

**В.И.Большаков, Н.А.Гладков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов,
Е.И.Шумельчик, Е.А.Белашапка**

АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

В работе представлен анализ исследований по разработке комплексных показателей теплового режима доменной печи. Проанализированы различные подходы к регулированию теплового состояния горна доменной печи. Показано, что наибольшей информативностью обладают показатели теплового состояния низа печи, наиболее достоверно определяющие содержание кремния в чугуна. Показано, что результаты прогнозирования по критерию теплового состояния в значительной мере определяются достоверностью информации и методикой обработки экспериментальных данных.

доменная печь, горн, тепловой режим, информация, анализ

Постановка задачи. Регулирование теплового состояния доменной печи является одной из основных задач ведения процесса, т.к. тепловое состояние печи непосредственно определяет главный показатель экономичности процесса – расход кокса, косвенно производительность печи и состав выплаваемого чугуна [1–5]. Тепловой режим доменной плавки представляет собой совокупность распределенных параметров состояния процесса, характеризующих тепловые явления в печи, и входных воздействий, определяющих эти явления. Целью регулирования теплового состояния является сохранение устойчивого теплового режима печи путем поддержания параметров на уровне, обеспечивающем получение чугуна с минимальными отклонениями от заданного состава при использовании всех резервов процесса [6].

Модели, основанные на материальных и тепловых балансах, легли в основу первых попыток оперативного контроля и регулирования теплового режима печи [7]. Первые работы по оценке, контролю и регулированию доменного процесса производились в начале 1954 г. на печах «Азовстали» с использованием алгоритма, предложенного В.А.Сорокиным. В период 1959–1960 г. производились опыты по управлению процессом плавки по алгоритмам А.Д.Готлиба, А.Н.Похвиснева, А.Н.Рамма. Во всех случаях наблюдались некоторые положительные эффекты в предсказании поведения технологического процесса. Со временем выяснилось, что между показателями, вычисляемыми по балансовым соотношениям, и критериями теплового режима существуют не строго функциональные, а вероятностные связи.

Для оперативного контроля теплового режима используется состав колошниковога газа. Известны различные способы использования состава

колошникового газа для оценки теплового состояния печи с помощью установленных статистических связей [8–13].

А.Н.Похвиснев одним из первых стал оценивать тепловое состояние доменной печи с помощью автоматически рассчитываемых обобщенных параметров [1]. Предложенный им показатель M определялся балансовым методом с использованием данных о составе дутья и колошникового газа. Идея математического описания доменного процесса с помощью рассчитываемых обобщенных параметров была подхвачена многими исследователями и практически реализована. Аналогичные работы проведены ДМетИ, УГПИ и другими на заводах «Криворожсталь» и им. Ильича с использованием алгоритмов, составленных на основе материальных и тепловых балансов, где в качестве главной информации использован состав колошникового газа. При этом коэффициент корреляции расхода кокса и содержания кремния в чугуна по наиболее информационным алгоритмам А.Н.Рамма и Н.Н.Темнохуда не превышал 0,5–0,6 ед., поскольку в их методиках не учтены переходные процессы.

Е.И.Райх в своих работах [14] отмечает, что колебания состава колошникового газа и основанных на нем многих комплексных показателей не всегда правильно отражают изменения теплового режима. При этом Е.И.Райх не отрицает важности и необходимости анализа колошникового газа и в качестве обоснования ссылается на мнение А.Д.Готлиба [2], который отметил, что увеличение содержания CO в газе может быть следствием как интенсификации процесса восстановления железа, так и интенсификации восстановления кремния (в первом случае необходимо увеличивать приток тепла в горн, а во втором – уменьшать). Кроме того, недостатком колошникового газа как показателя теплового режима является то, что одинаковое количество одного и того же газа, образующееся в различных реакциях, соответствуют различным тепловым эффектам (например, одинаковые количества CO , образующиеся в реакциях прямого восстановления железа и кремния).

Изложение основных материалов исследования. Институтом черной металлургии по заданию МЧМ СССР под руководством З.И.Некрасова произведена оценка разработанных и испытанных приемов управления доменным процессом, показавшая, что для создания метода управления доменным процессом необходимо развитие работ по математическому описанию динамики процесса с помощью разработки математических моделей [15]. Отдельные разработки рекомендованы к развитию и совершенствованию. В настоящее время известно около 70 комплексных показателей теплового состояния доменной печи, которые определяются в результате обработки технологической информации о ходе плавки по определенным алгоритмам [16–18]. Рассмотрим содержание некоторых из них.

1. Алгоритм управления тепловым режимом доменной плавки, разработанный В.А.Сорокиным. Основой алгоритма является тепловой баланс

на 1000 нм³ дутья, минутная производительность печи (четыре варианта), степень прямого восстановления, текущие показатели плавки [19]. Регулируемыми параметрами теплового состояния печи приняты расход кокса в подачу, рудная нагрузка (в подаче), расход природного газа.

Общее уравнение установившегося теплового состояния процесса имеет вид:

$$P_t = \frac{10000}{N_2} [\alpha(343CO_2 + 102CO) - 3t_k - 206(H_2 - \gamma)] + \alpha(322t_0 - \Delta) \quad (1)$$

$$\beta + 70150Si + \varphiШ - 1400C_{к.р}$$

Соответствующие параметры представлены уравнениями:

- Расход углерода на тонну чугуна

$$P_{c.ч.} = \frac{424}{N_2} (CO_2 + CO) - x \quad (2)$$

$$P_{ик}$$

где x – количество углерода карбонатов, кг;

m – количество углерода чугуна и колошниковой пыли, кг.

- – минутная производительность

$$P_{мин} = \frac{P_{ик} \cdot V_0 \eta_0}{100000}, \quad m / мин \quad (3)$$

Здесь: V_0 – объем дутья, подаваемого к печи, нм³/мин;

η_0 – коэффициент поступления дутья в печь, %;

- – расход дутья

$$V_0 = \frac{0,361_{д.ф.} P_{х.д.}}{T_{х.д.}} \quad нм^3 / мин, \quad (4)$$

где $V_{д.ф.}$ – фактический объем дутья, подаваемого воздуходувкой;

$T_{х.д.}$ – абсолютная температура дутья, °К;

$P_{х.д.}$ – давление холодного дутья, мм рт. ст.

- Рудная нагрузка

$$P_p = \frac{10Fe_r K_H C_k}{Fe_p P_{c.ч.}} \quad (5)$$

Здесь: $Fe_ч$ – железо в чугуне, %;

C_k – углерод кокса, %;

Fe_p – среднее содержание в рудной части, %;

$P_{c.ч.}$ – расход углерода на тонну чугуна, кг;

K_H – вес коксовой подачи.

Задача регулирования состоит в поддержании равенства заданного параметра, необходимого для получения требуемого состава чугуна (конкретно Si), фактическому параметру, достигнутому в результате управления расходом кокса, рудной нагрузкой, составом комбинированного дутья и, в частности, величиной r_d . Контроль состояния технологического процесса на доменной печи №2 «Азовсталь» (1955 г.) при регулировании хода плавки по алгоритму В.А.Сорокина показал, что при определенных

благоприятных по шихтовым и технологическим условиям плавки достигаются положительные результаты.

2. Алгоритм автоматического контроля и управления тепловым состоянием доменной печи, разработанный МИСИС. Алгоритм основан на разработанных А.Н.Похвисневым [9–12] показателях мгновенного прихода тепла на единицу отнимаемого от шихты кислорода – показатель M , определяемый по составу колошникового газа. Показатель M рассчитывается по составу газа – M^{Γ} и по составу шихты M^{III} , по которым определяется величина и знак регулирующих воздействий. Установлено, что за время между выпусками при стабильных параметрах комбинированного дутья величина M^{Γ} , отражая нагрев печи, коррелируется с изменением содержания кремния в чугуна. При этом величина M^{III} , коррелируется с содержанием кремния в чугуна при временном сдвиге M^{Γ} и M^{III} за 3–5 часов до выпуска, свидетельствуя о намечающемся изменении нагрева печи. При этом, показатель M^{Γ} отражает воздействие на тепловое состояние печи «сверху» (изменением рудной нагрузки, состоянием шихты), а M^{III} – «снизу» (теплосодержанием дутья: ϕ , ω , t). Управление ходом плавки осуществляется соответствующим изменением ΔM^{Γ} и ΔM^{III} . Показатель M^{III} на 1–3 часа предвещает содержание кремния в чугуна, способствуя своевременной корректировке расхода кокса.

Формулы для расчета показателей:

$$M^{\Gamma} = \frac{4275CO_2 + 1254CO + 2580H_2O_{\text{восст}} + \alpha N_2 W_d}{CO_2 + 0,5(CO + H_2O_{\text{восст}}) - \beta N_2}, \text{ ккал/м}^3 O_{2\text{ш}} \quad (6)$$

где: $H_2O_{\text{восст}}$, CO_2 , CO , N_2 – содержание в колошниковом газе;
 α – отношение объема комбинированного дутья к объему содержащегося в нем азота, доли;

β – объемное отношение кислорода к азоту в дутье, ед.;

W_o – теплосодержание дутья, ккал/м³.

$$M^{\text{III}} = \frac{6042(O_{2\text{ш}} + \bar{O}_{2o}) - 1767(C_{\text{ш}} + \bar{C}_{\text{ооб}}) - 441H_2O_{\text{восст}} + W_o - \bar{O}_{\text{ооб}}}{O_{2\text{ш}}}, \text{ ккал/м}^3 O_{2\text{ш}} \quad (7)$$

3. Система теплового управления, разработанная Институтом автоматизации черной металлургии МЧМ СССР. Институтом автоматизации черной металлургии МЧМ СССР использована для построения системы теплового управления преобразованная формула А.Н.Похвиснева, совмещающая приход тепла и газификацию кислорода шихты в одной (единой) порции материалов (подачи) с учетом участия водорода в восстановлении, суммарного прихода тепла в нижней части печи:

$$M_I = \frac{(3021CO_2^{\%} + 2580\Delta H_2^{\%}) \left(\frac{V_o}{\alpha N_2} \right)^2 + [1254(CO + CO_2) - \alpha N_2 W_o] \frac{V_o}{\alpha N_2} - 980 \frac{H}{t_{\text{ш}}}}{0,5(CO_2^{\%} + \Delta H_2^{\%}) \left(\frac{V_o}{\alpha N_2} \right)^2 + [0,5(CO + CO_2) - \beta N_2] \frac{V_o}{\alpha N_2}} \quad (8)$$

где: CO , CO_2 , N_2 – содержание в колошниковом газе, %;

ΔH_2 – количество водорода перешедшего в H_2O в зоне непрямого восстановления, $nm^3/100 m^3$ сух.колошн.газа (скг);

I – количество известняка в подаче, кг;

W_ϕ – теплосодержание $1 nm^3$ комбинированного дутья, ккал;

t_n – время схода шихты одной подачи, согласно формуле (3.9);

V_ϕ – количество дутья, $nm^3/мин$;

$V_\phi/\alpha N_2$ – количество колошникового газа, $nm^3/мин$;

CO_2^τ , ΔH_2^τ , $(V_\phi/\alpha N_2)^\tau$ – содержание на время τ , соответствующее времени схода материалов из зоны непрямого восстановления в горн.

Числитель – суммарный приход тепла в минуту в объеме материалов нижней части печи. Знаменатель – газифицированный кислород материала нижней части печи в минуту. Переменные α , β , W_ϕ , ΔH_2 определяются согласно [12] следующими выражениями:

$$\alpha = \frac{10^6}{(100-\omega)(100-0,124\lambda)(100-\sigma)} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\omega(100-0,124\lambda)(100-\sigma)+622\lambda}{(100-\omega)(100-0,124\lambda)(100-\sigma)} \quad (10)$$

$$\Delta H_2 \left[\frac{(0,124\lambda+\sigma)N_2 \cdot 10^4}{(100-\omega)(100-0,124\lambda)(100-\sigma)} \times \frac{\gamma \cdot \sigma \cdot N_2 \cdot 10^4}{\Psi} \right] - H_2 + 2CH_2 \quad (11)$$

$$W_\phi = Ca^{10}(t_\phi - 9,5\lambda) \cdot \left(1 - \frac{\delta}{100}\right) - Q \frac{\delta}{100} \quad (12)$$

В выражениях:

λ – влажность дутья, г/нм³;

ω – содержание кислорода, %;

δ – количество ПГ в дутье, %;

μ – количество водорода в ПГ, $m^3/m^3 \approx 2,0584 (\bar{H})$;

γ – количество углерода в ПГ, $m^3/m^3 \approx 1,07 (\bar{C})$;

Q – тепловой эффект ПГ, ккал/нм³ ≈ 818 ;

Ψ – объемное отношение углерода к водороду в коксе.

Статистическим анализом показано, что при увеличении M_1 увеличивается содержание кремния и уменьшается сернистость чугуна. При этом положительная величина ΔM_0 свидетельствовала за 5–7 часов об увеличении кремния и уменьшении сернистости, а отрицательная, наоборот – о уменьшении [Si] и увеличении [S]. Наибольшая величина коэффициента корреляции кремния с M_1 при τ равном трем часам. Установленные взаимосвязи между показателями M_1 и ΔM_0 и составом чугуна явились основой контроля и регулирования теплового состояния печи, управлявшегося изменением рудной нагрузки и теплосодержания горячего дутья. При изменении рудной нагрузки стабильность теплового состояния и, соответственно, колеблемость кремния определяется равенством:

$$\Delta M_o = \frac{\Delta K \cdot C_k \cdot 1,667 \cdot 1254}{O_{III} \cdot 0,7}, \text{ откуда } \Delta K = \frac{\Delta M_o \cdot O_{III}}{3340 C_k}, \quad (13)$$

где ΔK – изменение кокса в подаче;

C_k – углерод кокса, доли;

O_{III} – кислород шихты подачи, кг;

t_n – время схода шихты подачи, ч.

В более общем виде (с учетом суммарного эффекта горения углерода в печи) формула принимает следующий вид:

$$\Delta K = \frac{\Delta M_o \cdot O_{um}}{2,67 C_k (1254 + 30,21 \eta_{CO})}, \quad (14)$$

где η_{CO} – степень использования газа, ед.

При регулировании теплового состояния изменением расхода газа используются зависимости:

$$\Delta M_o = \frac{\Delta V_{III} \cdot \partial_{\partial, \text{ч.}}}{60} \cdot \frac{O_{um}}{22,4} \cdot \frac{32}{32}, \quad (15)$$

$$\Delta V_{III} = -42 \frac{\Delta M_o \cdot O_{um}}{\partial_{\partial, \text{ч.}} t_n} \quad (16)$$

Регулирование теплового состояния температурой и влажностью дутья осуществляют с использованием выражений:

$$\Delta t = -0,7 \cdot \Delta M_o \frac{O_{um}}{V_d \cdot C \cdot t_n}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$\text{и } \Delta \lambda = 0,0737 \cdot \Delta M_o \frac{O_{um}}{V_d \cdot C \cdot t_n}, \text{ } \text{г} / \text{м}^3 \quad (18)$$

Таким образом, величина ΔM_o является надежным показателем теплового состояния печи, которая в 95–98% случаев правильно предсказывает направление изменения технологического режима.

4. Алгоритм регулирования теплового состояния доменной плавки ДМетИ. Алгоритм основан на определении изменений восстановительной и тепловой работы печи, оцениваемых по анализу колошниковых газов [13,20]. Учет воздействующих факторов в алгоритме производится расчетом расхода кокса по формуле А.Д.Готлиба, построенной на основе теплового баланса нижней зоны доменной печи. Формулой определяется изменение расхода кокса в подаче с учетом изменения скорости схода шихты: $R_k \Pi = n_q V$, где R – рудная часть подачи (т/под), Π – число подач, n_q – коэффициент пропорциональности. Происходящее при этом изменение степени прямого восстановления определяется зависимостью

$$r_d = r_{d_0} - \frac{0,201 \Gamma \cdot 0,00746 Q_d \cdot \varphi_d}{n_q \cdot Fe \cdot V_{u}}, \quad (19)$$

в которой $R d_o$ – степень прямого восстановления на обычном дутье;
 Q_o и φ_o – количество и влажность дутья;
 $V_{ш}$ – скорость схода шихты (мм/мин);
 Γ – расход природного газа (м³/час).

Вариант расчетной формулы расхода кокса для условий ДП №5 завода им. Ильича:

$$K_I = \frac{509P \cdot Fe - \frac{(78 + 3,8Q_o \cdot \varphi_o) \cdot P}{n_u V_{ш}} + 19800И}{88 - W_k}, \quad (20)$$

где W_k – влажность кокса (%);

$P, И$ – количество руды (агломерата) и известняка в подаче (т).

Расход кокса изменяется вследствие изменения процессов восстановления, отражающихся в изменении состава колошникового газа, в частности, доли в нем CO_2 , вызванной влиянием разных факторов. Суммарное расчетное количество $\Delta CO_{2\text{расч}}$ определяется:

$$\Delta CO_{2\text{расч}} = \Delta CO_{2\text{факт}} + \Delta CO_2 - \Delta CO_2^2 - \Delta CO_2^3 - \Delta CO_2^4 \quad (21)$$

В этом уравнении ΔCO_2^{1-4} соответствуют изменениям рудной нагрузки, известняка, комбинированного дутья скорости опускания шихты, выражаемых соответствующими уравнениями, при которых определяют изменение кокса $\Delta K_{\Pi} = \Pi_{\Pi} \Delta CO_{2\text{расч}}$. Суммарное приращение от воздействия исследованных факторов составляет $\Delta K = \Delta K_1 + \Delta K_2 + \Delta K_3 + \Delta K_4 + \Delta K_5$.

В разработанной системе управления тепловым состоянием предусмотрена обратная связь между расходом кокса и химическим составом чугуна и предусмотрены соответствующие зависимости:

$$\Delta K_3 = (S_{i_{\max}} - S_i) \cdot \Pi_7 \quad (22)$$

$$\text{и } \Delta K_4 = \left[\left(\frac{S_i}{S} \right)_{\text{задан}} - \left(\frac{S_i}{S} \right)_{\text{тек}} \right] \cdot \Pi_8 \quad (23)$$

При этом коэффициенты Π_5-8 выбираются так, чтобы полная компенсация коксом отклонений нагрева горна от заданного уровня произошла в течение 6–8 часов.

Рекомендации по влиянию влажности на состав чугуна выражаются уравнениями:

$$\Delta \varphi_1 = \Pi_1 \left[\frac{S_i}{S} - \left(\frac{S_i}{S} \right)_{\text{зад}} - \Pi_2 \cdot V_{\text{Шрасч}} \right] \quad (24)$$

$$\Delta \varphi_2 = \Pi_1 \left[\frac{S_i}{S} - \left(\frac{S_i}{S} \right)_{\text{зад}} - \Pi_3 \right] (\Delta CO + \Delta CO_2) \quad (25)$$

Промышленное опробование системы приводилось на ДП №7 Криво-рожского завода и доменной печи завода «Ильича». Достигнуто выравнивание состава чугуна и уменьшение расхода кокса.

5.Метод управление тепловым режимом по содержанию кремния в чугуне, разработанный ЛПИ. В 1964 г. Ленинградским политехническим институтом (А.Н.Рамм, Е.И.Райх и др.) с помощью разработанной мате-

матической модели рассчитывались параметры хода процесса восстановления и использования тепла для управления тепловым режимом по критерию – содержанию кремния в чугуна [3,21]. В основу метода положено прогнозирование изменения содержания [Si] в зависимости от изменения стационарных параметров при помощи регрессионного анализа.

Прогноз по уравнениям регрессии дополняется применением управляющих воздействий, влияние которых проявляется в существенном изменении состава чугуна через 6 часов (5,5–6,5) после прихода в горн шихты нового состава. Изменение состава колошникового газа происходит при этом медленно и заметно отражается в аргументах уравнений регрессии значительно позже (7 час).

Уравнения регрессии отражают лишь часть прогнозируемого изменения кремния. Недостающая часть возмещается эмпирическим значением $\overline{K_{rj}}$, представляющим разностью ординат текущих кривых разгона по динамическим каналам, выходами которых являются содержание кремния, а входами – величина j -того воздействия (рудная нагрузка) первого канала и состав колошникового газа второго канала. Отсюда прогнозируемый кремний [Si] определится как $\Delta[Si]_{np}^4 = \overline{K_{rj}} \cdot \Delta K$, где: ΔK – кокс, подаваемый «сверху», а $\overline{K_{rj}}$ – регрессионная часть приращения кремния в чугуна, определяемая временем τ от момента прихода в горн измененной коксовой подачи до начала прогнозируемого выпуска.

Установлено, что динамические характеристики каналов, входом которых являются изменения «сверху», а выходом – состав чугуна и колошникового газа, приблизительно одинаковы. Отсюда уравнение для прогноза и регулирования содержания кремния в чугуна имеет следующий вид:

$$[Si]_{np} = [Si]_{np}^p + \Delta[Si]_{np}^4 = \sum_{i=1}^m \rho_i x_i + a + \overline{K_{rj}} \cdot \Delta K, \quad (26)$$

где ρ_i – коэффициент регрессии, x_i – фактор уравнения регрессии, a – свободный член уравнения.

$[Si] = f(\omega, Q \text{ и } Od, CO_2, CO, H_2, t_z, J)$ при стабильных величинах ω, Uq, K, v_a .

6. Система автоматического регулирования теплового состояния доменной печи (Украинский институт металлов). Украинским институтом металлов (И.Д.Баллон, Б.Н.Алексеев) разработана система автоматического регулирования теплового состояния доменной печи по окружности, стабильность которого обуславливает выплавку чугуна заданного качества [22]. Система разработанных формул включает определение:

- фактического количества образующегося тепла

$$Q_\phi = k \cdot V_\phi \cdot C_T \cdot T_T, \text{ ккал / мин} \quad (27)$$

где V_ϕ – расход дутья в фурме, $\text{нм}^3/\text{мин}$;

k – коэффициент увеличения объема газа в фурменном очаге;

C_T – теплоемкость газов, кал/м³.град;

T_T – температура газа, °С;

- расход дутья в фурме

$$V_{\phi_1} = \frac{V_o \sqrt{h_{\phi_1}}}{\sqrt{h_{\phi_1} + \sqrt{h_{\phi_2}} + \dots \sqrt{h_{\phi_n}}}}, \text{ м}^3 / \text{мин} \quad (28)$$

где V_o – общий расход дутья, м³/мин;

- оптимальное количество тепла, образующееся в нижней части печи, ккал/мин

$$Q_o = V_d \left\{ \frac{a^2 \cdot 12[(1-f)O_2 + 0,5f]}{22,4} + C_d t_d - 6f \right\}, \quad (29)$$

где V_o – количество дутья, м³/мин;

T_o – температура дутья, °С;

f_o – влажность воздуха, г/м³;

O_2 – концентрация кислорода, %;

a – тепловой эффект реакции горения углерода, ккал/моль;

v – тепловой эффект разложения влаги, ккал/моль.

Разработанная система позволяет по результатам замеров расхода воздуха, температуры в фурменном очаге (определенной с помощью пирометра), данным об общем расходе, влажности и температуры дутья контролировать и регулировать тепловое состояние низа доменной печи по окружности, обуславливая выплавку чугуна с заданным количеством кремния и серы.

7. Алгоритм управления тепловым состоянием доменной печи Уральского политехнического института. Алгоритм построен на разработанной Б.И. Китаевым теории практической завершенности теплообмена в верхней и нижней частях доменной печи и относительной независимости их существования в условно разделенных (граничной температурой t_o) на две части печи зонах [5,23–25]. Соответственно, отличаются показатели, характеризующие каждую из зон. Верхняя зона, в пределах которой преимущественно протекают процессы непрямого восстановления, характеризуется индексом $i_v = \bar{t}_{ш} / t_o$, а нижняя зона, охватывающая область развития прямого восстановления, фурменных очагов и горна печи – индексом $i_n = \bar{t}_{газ} / t_o$.

Автономность тепловой работы верха и низа печи подтверждается практическими данными. Из выявленной автономности следует, что тепловое состояние доменной печи невозможно оценивать в целом. Исходя из этого УПИ выдвинута и осуществлена идея раздельного контроля и локального управления тепловым состоянием верха и низа доменной печи с использованием показателей i_v и i_n . Определение их осуществляется с помощью выражений:

$$i_6 = I - \left[\frac{t_k - t_{ш.к}}{t_k - m(t_{ш.к} + \Delta t_o)} \cdot \frac{1 - \exp(-A)}{A} - \frac{m \Delta t_o}{t_k - m(t_{ш.к} + \Delta t_o)} \right] \quad (30)$$

где: i_k и $i_{ш.к}$ – температура газа и шихты на колошнике печи, °С;

$m = 0,5(W_{ш.к}/W_k + 1)$ – среднее для верхней зоны отношение теплоемкостей потоков шихты и газа;

$W_{ш.к}$ и W_k – теплоемкости потоков шихты и газа на уровне колошника, Вт/град.;

$\Delta t_o = t_o - t_{ш.о}$ – разность температур между газом и шихтой на границе раздела зон, °С;

A – коэффициент:

$$A = \frac{\alpha SH}{W_{ш}} (1 - m), \quad (31)$$

где α – средний для верхней зоны суммарный объемный коэффициент теплообмена (с учетом теплового сопротивления кусков шихты, $\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot \text{град.}$)

S – средняя площадь сечения шихты печи, м^2 ;

H – средняя высота верхней зоны печи, м;

W – средняя для верхней зоны теплоемкость потока шихты, Вт/град.

Тепловое состояние нижней зоны печи характеризуется величиной $Q_{пл} = Q_{чуг} + Q_{ш.л} Q_{Si, Mn, P, \dots}$ кДж/т чугуна, определяющей индекс теплового состояния низа печи $i_n = Q_{пл}/Q_{опт}$. Величина $Q_{опт}$ определяется заданным составом чугуна, поэтому индекс i_n – показатель однозначной количественной оценки теплового состояния нижней зоны печи. Для его расчета требуются данные после выпуска чугуна, т.е. не ранее 3–4 часов работы печи. Промежуточные значения i_n находятся по «мгновенному» тепловому балансу [5].

Для расчета i_n необходимы технологические данные печи и сведения об изменении состава шихты и справочные данные. При проведении расчетного анализа следует учитывать влияние температурного поля верха на изменение состава газа, физико-химических свойств шихты. Способ УПИ раздельного контроля теплового состояния верха и низа позволяет учесть вышеназванное, используя зависимости $\Delta(\text{CO}_2)_к = \Psi(i_n)$; $\Delta(\text{CO} + \text{H}_2)_к = \Phi(i_n)$; $\Delta t_d = \chi(i_n)$

$$i_n = \frac{1}{Q_{опт}} \left\{ \frac{V_{\delta\delta}}{(V_{O_2})_к - (V_{O_2})_o} \left[\frac{C_{N_2} \cdot t_o - 1312}{11,53(1 - 0,154\eta_{H_2})\rho_o} \cdot N_2 + (C_{O_2} t_o + 7840) O_2 + 1,24 \cdot 10^{-3} C_{H_2O} \cdot t_o \cdot \varphi_o - \right] + \right. \\ \left. [CaJ_a + C_k \cdot K(1 - 0,01L)] \cdot t_o - 6912(1 - 0,111\eta_{H_2})\Gamma - 31750 F e_o \cdot r_d - 104500 \frac{d}{H_{сум}} - 24,6 \cdot 10^3 \right\} \quad (32)$$

где: V_o – расход дутья, $\text{м}^3/\text{мин}$;

δ – отнимаемое у шихты количество кислорода, $\text{м}^3/\text{т.чуг.}$;

$(V_{O_2})_к$ – расход (количество) кислорода, входящего в состав CO , CO_2 и H_2O колошникового газа, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$(V_{O_2})_o$ – расход кислорода, поступающего с влажным дутьем $\text{м}^3/\text{мин.}$;

G – количество природного газа, м³/т.чуг.;

t_0 – температура дутья, °С;

ϕ_2 – влажность дутья, г/м³;

O_2, N_2 – содержание в дутье, доли

$C_{O_2}, C_{N_2}, C_{H_2O}$ – средн. удельные теплостойкости в интервале $0-t_0$, кДж/м³ град.

J_0, K – расходы агломерата и кокса, кг/т.чуг.

C_0, C_k – ср. удельные теплостойкости при t_0 , кДж/кг.град.

η_{H_2} – степень использования водорода;

L – летучих в коксе, %

Γ_d – степень прямого восстановления;

Fe_0 – содержание железа в чугуна за вычетом Fe металлодобавок, %

$P_{сут.}$ – производство, 103 т.

d – диаметр горна, м.

Управление тепловым режимом осуществляется «воздействием сверху» изменением массы кокса или за счет подач специального его вида и состава, а также «воздействия снизу» изменением качественного состава дутья и расхода инжектируемых материалов.

8. Алгоритм регулирования теплового состояния, разработанный ВНИИМТ. Регулирование предусмотрено только корректировкой рудной нагрузки [26–28]. Индекс теплового состояния нижней части печи определяется в соответствии с выражением:

$$i_H = \frac{60V_{KT}^{ПК}}{G_{выс}} \cdot \{1254(CO + CO_2) + n[(0,335 + 0,4\phi_0) \cdot t_0 - 2580\phi_0 - Dq_{разл}] - 338(1 + \Delta H_2)\} - \rho \frac{Q_{охл}}{G_{выс}} + t_0 [K\bar{C}_k + P\bar{C}_p] - 2200 \cdot R'd [O_\gamma + O_\rho] \quad \text{ккал / кг.муг} \quad , \quad (33)$$

где $V_{KT}^{ПК}$ – выход колошникового газа скорректированный, нм³/мин

n – отношение объема азота в колошниковом газе к объему в дутье, нм³/нм³;

D – содержание ПГ в дутье, нм³/нм³;

$q_{разл}$ – теплота разложения углеводородов природного газа, кДж/м³;

ΔH_2 – количество H₂O, образующееся в печи нм³H₂O/нм³V_{кз}^{ПК};

ρ – доля затрат в нижней части, ед.;

$Q_{охл}$ – расход тепла на охлаждение низа;

t_0 – температура на границе зон теплообмена, °С

O_γ – кислородный эквивалент кокса кгO₂/кг.кокс

O_β – кислородный эквивалент для рудной части кгO₂/кг.чуг.

$$\Delta H_2 O = G \cdot \alpha' [CO + CO_2 + CH_4 - nD(c)] + n[\phi_0 + D(H)] - H_2 - 2CH_4 \quad (34)$$

$$\alpha' = \frac{0,874 \cdot V_k}{1 - A_k - S_k - 2 \cdot 868V_k}, \quad m.e. \quad \frac{\bar{H}_{2к}}{C_k} \quad (35)$$

$$n = \frac{(1 - CO_2 - CO - H_2 - CH_4) - V_{II} / 60V_{KG}^{ПК}}{1 - \omega} \quad (36)$$

$$V_{KG}^{ПК} = V_{KG}^{II} \cdot \frac{109n}{\sqrt{(13,6P_{\delta} : P_H) \cdot (0,37086O_2 - 0,996H_2 + 1,123)}} \quad (37)$$

Эквивалент углерода рудных материалов:

$$C_{\beta} = \frac{1}{e_p} \cdot C_p - \frac{2_{\phi}}{e_n} \cdot \left(\frac{e_{\phi}}{e_p} C_p - C_{\phi} \right) - \frac{2_{мет}}{e_n} \cdot \left(\frac{e}{e_p} \cdot C_p - C_{мет} \right) \quad (38)$$

Эквивалент углерода кокса:

$$C_{\gamma} = C_{\kappa} - \frac{e_{\kappa}}{e_p} \cdot C_{\varsigma} \quad (39)$$

Эквивалент кислорода:

$$O_{\beta} = \frac{1}{e_p} \cdot O_p - \frac{\partial_{\phi}}{e_n} \left(\frac{e_{\phi}}{e_p} \cdot O_p - O_{\phi} \right) - \frac{\partial_{мет}}{e_n} \left(\frac{e_{мет}}{e_p} O_p - O_{мет} \right) \quad (40)$$

$$O_{\gamma} = O_{\kappa} - \frac{e_{\kappa}}{e_p} \cdot O_p \quad (41)$$

9. Алгоритм автоматизированной системы прогноза содержания кремния в чугуне Киевского института автоматики. Алгоритм разработан для условий ММК, в котором учтены параметры: [Si] и [S], H₂ и CO+CO₂ в колошниковом газе, расход, влажность и температура дутья, содержание Fe и FeO в рудной части. Приведенные в работе [29] результаты исследований показали, что невысокие значения коэффициентов корреляции между расчетными показателями теплового состояния и содержанием кремния в чугуне объясняются изменением содержания кремния не только от выпуска к выпуску, но и в течение самого выпуска. Достоверность повышается, если пользоваться расчетной величиной кремния, определяемого по формуле:

$$[Si] = \frac{\sum_{i=1}^n P_i [Si_{Hi}]}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (42)$$

где P_i – масса чугуна в i-том ковше, т;

$[Si_{Hi}]$ – содержание кремния в ковше;

n – число ковшей за выпуск.

Испытания автоматизированной системы прогноза содержания кремния в чугуне на печи объемом 2014 м³ позволили обеспечить следующие показатели прогнозирования содержания кремния в чугуне:

- среднеквадратическая ошибка прогнозирования (δ):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Si_{Di} - Si_i^*)^2} = 0,079\% \quad (43)$$

- среднеарифметическая погрешность (r):

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Si_{Di} - Si_i^*) = 0,063\% \quad (44)$$

- среднеквадратическую погрешность (Δ^2):

$$\Delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Si_{Di} - Si_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n Si_{Di}^2} \cdot 100 = 1,67\% \quad (45)$$

- критерий эффективности прогнозирования (η):

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n (Si_{Di} - Si_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (Si_{Di} - \bar{Si}_D)^2} = 0,59\% \quad (46)$$

В результате прогноза 53,8% анализов уложилось в оптимальные (0,5–0,7%) пределы изменения кремния, а у 78,7% выпусков отклонение между прогнозируемым и действительным содержанием кремния не превышали $\pm 0,10\%$.

10. Адаптивная система с идентификатором в контуре управления (АСИ). Положительные результаты испытания вышеописанных систем оценки теплового состояния печи способствовали поиску более совершенных подходов к их созданию, в частности на базе АСИ (адаптивной системы с идентификатором в контуре управления) [30]. В адаптивной системе предусмотрена модель входных переменных, определяющих прогноз содержания кремния в чугуне (низ печи), и модель верха печи с соответствующими входными параметрами. Для модели низа печи входными параметрами являются: расход природного газа, сумма CO и N₂ в колошниковом газе, скорость схода шихты, содержание водорода и CO₂ в газе, отношение перепадов давления в шихте (верхнего к общему), температура колошникового газа, расход, давление, концентрация кислорода, влага и температура горячего дутья. Для верха печи, кроме перечисленных, вводятся параметры состава шихтовых материалов (рудных, флюсов и кокса). Система была внедрена на Коммунарском металлургическом заводе.

11. Показатель теплового состояния, предложенный Б.П. Довгалоком. Б.П. Довгалоком предложен расчетный показатель, отражающий приход тепла в нижнюю часть печи [31]:

$$T_n = 0,7O_c \frac{B - 3250O_d^{Fe}}{B^{(3)} + \Gamma} \quad (47)$$

Данный показатель аналогичен показателю M, предложенному А.Н. Похвисневым [1]. Отличия состоят в том, что входящие в состав показателя T аргументы, характеризующие развитие косвенного восстановления, смещены во времени относительно аргументов, характеризующих прямое восстановление. По мнению автора [31], при достоверной информации о параметрах процесса взаимосвязь T_n с содержанием кремния в

чугуне приближается к функциональной. По этому показателю контролируется текущее тепловое состояние процесса между выпусками, а по их отклонению от заданного вычисляются рекомендации на изменение температуры и влажности дутья:

$$\Delta t_{\delta} = \frac{\Delta T_{II} \cdot P_M}{V_{\delta} \cdot C_{\delta}}, \text{ } ^{\circ} \text{C} \quad (48)$$

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta T_{II} \cdot P_M}{9,5 V_{\delta} \cdot C_{\delta}}, \text{ ч / м}^3 \quad (49)$$

Заданное значение показателя вычисляется за предшествующие 10–20 выпусков. В формулах:

O_2 – окисленность шихты, кг O_2 /кг.ч.

O_d^{Fe} – газифицированный кислород прямого восстановления окислов Fe, $\text{нм}^3/\text{мин}$.

Γ – суммарный кислород прямого восстановления элементов чугуна;

$B, B^{(3)}$ – газифицированный кислород от непрямого восстановления железа, $\text{нм}^3/\text{мин}$, текущий и определенный раньше на 3 часа.

$$B' - (2508 \beta N_2 W_{к\delta}) \frac{W_{к\delta}}{\alpha N_2} \quad (50)$$

$$P_M = \frac{1,43}{O_2} (B^{(3)} + \Gamma) \quad (51)$$

V_{δ} – текущий расход дутья, $\text{нм}^3/\text{мин}$;

C_{δ} – теплоемкость дутья;

$W_{к,\delta}$ – теплосодержание комбинированного дутья.

12. Системы контроля и управления тепловым состоянием и ходом доменной плавки, разработанные за рубежом, изначально отличались большим количеством исходных и выходных параметров, базирующихся на особенностях процессов плавки. Оценка этих разработок изложена в работе [33].

13. В последние годы в Институте черной металлургии в ходе выполнения исследований по использованию для контроля, прогноза и управления процессов доменной плавки информации установленной на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике [34] разработаны способы прогнозирования содержания кремния в чугуне и регулирования теплового состояния горна печи [35,36]. В основу способа прогнозирования содержания кремния в чугуне за 3 часа до его выпуска положена установленная в результате экспериментальных исследований взаимосвязь скоростей опускания шихтовых материалов в осевой зоне колошника печи с содержанием кремния в чугуне. Исследования в этом направлении продолжатся и направлены на разработку целевого критерия оценки теплового состояния низа доменной печи, включающего не учитываемую в известных критериях информацию, получение которой стало возможным после установки

на ДП №9 разработанных ИЧМ автоматизированных систем контроля процессов доменной плавки.

Выводы. Из рассмотренных подходов наибольшей наукоемкостью обладают разработки показателей теплового состояния низа печи, наиболее достоверно определяющие принимаемое в качестве критерия прогнозного содержание кремния в чугуна. Такowymi являются подходы МИ-ИС (А.Н.Похвиснев), ЛПИ (А.Н.Рамм) и УПИ (Б.И.Китаев). Весьма технологической является модель ВНИИМТа (В.И.Мойкин и др.). Как показано в работе [6], общность многих показателей теплового режима связана с общностью основы, на которой они строятся: материального и теплового балансов доменной плавки. Различие показателей состоит в их структуре и числе аргументов – исходной информации о плавке. Большая или меньшая теснота связей показателей разных алгоритмов с критерием теплового состояния в значительной мере определяется достоверностью информации и методики обработки экспериментальных данных.

1. *Доменное производство* / А.Н.Похвиснев, В.С.Абрамов, Н.И.Красавцев, Н.К.Леонидов – ГНИЛ ЧЦ – Москва, 1951. – 707 с.
2. *Готлиб А.Д.* Регулирование теплового режима доменных печей. // Известия ВУЗов ЧМ. – 1961. – №2 – С.10 – 21.
3. *Рамм А.Н.* Непрерывный контроль и регулирование теплового режима доменной плавки с помощью электронной вычислительной машины. // Бюллетень Черметинформация. – 1964. – №11. – С.12–20.
4. *Сорокин В.А.* Комплексная автоматизация доменных печей. – ГНТИ ЦМ, 1963. – 297 с.
5. *Теплотехника доменного процесса* / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Е.Л.Суханов, Н.Н.Овчинников, В.С.Швыдкий. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
6. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2–е издание / Товаровский И.Г. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768 с.
7. *Применение металлургических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом* / И.Г.Товаровский, Е.И.Райх, К.К.Шкодин, В.А.Улахович. – 1978. – 264 с.
8. *Сорокин В.А.* – Комплексная автоматизация доменных печей. – М.: ГНТИ ЧиЦ, 1963. 179 с.
9. *Похвиснев А.Н., Курунов И.Ф., Клемперт В.М.* Управление тепловым состоянием доменной печи с помощью ЭВМ. // Сб. тр. МИСИС. LXIX. – М. Металлургия, 1971. – С.100–110.
10. *К вопросу о расчете показателей теплового состояния доменной печи.* // А.Н.Похвиснев, И.Ф.Курунов, Ю.С.Юсфин и др. Сообщение 1. Сообщение 2, // Изв. ВУЗов ЧМ. – 1966. – №11. – С.20 – 21.
11. *Испытание алгоритма управления тепловым состоянием доменной печи* / А.Н.Похвиснев, И.Ф.Курунов, В.М.Клемперт и др. // Сталь. – 1971. – №1. – С.9–12.
12. *Похвиснев А.Н., Рожавский Л.И., Жилкин Н.К.* К вопросу об автоматизации доменного процесса. // Сталь. – 1963. – №10. – С 875–878.

13. *Регулирование* теплового режима доменной плавки с использованием вычислительной машины / А.К.Тараканов, А.Л.Гиммельфарб, Ю.Г.Моисеев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. –1969. –№4 (58). – С.1–4.
14. *Райх Е.И. Автоматический* контроль и регулирование теплового режима доменной плавки. // *Труды второй научно-технической конференции молодых исследователей черной металлургии*, 15 – 18 октября 1968 г. – М.: Металлургия, 1971. – С.96 – 99.
15. *Применение* металлургических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом. / И.Г.Товаровский, Е.И.Райх, К.К.Шкодин, В.А.Улахович. – 1978. – 264 с.
16. *Автоматизация* в черной металлургии. Пер. с англ., немецк., франц. Под редакцией Д.И.Туркенича. – М., Металлургия, 1969. – 575 с.
17. *Применение* вычислительной техники на металлургическом заводе / С.Т.Плискановский, В.А.Маковский, В.Я.Кожух и др. – М., Металлургия, 1963. – 271 с.
18. *Применение* ЭВМ в металлургии. (МИСиС, Сб. №82). – М., Металлургия, 1975. – 456 с.
19. *Сорокин В.А.* – Комплексная автоматизация доменных печей. – М.: ГНТИ ЧиЦ, 1963. – 179 с.
20. *Разработка* регулирования теплового режима доменной печи / А.А.Гиммельфарб, А.К.Тараканов, В.К.Гринштейн, В.К.Тосенко // Сб. тр. №5 Международной конференции. Острава, Чехословакия. – 1975. – С.296–306.
21. *Рамм А.Н.* Формулы для непрерывного контроля теплового режима доменных печей. Доменное производство (справочник), том 1. – М., Металлургия, 1963.– С.576–578.
22. *Баллон И.Д., Алексеев Б.И.* Автоматическое регулирование теплового состояния низа доменной печи // *Бюлл. ЦНИИЧМ*. – 1959. – №16. – С.36–39.
23. *Количественная* оценка теплового состояния верха доменной печи / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Б.Л.Лазарев, Е.А.Суханов. // *Изв. ВУЗов ЧМ*. – 1965. – №10. – С.32–36.
24. *Медведев Н.А., Спасов А.А., Самойлович Р.С.* О методике установления нормативных материалов доменной плавки. // *Изв. ВУЗов ЧМ*. – 1966. – №3. – С.33–37.
25. *Контроль* теплового состояния доменной печи с применением ЭВМ / Е.Л.Суханов, Б.И.Китаев, С.А.Загайнов, Л.П.Кожуркова. // Сб. Проблемы автоматизированного управления доменным производством. –К.: «Наукова думка», 1974. – С.210 – 219.
26. *Математическое* описание доменного процесса на основе закономерностей тепло – и массообмена (модель ВНИИМТа). / Б.А.Боковинов, Н.М.Бабушкин, В.М.Малкин, В.Н.Мойкин. // Сб. Проблемы автоматизированного управления доменным производством. – К.: «Наукова думка», 1974.–С.19–27.
27. *Мойкин В.Н., Боковинов Б.А., Бабушкин Н.М.* Математическое моделирование – современный метод анализа и прогноза доменной плавки. // *Тр.всес.научно-техн.конф. «Теория и практика доменного производства»*. –1983. –С.105–106.
28. *Нестационарные* процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н.Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А.Спирин, Б.А.Боковинов – Челябинск: Металлургия, 1989. – 120 с.

29. *Микрюков Б.Г., Бошняков А.Н., Федулов Ю.В.* Автоматизированная система прогнозирования содержания кремния в чугунах и опыт ее эксплуатации на ММК. // *Сталь*. – 1980. – №9. – С.751–754.
30. *Опыт создания адаптивной системы управления тепловым режимом доменной плавки / В.П.Брайтман, М.С.Левин, В.М.Минаев и др.* // *Сталь*. – 1984. – №6. – С.11–14.
31. *Довгалюк Б.П.* Система керування технологічними процесами доменної плавки. – Дніпродзержинськ: ДДГУ, 2009. – 245 с.
32. *Тараканов А.К., Иващенко В.П., Лялюк В.П.* Оценка приоритетов в развитии автоматизированных систем управления доменным процессом. // *Новини науки Придніпров'я*. – Май 2010. – С.15–22.
33. *Сб. материалов* Международного конгресса по автоматизации в черной металлургии. Амстердам. Дюссельдорф, 1965. – 576 с. Издано М.: Металлургия, 1969 г.
34. *Муравьева И.Г.* Новые возможности автоматизированного управления ходом доменной печи. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – №. 3 – С.126–129.
35. *Прогнозирование* теплового состояния горна доменной печи / В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, С.Т.Шулико, Е.И.Шумельчик. // *Сталь*. – 2009. – № 5. – С.7–9.
36. *Патент UA 99056 C2* на изобретение. Способ прогнозирования содержания кремния в чугунах / В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, Е.И.Шумельчик, Д.В.Пинчук – заявл. 18.04.11; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13, 2012 г.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф., Тогобицкой Д.Н.*

***В.І.Большаков, Н.А.Гладков, І.Г.Муравйова, Ю.С.Семьонов,
Е.І.Шумельчик, О.А.Белошапка***

Аналіз комплексних показників теплового режиму та особливості їх використання при регулюванні теплового стану доменної печі

У роботі представлено аналіз досліджень з розробки комплексних показників теплового режиму доменної печі. Проаналізовано різні підходи до регулювання теплового стану горна доменної печі. Показано, що найбільшу інформативність мають показники теплового стану низу печі, що найбільш достовірно визначають вміст кремнію в чавуні. Показано, що результати прогнозування за критерієм теплового стану значною мірою визначаються достовірністю інформації і методикою обробки експериментальних даних.