах. Рассмотрим этот способ более подробно. Мощность печи является функцией смещения фазы тока и напряжения-коэффициента мощности

$$N = N(\cos\varphi). \quad (21)$$

Уравнения (9) будут иметь вид

$$\Delta N = \frac{\partial f_1}{\partial \cos\varphi} \Delta \cos\varphi; \quad \Delta Q_{\text{кл}} = \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t; \quad \Delta Q_{\text{охл}} = \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t; \quad \Delta Q_{\text{з.атм}} = \frac{\partial f_5}{\partial t} \Delta t. \quad (22)$$

При подстановке (22) в уравнение динамики (20) получим

$$M_{\text{пр}c_{\text{пр}}} \frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial f_1}{\partial \cos\varphi} \Delta \cos\varphi - \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial f_5}{\partial t} \Delta t \quad (23)$$

или

$$M_{\text{пр}c_{\text{пр}}} \frac{dt}{d\tau} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} + \frac{\partial f_5}{\partial t} \right) \Delta t = \frac{\partial f_1}{\partial(\cos\varphi)} \Delta \cos\varphi. \quad (24)$$

Разделим уравнение (24) на N_{max} (номинальную мощность) и перейдем к безразмерным переменным

$$\frac{M_{\text{пр}c_{\text{пр}}t_3}}{N_{\text{max}}} \frac{d \frac{\Delta t}{t_3}}{d\tau} + \frac{t_3}{N_{\text{max}}} \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} + \frac{\partial f_5}{\partial t} \right) \frac{\Delta t}{t_3} = \frac{(\cos\varphi)_{\text{max}}}{N_{\text{max}}} \frac{\partial f_1}{\partial(\cos\varphi)} \frac{\Delta(\cos\varphi)}{(\cos\varphi)_{\text{max}}}. \quad (25)$$

Учитывая, что максимальное значение $(\cos\varphi)_{\text{max}} = 1$ (при смещении фаз $\varphi = 0$), получим

$$\frac{M_{\text{пр}c_{\text{пр}}t_3}}{N_{\text{max}}} \frac{d \frac{\Delta t}{t_3}}{d\tau} + \frac{t_3}{N_{\text{max}}} \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} + \frac{\partial f_5}{\partial t} \right) \frac{\Delta t}{t_3} = \frac{1}{N_{\text{max}}} \frac{\partial f_1}{\partial(\cos\varphi)} \Delta(\cos\varphi). \quad (26)$$

Введем следующие обозначения и безразмерные параметры

$$T = \frac{M_{\text{пр}c_{\text{пр}}t_3}}{N_{\text{max}}}; \quad A = \frac{t_3}{N_{\text{max}}} \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} + \frac{\partial f_5}{\partial t} \right);$$

$$a_1 = \frac{1}{N_{\text{max}}} \frac{\partial f_1}{\partial(\cos\varphi)}; \quad \theta = \frac{\Delta t}{t_3}; \quad \Phi = \Delta(\cos\varphi).$$

Получаем следующее уравнение динамики

$$T \frac{d\theta}{d\tau} + A\theta = a_1\Phi. \quad (27)$$

Как и в случае топливных печей (выражение (14)), коэффициенты в уравнении (27) положительны, и температура печи является объектом с положительным саморегулированием.

По аналогии с уравнением (17) уравнение общей тепловой нагрузки электрической печи будет иметь вид

$$Q_{\Sigma\text{прих}} = N(\tau) = M_{\text{заг}} \Delta i_{\text{м}} T_{\text{выд}} + C. \quad (28)$$

Очевидно, что полезная теплота и тепловые потери линейно зависят от подаваемой мощности, поэтому алгоритм управления автоматической подачей мощности в печь будет также линейным.

Функциональные схемы регулирования тепловой нагрузки однозонной (камерной) и многозонной (на примере трехзонной) электрических термических печей показаны на рисунках 4 и 5, а схема регулирования тепловой нагрузки и состава атмосферы зоны химико-термической обработки электропечи приведена на рисунке 6.



Рисунок 4 – Функциональные схемы регулирования тепловой мощности однозонной электрической термической печи

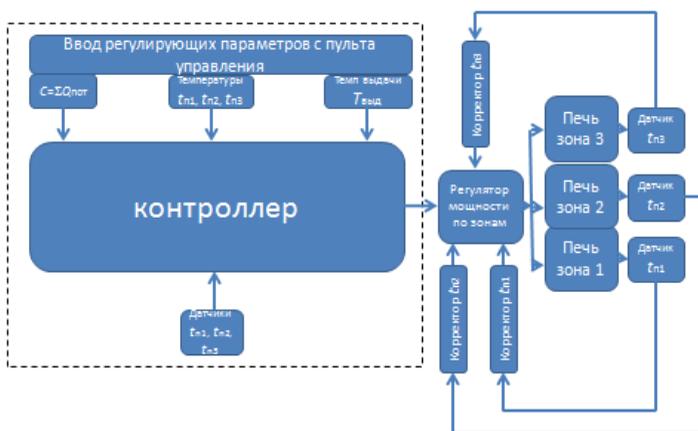


Рисунок 5 – Функциональные схемы регулирования тепловой мощности многозонной (трехзонной) электрической термической печи



Рисунок 6 – Функциональная схема регулирования тепловой нагрузки и состава атмосферы зоны электрической печи химико-термической обработки

Заключение. В работе предложены принципы регулирования технологическим процессом и функциональные схемы управления промышленными печами, предназначенными для термической и химико-термической обработки. Приведен алгоритм схемы регулирования для топливных и электрических печей.

Список литературы

1. **Автоматическое** регулирование технологических процессов: Методические указания к лабораторным работам. Ч. 1 / В.А. Ульянов [и др.]. – Нижний Новгород: НГТУ, 2012. – 35 с.
2. **Ляпунов, А.М.** Общая задача об устойчивости движения / А.М. Ляпунов. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 472 с.

References

1. *Avtomaticheskoe regulirovanie tekhnologicheskikh processov: Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam. Ch. 1* [Automatic regulation of technological processes: Methodical instructions for laboratory work. Part 1] / V.A. Ulyanov [et al.]. – Nizhny Novgorod: NGTU Publ., 2012. – 35 p.

2. Lyapunov, A.M. *Obshchaya zadacha ob ustojchivosti dvizheniya*
[General problem of motion stability] / A.M. Lyapunov. – Moscow-
Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy litera-
tury Publ., 1950. – 472 p.

Поступила 25.10.2021
Received 25.10.2021