

Выводы

Разработанная по описанному алгоритму вычислительная программа может быть использована при расчете процессов теплообмена через многослойную стенку с внутренними источниками тепла при проектировании систем обогрева открытых участков земли на спортивных площадках и стадионах. Кроме того, она будет полезна при расчете и проектировании систем панельного отопления, определении тепловых потерь через ограждения зданий, определении потерь через обмуровку котлов и других тепловых агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крафт Г. Системы низкотемпературного отопления – М.: Стройиздат, 1983. – 108 с.
2. Paul Appleby. Ceiling paneling cooling the premiseses. // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика №3 – Киев, 2001. – с. 15 – 25.
3. Кукса О. Напольное водяное отопление. // Водная техника от 1.09.2005 – Киев, 2005. – с. 10 – 20.
4. Роберт Рябаш Системы отопления помещений в аспекте теплового комфорта и технологических требований. // Ринок інсталяційний, август 1997. – с. 15 – 17.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
6. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.

пост. 03.12.2009

**Алгоритмы модернизированного управления доменным процессом.
 Публикация IV. Подсистема автоматизированного управления тепловым
 состоянием доменной печи (ПАУТСДП)**

СМОЛЯК В.А., СМОЛЯК С.В.

Днепродзержинский государственный технический университет
 ОАО Днепропетровский металлургический комбинат имени Ф.Э.Дзержинского (ДМКД)

Эффективное управление тепловым режимом доменных печей обеспечивается микропроцессорным логическим программируемым контроллером с применением алгоритма Готлиба А.Д.

Ефективне керування тепловим режимом доменних печей забезпечується мікропроцесорним логічним програмуваним контролером із застосуванням алгоритма Готліба А.Д.

Efficient control of thermal regime of the blast furnaces is provided by microprocessing logical programmed controller with the appliance of A.D. Gotlib's algorithm.

I. Постановка задачи управления. Управление тепловым состоянием доменной печи является одной из основных задач ведения процесса: тепловое состояние печи непосредственно определяет главный показатель экономичности процесса — расход кокса, косвенно производительность печи и состав выплавляемого чугуна. В настоящее время тепловым режимом печи управляют по химическому анализу и внешнему виду чугуна и шлака, т. е. конечных продуктов плавки, периодически выпускаемых из печи, и по яркости свечения материалов на фурмах, а также по данным контрольно-измерительных приборов. Однако это позволяет только судить о уже изменившемся тепловом состоянии печи и, следовательно, принимать меры для ликвидации нарушения теплового режима с большим запозданием.

При интенсивной доменной плавке надлежит прогнозировать и предупреждать нарушения теплового режима, изменяя нагрузку на кокс или параметры дутья таким образом, чтобы нарушения не произошло. Для этого необходимо предварительно получать сигналы об угрозе нарушения теплового равновесия, уметь их расшифровывать и принимать меры для устранения этой

угрозы или хотя бы ликвидировать наступающее нарушение в самом начале, пока оно не успело развиваться. Такое регулирование следует осуществлять постепенно (загрузкой небольших порций руды или кокса, небольшими изменениями параметров дутья), не создавая вредных тепловых колебаний, вызывающих нарушение нормального хода печи.

Таким образом, текущее регулирование теплового состояния доменной печи требует контроля непрерывно изменяющейся восстановительной и тепловой работы газа, который, находясь в печи несколько секунд, отображает некоторое среднее состояние процессов восстановления и теплообмена как в верхней, так и в нижней части печи. Расшифровки по составу газа тенденций изменения восстановительной и тепловой работы позволяют подавать соответствующие команды на изменение регулирующих параметров.

Тепловая работа доменной печи определяется коэффициентом полезного использования тепла (K_t) и коэффициентом использования углерода (K_c), которые исчисляются из теплового баланса доменного процесса (рис. 1).

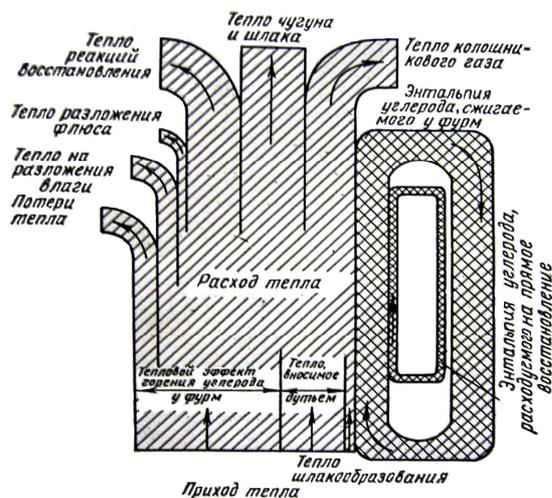


Рис. 1. Графическое изображение теплового баланса доменной плавки

Разработанные и применяемые в настоящее время алгоритмы управления тепловым состоянием доменной печи основаны на статистическом анализе и на математическом описании отдельных сторон теплового баланса, сводящемся к составлению системы уравнений с простыми алгебраическими зависимостями.

Анализ алгоритмов с целью выбора пригодного для управления тепловым состоянием доменной печи с помощью логического программируемого контроллера

Алгоритм, разработанный в Московском институте стали и сплавов [1]. Для учета и оценки тепловой работы доменной печи по анализу колошникового газа определяются индекс экономии углерода (p), степень использования восстановительной способности газа (q) и приход тепла на единицу отнимаемого от шихты кислорода или единицу массы чугуна (M).

Индекс экономии углерода представляет собой отношение кислорода шихты, переходящего в газ, к газифицированному углероду и может быть подсчитан по данным материального баланса плавки. Индекс экономии углерода может быть также определен по составу колошникового газа и дутья по формуле

$$p = \frac{CO_2 + 0,5CO - \beta N_2}{CO_2 + CO},$$

где CO_2 , CO , N_2 — содержание составляющих колошникового газа, % (объемн.); β — отношение кислорода к азоту в дутье.

Показатель p обратно пропорционален удельному расходу кокса в тот отрезок времени, к которому относится состав газа.

Степень использования восстановительной способности газов представляющей отношение кислорода шихты, отнятого косвенным путем, к газифицированному углероду кокса, находится из уравнения

$$q = \frac{0,5CO_2}{CO_2 + CO}.$$

Приход тепла на единицу отнимаемого от шихты кислорода или на единицу массы чугуна также может быть рассчитан по составу колошникового газа с

использованием термодимических данных составлением скоростного теплового баланса:

$$M = \left(\frac{4254 CO_2 + 1254 CO + \alpha N_2 i_d}{CO_2 + 0,5CO - \beta N_2} \right) 4,19 \text{ кДж}$$

На базе алгоритма реализована система стабилизации химического состава чугуна (теплового состояния печи). Структура модели, заложенной в систему, представлена системой уравнений:

1) регулирующее воздействие контура стабилизации теплового состояния K_M

$$K_M = f \left\{ M \left(\frac{Ш}{F} \right) \right\},$$

где $f \left\{ M \left(\frac{Ш}{F} \right) \right\}$ — закон регулирования;

2) регулирующее воздействие контура стабилизации содержания кремния в чугуне

$$K_{Si} = f(\xi_{Si}) = f \left\{ [Si] W^{\Phi}(p) - [Si]_0 \right\},$$

где $f(\xi_{Si})$ — закон регулирования; $[Si]$ — содержание кремния в чугуне на выпуске; $W^{\Phi}(p)$ — передаточная функция фильтра низкой частоты для отфильтровывания случайных отклонений $[Si]$; $[Si]_0$ — заданное содержание кремния; ξ_{Si} — рассогласование между текущим и заданным значениями $[Si]$.

Если на печи ранее поддерживали расход кокса K (кг/подачу), то после реализации регулирующего воздействия этот расход изменяется на $\Delta K = K_M + K_{Si}$.

В алгоритм заложена величина зоны нечувствительности $\mu_m = 420 \text{ кДж/м}^3 \text{ O}_2$ шихты, $\mu_{\xi} = 0,1\% [Si]$ и ограничение регулирующего воздействия $\Delta K_{\max} = K_{M \max} + K_{Si \max} = 400 \text{ кг кокса/подачу}$ для стабилизации процесса регулирования.

Регулирование теплового состояния доменной печи сводится к расчету величины M и приближению ее значения к величине M_n — расходу тепла на единицу отнимаемого от шихты кислорода или единицу чугуна, при котором обеспечивается получение заданного его состава с оптимальным расходом кокса. Величина M_n должна быть установлена в результате анализа работы печи за прошедшее время.

Наличие функциональной связи между величинами M , p , q и i_d позволяет, воздействуя на величины p , q и i_d , менять значение M .

Алгоритм, разработанный в Донецком политехническом институте [2]. Тепловое регулирование доменной плавки сводят к оценке теплового состояния печи по ряду показателей процесса: производительности печи, составу чугуна, составу и температуре колошникового газа, количеству и температуре дутья, количеству металлодобавок в шихте, количеству шлака на единицу выплавляемого чугуна, размеру коксовой колоши, выносу пыли и др. На основании этих показателей рассчитывают выплавку чугуна на 1000 м^3 дутья, поступающего в доменную печь, выплавку чугуна за 1 мин , расход углерода на 1 т чугуна, рудную нагрузку в подачу и баланс железа.

Определенная расчетом рудная нагрузка позволяет установить тепловой режим печи, соответствующий выплавке чугуна заданного состава. Расчет остальных параметров необходим для определения рудной нагрузки, а также дает возможность контролировать производительность печи, правильность выбора дутьевого режима и шихтовки.

Все расчетные величины определяют из материального и теплового баланса плавки.

Алгоритм, разработанный в Ленинградском политехническом институте [3]. Тепловой режим доменной плавки непрерывно контролируется подсчетом теоретической температуры горения у фурм и тепловой мощности горна, определением степени развития прямого восстановления, сопоставлением прихода и расхода тепла, а также регулируется корректировкой состава шихты при изменении состава шихтовых материалов.

Теоретическая температура горения (t) может изменяться в широких пределах в зависимости от расхода, температуры и влажности дутья, степени обогащения его кислородом и расхода восстановительных газов. Теоретическую температуру горения рассчитывают по формуле

$$t = \frac{1}{0,360} \cdot \frac{q_{\text{Д}}}{A} \text{ } ^\circ\text{C},$$

где 0,360-4,19(0,360) – теплоемкость двухатомных газов при температуре около 2000°C, кДж/(м³·град) [ккал/(м³·град)]; A – отношение объема газов, образующихся у фурм, к объему сухого дутья.

Алгоритм, разработанный в Центральном научно-исследовательском институте черной металлургии [4]. Контроль теплового режима доменной печи при помощи алгоритма осуществляется по зональным параметрам, характеризующим степень развития косвенного и прямого восстановления железа в соответствующих зонах.

Алгоритмы регулирования теплового состояния, разработанные за рубежом [5]. В последние годы за рубежом также проводят исследования с целью осуществления автоматического управления доменным процессом. Использование вычислительной техники требует создания математической модели доменной печи и в том числе алгоритма регулирования теплового режима плавки. Положительные результаты по созданию алгоритмов регулирования и использования вычислительных машин с целью контроля и регулирования достигнуты в США, Франции, Японии и других странах.

На кафедре металлургии чугуна Днепропетровского металлургического института под руководством профессора Гоглиба А.Д. разработан алгоритм управления тепловым режимом доменной плавки, основанный на теоретических представлениях о связях между параметрами процесса. На основании этого алгоритма разработаны технологические алгоритмы управления доменной печью, которые охватывают следующие задачи: сбор и первичная обработка информации, проверка и корректировка показаний газоанализаторов колошникового газа, расчет скорости схода шихты, регулирование теплового состояния, анализ функционирования системы [6].

Алгоритм сбора и первичной обработки информации. Многие параметры доменной печи непрерывно изменяются во времени и вводятся в УВМ автоматически в виде аналоговых сигналов с циклом опроса, равным 2 мин. К таким параметрам относятся: уровень засыпи (зондовые лебедки H_3 или радиоактивный уровнемер УРМС H_p); температура газа на периферии печи t_n ; температура в газоотводах t_r ; перепад давления между серединой шахты и колошником $\Delta P_{\text{верх}}$; перепад давления между серединой шахты и воздухопроводом горячего дутья $\Delta P_{\text{низ}}$; перепад давления между воздухо-

проводом горячего дутья и колошником $\Delta P_{\text{об}}$; состав колошникового газа (CO , CO_2 , H_2); расход колошникового газа после газоочистки $V_{\text{к.г.}}$; расход пара на увлажнение дутья $Q_{\text{п}}$; расход природного газа в печь G ; давление холодного дутья $p_{\text{х.д.}}$; расход холодного дутья $Q_{\text{д}}$; температура горячего дутья t ; влажность горячего дутья φ ; содержание кислорода в горячем дутье O_2 ; давление горячего дутья $p_{\text{г.д.}}$; расход дутья через фурмы $\Delta Q_{\text{д}}$.

Алгоритм проверки и корректировки показаний газоанализаторов. Для газового анализа применяются два комплекта газоанализаторов ОА-0304, которые снабжены системой автоматической проверки их показаний контрольной газовой смесью.

Алгоритм регулирования теплового состояния печи. Управляющими воздействиями при регулировании теплового состояния доменного процесса являются количество кокса в подаче K , влажность дутья φ и количество известняка в подаче $И$.

Рекомендация на изменение расхода кокса содержит три составляющие.

Первая составляющая ΔK_1 учитывает изменения в составе и количестве шихтовых материалов и параметров дутья:

$$\Delta K_1^{(0)} = K_1^{(0)} - K_1^{(1)},$$

$$K_1 = \frac{509 AFe - (78G + 3,8Q_{\text{д}})A / n_1 v_{\text{III}} + 19800 И}{C_{\text{к}} - W_{\text{к}}},$$

где $W_{\text{к}}$ – влажность кокса, %; $C_{\text{к}}$ – содержание углерода в коксе, %; $K_1^{(0)}$ относится к текущему интервалу усреднения; $K_1^{(1)}$ – к предыдущему интервалу.

Вторая часть рекомендации ΔK_2 компенсирует неконтролируемые возмущения, отражающиеся на восстановительной работе газа в верхней зоне печи. Величина этой составляющей пропорциональна сумме изменений работы восстановителей CO и H_2 :

$$\Delta K_2 = a_2 (\Delta \text{H}_2 + \Delta \text{CO}),$$

где a_2 – константа.

Третья составляющая ΔK_3 учитывает степень выполнения мастером печи предыдущих рекомендаций:

$$\Delta K_3 = \sum_{i=1}^3 (\Delta K_1^{(i)} + \Delta K_2^{(i)} - \Delta K_{\text{д}}^{(i)}) A q^{(i)},$$

где

$$\Delta q^{(i)} = \begin{cases} 1 - F_3 \text{ при } 1 - F_3 > 0, \\ 0 \text{ при } 1 - F_3 \leq 0, \end{cases}$$

$$F_3^{(i)} = \frac{a_1}{V_0} \sum_{i=0}^i v_{\text{III}}^{(i)};$$

V_0 – объем печи, в котором заканчивается восстановление оксидов железа до чистого железа; объем измеряется числом подач; $\Delta K_{\text{д}}$ – действительное изменение количества кокса в подаче, равное

$$\Delta K_{\text{д}}^{(i)} = \sum_{j=1}^i \Delta K_{\text{д}}^{(j)}.$$

Суммарная рекомендация на изменение расхода кокса равна

$$\sum \Delta K = \Delta K_1^{(0)} + \Delta K_2^{(0)} + \Delta K_3^{(0)} - \Delta K_{\text{д}}^{(0)}.$$

Рекомендация на изменение влажности дутья состоит из трех составляющих $\Delta \varphi_1$, $\Delta \varphi_2$ и $\Delta \varphi_3$. Величина $\Delta \varphi_1$ учитывает тенденции в изменении восста-

новительных процессов, низа печи и рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi_1 = a_3 v_{III}^{(0)} - \frac{a_4 R (CO^{(0)} + CO_2^{(0)} - \Delta CO_2^{(1)}) - a_5 \Gamma^{(0)}}{100 W_K^{(3)} - A_K^{(3)}},$$

где

$$R = \begin{cases} V_{K.G.}^{(0)} & (\text{если измеряется}), \\ a_6 Q_D^{(0)} \frac{100 - O_2^{(0)}}{100 - CO^{(0)} - CO_2^{(0)} - H_2^{(0)}} & (\text{если } V_{K.G.} \text{ не} \\ & \text{измеряется}). \end{cases}$$

Вторая составляющая $\Delta\varphi_2$ учитывает нагрев печи и тенденцию его изменения. Анализ тенденции изменения содержания кремния в чугуне ведут путем сравнения ΔSi за 2–3 выпуска.

На основании изложенных теоретических предположений был разработан алгоритм регулирования (таблица 1).

Входными величинами алгоритма являются знаки изменений усредненных за установленные интервалы времени значений компонентов колошниково-го газа, а также температуры фурменной зоны. Увеличение или уменьшение каждой величины в алгоритме обозначено

знаками плюс или минус. Если значение параметра не меняется, то его состояние обозначают через «0». Обозначение « $\tilde{+}$ » указывает, что параметр может принять значение « \leftarrow » или «0», т. е. не увеличивается, а « $\tilde{-}$ » указывает, что параметр может принять значение « \rightarrow » или «0», т. е. не уменьшается.

Выходными величинами алгоритма являются изменения количества кокса в подаче (ΔK) и температуры дутья (Δt_D), причем рекомендации предусмотрены для случаев, когда в воздухонагревателях имеется резерв тепла и когда он отсутствует.

Рекомендации на изменения количества кокса в подаче выдаются и выполняются немедленно. Рекомендации по температуре дутья выдаются через 2 часа после изменения состава газа, если изменение температуры на фурмах подтверждает соответствие теплового состояния горна выданной рекомендации.

Принятые в алгоритме коэффициенты для определения количественных рекомендаций (5–3% расхода кокса, 80 град температуры дутья на 1% изменения содержания CO_2 и CO в газе) получены расчетом, исходя из условий работы печи с расходом кокса 600 кг/т чугуна и температурой дутья 1000°C.

Таблица 1. Алгоритм регулирования теплового состояния доменной печи

Строки	Входные параметры				Выходные параметры							
	ΔCO_2	ΔCO	$\Delta CO - \Delta CO_2$	$\Delta\varphi$	резерв увеличения температуры дутья есть				резерва увеличения температуры дутья нет			
					качественная рекомендация		количественная рекомендация		качественная рекомендация		количественная рекомендация	
					t_D	K	Δt_D	ΔK	t_D	K	Δt_D	ΔK
1	+	-	0		0	-	0	5 ΔCO_2	0	-	0	5 ΔCO_2
2	+	-	-		0	-	0	5 ΔCO_2	0	-	0	5 ΔCO_2
3	-	+	0		0	+	0	5 ΔCO_2	0	+	0	5 ΔCO_2
4	-	+	-		0	+	0	5 ΔCO_2	0	+	0	5 ΔCO_2
5	+	-	+	+	-	-	80 ($\Delta CO - \Delta CO_2$)	5 ΔCO_2	-	-	80 ($\Delta CO - \Delta CO_2$)	5 ΔCO_2
6	+	-	+	$\tilde{+}$	Запрет	-	0	5 ΔCO_2	Запрет	-	0	5 ΔCO_2
7	-	+	+	-	+	+	80 ($\Delta CO - \Delta CO_2$)	5 ΔCO_2	0	+	0	5 ΔCO_2
8	-	+	+	$\tilde{-}$	Запрет	+	0	5 ΔCO_2	0	+	0	5 ΔCO_2
9	+	0		-	+	-	80 ΔCO_2	5 ΔCO_2	0	-	0	3 ΔCO_2
10	+	0		$\tilde{-}$	Запрет	-	0	5 ΔCO_2	0	-	0	3 ΔCO_2
11	-	0		+	-	+	80 ΔCO_2	5 ΔCO_2	-	+	80 ΔCO_2	5 ΔCO_2
12	-	0		$\tilde{+}$	Запрет	+	0	5 ΔCO_2	Запрет	+	0	5 ΔCO_2
13	-	-		+	-	+	80 ΔCO	5 ΔCO_2	-	+	80 ΔCO	5 ΔCO_2
14	-	-		$\tilde{+}$	Запрет	+	0	5 ΔCO_2	Запрет	+	0	5 ΔCO_2
15	+	+		-	+	-	80 ΔCO	5 ΔCO_2	0	-	0	3 ΔCO_2
16	+	+		$\tilde{-}$	Запрет	-	0	5 ΔCO_2	0	-	0	3 ΔCO_2
17	0	+		-	+	0	80 ΔCO	0	0	+	0	3 ΔCO
18	0	+		$\tilde{-}$			Запрет	5 ΔCO_2	0	+	0	3 ΔCO
19	0	-		+	-	0	80 ΔCO	0	-	0	80 ΔCO	0
20	0	-		$\tilde{+}$			Запрет					

Закономерности выдачи той или иной рекомендации при различных комбинациях входных параметров

обосновываются и поясняются примерами строк алгоритма.

Строка 1. Увеличилось не прямое восстановление. Требуется уменьшить количество кокса в подаче.

Строка 7. Уменьшилось не прямое восстановление и одновременно увеличилось прямое. Знак изменения температуры фурменной зоны подтверждает увеличение прямого восстановления. Требуется увеличить количество кокса в подаче и повысить температуру дутья. Если резерва увеличения температуры дутья нет, то можно ограничиться только увеличением количества кокса в подаче.

Строка 19. Уменьшилось только прямое восстановление. Знак температуры фурменной зоны подтверждает это. Необходимо снизить температуру дутья.

Строка 20. Уменьшилось только прямое восстановление. Знак температуры фурменной зоны, несмотря на это, указывает на похолодание нижней части печи. Рекомендуется запрет на выдачу рекомендаций.

Алгоритм регулирования построен без учета восстановительной работы водорода. Поэтому при увлажнении дутья или при вдувании в печь углеводородсодержащих добавок изменение их количества сопровождается выдачей запрета на рекомендации, выдаваемые системой регулирования в течение определенного промежутка времени. Запрет на выдачу рекомендации дается также при изменении выноса колошниковой пыли и количества флюса в шихте.

Все рассмотренные алгоритмы регулирования теплового режима доменной плавки построены на материально-тепловых балансах. Недостатком такого метода является то, что он описывает установившийся процесс. Однако доменная печь представляет собой агрегат, в котором от момента загрузки материалов до получения продуктов плавки из этих материалов проходит 6–8 часов. При этом условия загрузки в значительной мере изменяются, изменяется химический и гранулометрический состав материалов, соотношение «руда – кокс» точно не выдерживается, распределение агломерата и руды по сечению печи колеблется и т. д. Все это приводит к тому, что в практике установившегося процесса не достигают.

Более того, требование регулирования теплового режима по существу и сводится к тому, чтобы поддерживать процесс в определенном состоянии, ликвидировать отклонения, т. е. сохранить по возможности установившееся состояние.

Модернизированная доменная печь №1М ДМКД оснащена новейшими техническими средствами автоматического контроля, регулирования и управления. Основным управляющим устройством служит логический микропроцессорный программируемый контроллер фирмы «ALLEN BRADLEY» [7].

В результате анализа рассмотренных алгоритмов определили, что наиболее приемлемым для управляющего устройства является алгоритм профессора Готлиба А.Д., который в логико-математическом исполнении вводится в автоматизированную систему контроля и регулирования теплового состояния доменной печи (рис.2). Система состоит из блока контроля быстроменяющихся параметров; блока вычисления значений параметров p_T, q_T, M_T ; блока сравнения и советчика мастера; блока вычисления количественных рекомендаций; блока регистрации текущих значений p_T, q_T, M_T .

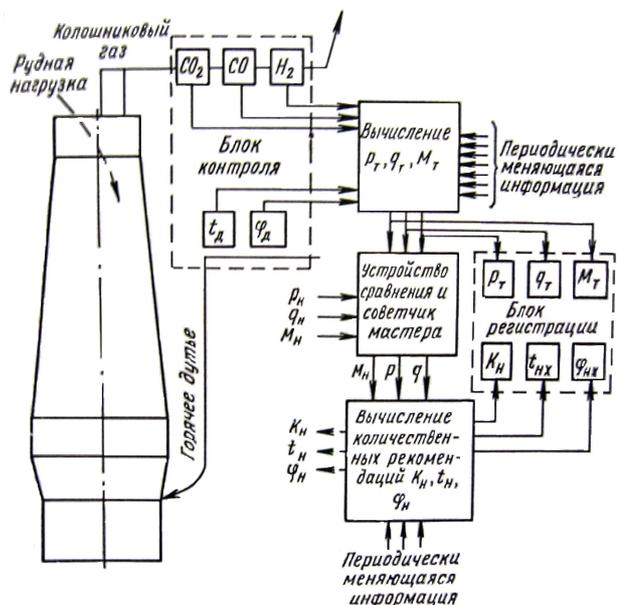


Рис. 2. Блок-схема системы контроля и регулирования теплового состояния доменной печи

В блок вычисления текущих значений p_T, q_T, M_T автоматически непрерывно вводится информация по газовому анализу и параметрам дутья, а также вручную периодически меняющаяся информация, которая не может быть получена от автоматических датчиков. В блок сравнения вводятся нормальные значения параметров p_N, q_N, M_N , предварительно вычисленные оператором.

Вычисленные значения текущих параметров регистрируются блоком регистрации и вводятся в логическое устройство и блок вычисления количественных рекомендаций. Логическое устройство анализирует тепловое состояние печи и вырабатывает качественные рекомендации.

Выводы и рекомендации

Для практической реализации предлагаемой подсистемы автоматизированного управления тепловым состоянием доменной печи №1М ДМКД на основе имеющегося микропроцессорного логического программируемого контроллера семейства SIMATIC S5 фирмы «ALLEN BRADLEY» необходимо доменную печь оснастить автоматическими газоанализаторами фирмы «Хоневелл» для определения CO, CO_2 и H_2 в колошниковом доменном газе.

Наиболее приемлемым для технических возможностей логического программируемого контроллера SIMATIC S5 может быть рекомендован алгоритм Готлиба А.Д. в логико-математическом исполнении.

После практической реализации ПАУТСДП необходима будет проверка алгоритма сравнением выдаваемых рекомендаций с фактическим тепловым состоянием печи без их выполнения, а также определение степени достоверности контроля теплового состояния и вырабатываемых рекомендаций.