

Г.А.Полянский, В.И.Набока, А.П.Фоменко, Н.В.Крутас

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ХОДА ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА**

ОАО «Запорожсталь», Запорожский национальный технический университет

Представлена математическая модель контроля и прогнозирования хода доменного процесса в зависимости от изменения соотношения прямого и косвенного восстановления. Разработаны структурные схемы инвариантных систем управления доменным процессом с целью компенсации случайных возмущающих воздействий с учетом изменяющейся теплопотребности в горне доменной печи.

Автоматизация управления доменным процессом требует тщательного анализа доменной печи как объекта управления. Доменный процесс представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных физико-химических, тепло-физических, аэродинамических и механических процессов, протекающих в условиях переменных во времени и пространстве температурных, силовых полей. Изучение доменной печи как объекта автоматического управления усложняется еще из-за многообразия и случайности факторов, влияющих на ее работу. Поэтому обычно применяемые методы не дают желаемых результатов, а по производственным условиям нельзя вносить скачкообразных или импульсных возмущений, исследовать систему частотными методами.

Доменная печь с точки зрения автоматизированного управления представляет собой сложный многомерный объект с распределенными параметрами и с большими переменными транспортными запаздываниями. Кроме того, доменный процесс подвержен ряду неконтролируемых случайных возмущений и протекает при высоких температурах (до 2000⁰С) и давлениях.

Решение задачи математического описания доменного процесса с целью отыскания алгоритма автоматизированного управления ходом доменной печи с помощью средств микропроцессорной техники для обеспечения заданного или оптимального уровня показателей производительности и экономичности плавки вызывает необходимость дальнейшего тщательного изучения динамики доменного процесса [17].

Целью настоящих исследований явилось изучение статике и динамики доменного процесса по каналу случайных возмущающих воздействий: изменение состава колошникового газа, характеризующего соотношение прямого и косвенного восстановления закиси железа – среднеинтегральная температура жидкого чугуна на выпуске из доменной печи, которая принята в качестве критерия теплового состояния горна, а также по заданным каналам управляющих воздействий: параметры дутья – среднеин-

тегральная температура чугуна, рудная нагрузка – среднеинтегральная температура жидкого чугуна на выпусках.

На основе результатов исследований составлена математическая модель контроля и прогнозирования хода доменного процесса в зависимости от соотношения прямого и косвенного восстановления и разработаны структурные схемы инвариантных систем стабилизации доменного процесса с учетом изменяющейся теплопотребности в горне доменной печи.

Среднеинтегральная температура жидкого чугуна на выпусках из доменной печи определяется по следующей формуле:

$$t_u = 1/\tau_0 \int t_c(t) dt$$

где t_u – среднеинтегральная температура чугуна, °С

t_c – температура чугуна, измеряемая в течение выпуска °С

τ_0 – длительность выпуска, мин

a, b – соответственно время начала и конца выпуска

При прочих равных условиях она зависит от соотношения прямого и косвенного восстановления окислов железа [7–11], о чем просигнализирует изменение содержания ($CO+CO_2$) в колошниковом газе.

Идеи управления доменным процессом по изменению состава колошникового газа ученые и практики пытались реализовать еще в 30–40-х годах прошлого века. Так, например, профессор А.Н. Похвиснев пытался разработать рекомендации по управлению доменной плавкой по изменению состава колошникового газа еще в 1935 году [5].

В 60-х годах в Днепропетровском металлургическом институте разработана методика управления тепловым состоянием горна доменной печи [1–4], основным элементом которой считается логическая таблица, по которой определяются причины отклонения теплового режима и рекомендуемые методы его регулирования в зависимости от изменения содержания CO_2 и CO в колошниковом газе и температуры фурменной зоны.

Кроме школы профессора Готлиба А.Д., известен ряд коллективов ученых, научные работы которых посвящены проблеме управления доменным процессом по изменению состава колошникового газа. Это школы профессора Сорокина В.А. [12], Похвиснева А.Н. [5–6], Рамма А.Н. [14], Китаева Б.И. [13].

Но, к сожалению, разработанные многочисленные алгоритмы управления доменным процессом по изменению состава колошникового газа не получили широкого распространения. Каковы же причины? На наш взгляд они заключаются в следующем:

Во-первых, не учитывались динамические свойства доменного процесса; во-вторых, оптико-акустические газоанализаторы, использованные в доменном производстве, имели большую относительную погрешность – 2,5% и поэтому они не могли решить указанную проблему. Достаточно сказать, что по многочисленным практическим и теоретическим данным изменение суммы ($CO + CO_2$) колошникового газа на 1% вызывает изме-

нение температуры жидкого чугуна на выпусках на 50 – 60°С либо температуры дутья для компенсации указанного отклонения такого же порядка 60 – 80°С. Поэтому необходимо использовать газоанализаторы, измеряющие состав колошникового газа, с погрешностью 0,1 – 0,2 абс. Этим требованиям удовлетворяет масспектрометрический комплекс «Гранат», относительная погрешность измерения которого составляет 0,5% отн. Указанный комплекс «Гранат» внедрен на доменной печи №2 ОАО «Запорожсталь».

Изменение состава колошникового газа характеризует изменение степени прямого и косвенного восстановления, которое вызывает нагрев либо похолодание горна доменной печи. В качестве косвенного критерия теплового уровня нагрева горна нами принята среднеинтегральная температура жидкого чугуна на выпусках из доменной печи [7].

В зависимости от многочисленных случайных факторов происходит усиление или ослабление процесса косвенного восстановления, в результате чего от железосодержащей части шихты, находящейся в шахте доменной печи, отнимается большее или меньшее количество кислорода. В этот же момент времени в зоне прямого восстановления будет происходить прямое восстановление железа, доля которого будет соответствовать доле косвенного восстановления, протекавшего несколько часов назад. Таким образом, сумма коэффициентов косвенного и прямого восстановления в каждый данный момент времени может отличаться от единицы.

На границе зон косвенного и прямого восстановления в случае предварительного изменения доли косвенного восстановления начнет в соответствии с количеством оставшегося в шахте кислорода образовываться большее или меньшее количество окиси углерода, о чем просигнализирует изменение содержания ($\text{CO} + \text{CO}_2$) в колошниковом газе.

В соответствии с изменением содержания ($\text{CO} + \text{CO}_2$) в колошниковом газе для компенсации изменившейся теплопотребности в зоне прямого восстановления можно изменить температуру или влажность дутья, расход природного газа, или рудную нагрузку с тем, чтобы сохранить нагрев горна на прежнем уровне.

Проведенные исследования позволили установить качественную и количественную зависимость между изменением суммы ($\text{CO} + \text{CO}_2$), характеризующей косвенно динамику прямого восстановления при учете влияния других факторов (параметров дутья, разложения CaCO_3 и др.), и изменением среднеинтегральной температуры на выпусках из доменной печи.

В результате сопоставления и обработки больших массивов данных состава колошникового газа и среднеинтегральной температуры жидкого чугуна на выпусках (со сдвигом в течение 1 – 3,5 часа значений изменения суммы ($\text{CO} + \text{CO}_2$)) получена зависимость,

$$\Delta t_u = f [\Delta(\text{CO} + \text{CO}_2)].$$

Рассчитанное уравнение регрессии при постоянстве параметров дутья, расхода кислорода и природного газа в дутье, газораспределения в шахте печи и системы загрузки имеет вид:

$$\Delta t_{\text{ч}} = -45 \Delta(\text{CO} + \text{CO}_2),$$

где: $\Delta t_{\text{ч}}$ – приращение среднеинтегральной температуры жидкого чугуна на выпусках;

$\Delta(\text{CO} + \text{CO}_2)$ – приращение суммы (CO + CO₂) колошникового газа.

Рассчитанный коэффициент парной корреляции ($r = -0.91$) подтверждает, что между приращением среднеинтегральной температуры жидкого чугуна на выпусках и изменением состава колошникового газа существует весьма тесная связь.

На основании изменения коэффициента парной корреляции при увеличении сдвига от 0 до 4 часов. Между изменением состава колошникового газа (CO+CO₂) и изменением среднеинтегральной температуры ($\Delta t_{\text{ч}}$) жидкого чугуна на выпусках получены приближенные динамические параметры переходных процессов, которые имеют следующие значения: время запаздывания $\tau = 2 - 2,5$ часов, постоянная времени $T = 1 - 1,5$ часа. ($\tau + T \approx 3$ часов). Из статической характеристики установлен коэффициент передачи, который равен:

$$K = -45 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \Delta(\text{CO} + \text{CO}_2).$$

Передаточная функция объекта по каналу возмущающих воздействий в размерном виде имеет вид:

$$W(P) = -45e^{-1.3p} / (1,2p + 1) \text{ } ^\circ\text{C}/\% \Delta(\text{CO} + \text{CO}_2)$$

Транспортное запаздывание $\tau = 1,3$ часа, постоянная времени $T = 1,2$ часа.

Нагрев дутья не только усиливает восстановление кремния и марганца, повышает степень нагрева жидких продуктов плавки, но и дает экономию тепла горючего.

Отклонение температуры дутья от оптимальной нарушает условия прохождения процессов, что обязательно сказывается на тепловом режиме горна доменной печи и, следовательно, на среднеинтегральной температуре жидкого чугуна на выпусках.

Для выяснения указанной зависимости (по возможности при постоянных значениях основных параметров доменного процесса) регистрировались усредненные значения температуры дутья за каждый час, и измерялась температура чугуна непрерывно в течение всех выпусков. Затем полученные данные обрабатывались по описанной методике.

Характер полученной зависимости определяется по методу наименьших квадратов, как показали исследования, кривая зависимости приращения среднеинтегральной температуры жидкого чугуна от приращений температуры дутья, достаточно точно может быть описана уравнением (со сдвигом между массивами данных ≈ 1 час)

$$\Delta t_{\text{ч}} = 0,68 \Delta t_{\text{д}}, r = 0,8012,$$

где $\Delta t_{\text{ц}}$ – приращение среднеинтегральной температуры чугуна из доменной печи, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{\text{д}}$ – приращение температуры дутья.

Статистические данные о ходе технологического процесса доменной плавки были получены при помощи АСУТП доменной печи №3 ОАО «Запорожсталь». Значения параметров, характеризующих процесс, в том числе и температуры жидкого чугуна на выпусках, регистрировались постоянно с дискретностью одна минута. Количество выпусков за сутки составляет 12, что вызывает трудности при автоматизированном формировании массивов данных для определения статистики и динамики доменного процесса по заданным каналам управления (изменением рудной нагрузки или параметров дутья). Поэтому были разработаны соответствующие алгоритмы и составлены программные средства для решения перечисленных задач с учетом указанных ограничений.

На основе экспериментальных данных с использованием математического аппарата статистической динамики [15,16] были получены статические и динамические характеристики доменной плавки по соответствующим каналам, регулирующих воздействий на доменный процесс изменением рудной нагрузки («сверху») или параметров дутья («снизу»). На основании полученных зависимостей составлена модель контроля и прогнозирования доменной плавки и разработаны алгоритмы управления доменным процессом при создании инвариантных систем компенсации случайных возмущающих воздействий, которые представлены ниже [18,21].

Управление доменным процессом по каналу изменения пара в дутье осуществляется с учетом его динамических свойств, указанных ниже:

$$\Delta W_n = -K_1(t_{\text{из}} - t_u) \quad K_1 = 0.033 \frac{T / \text{час}}{^{\circ}\text{C}}$$

$$W_n(P) = \frac{K e^{-\tau P}}{1 + PT} = \frac{30 e^{-0.5P}}{1 + 1.34P} \frac{^{\circ}\text{C}}{T / \text{час}}$$

где $K=30$ $^{\circ}\text{C}/\text{Tчас}$; $T = 1,34$ ч; $\tau = 0,5$ ч.

$W_n(P)$ – передаточная функция по каналу расход пара в дутье – среднеинтегральная температура чугуна ($t_{\text{ц}}$);

$\Delta W_n(P)$ – изменение расхода пара в дутье;

T – постоянная времени, час;

$t_{\text{ц}}$ – среднеинтегральная температура чугуна на выпуск из доменной печи;

$t_{\text{из}}$ – заданное оптимальное значение среднеинтегральной температура чугуна на выпуск из доменной печи, $^{\circ}\text{C}$;

τ – транспортное запаздывание, час;

K_1 – коэффициент передачи.

Управление доменным процессом изменением рудной нагрузки осуществляется с использованием следующих найденных экспериментальным путем зависимостей:

$$\Delta \frac{P}{K} = K_1(t_{из} - t_u) \quad K_1 = 2,66 \frac{\text{кг кокса}}{\text{в подачу}} / ^\circ C$$

$$W_k(P) = \frac{K_2 e^{-\tau P}}{1 + PT} = \frac{0,37 e^{-4,5P}}{1 + 2,6P} \text{ } ^\circ C / \frac{\text{кг кокса}}{\text{в подачу}}$$

где $W_k(P)$ — передаточная функция по каналу рудная нагрузка, $(\Delta \frac{P}{K})$

– среднеинтегральная температура чугуна (t_u)

$$T = 2,6 \text{ часа}$$

$$\tau = 4,5 \text{ часа}$$

$$K_2 = 0,375 \text{ } ^\circ C / \frac{\text{кг кокса}}{\text{в подачу}}$$

$$\Delta \frac{P}{K} \text{ — изменение рудной нагрузки, } \frac{\text{кг кокса}}{\text{в подачу}} ;$$

Управление доменным процессом по каналу изменения температуры дутья, 0C – среднеинтегральная температура жидкого чугуна, 0C

$$\Delta t_d = K_1(t_{из} - t_u) \quad K_1 = 1,33 \frac{^0 C}{^0 C}$$

$$W_T(P) = \frac{K_2 e^{-\tau P}}{1 + PT} = \frac{0,75 e^{-0,25P}}{1 + 0,98P} \text{ } ^0 C$$

где $W_T(P)$ — передаточная функция по каналу температура дутья, t_d , 0C – среднеинтегральная температура чугуна (t_u), 0C ;

$$T = 0,98 \text{ часа}$$

$$\tau = 0,25 \text{ часа}$$

$$K_2 = 0,75 \frac{^0 C}{^0 C}$$

Формулы, используемые при разработке структурных схем системы управления тепловым состоянием горна доменной печи на базе принципа управления по возмущению представлена ниже:

$$\Delta t_d = -K_1 \Delta(CO + CO_2)$$

$$\Delta W_{II} = K_2 \Delta(CO + CO_2)$$

$$\Delta \frac{P}{K} = -K_3 \Delta(CO + CO_2)$$

K_1, K_2, K_3 – коэффициенты передачи.

$$K_1 = 65 \frac{^0 C}{\%} ; K_2 = 1,5 \frac{T / \text{час}}{\%} ; K_3 = 120 \frac{\text{кг кокса в подачу}}{\%}$$

На основании полученной информации разработаны структурные схемы систем стабилизации теплового состояния горна доменной печи на базе принципа управления по возмущению.

Принцип управления по возмущению, или принцип компенсации возмущений, состоит в том, что управляющее воздействие в системе вырабатывается в зависимости от результатов измерения возмущения, действующего на объект (доменный процесс). Системы, построенные по этому принципу, работают по разомкнутой цепи, т.е. не имеют обратной связи. Системы с разомкнутой цепью воздействий разделяют на две группы: системы компенсации и системы программного управления.

В системе компенсации (рис.1) на управляемый объект ОУ (доменный процесс) воздействует возмущение ($f_i(t)$ соотношение прямого и косвенного восстановления окислов железа), изменяющее регулируемую величину (среднеинтегральную температуру чугуна на выпусках из доменной печи) $X_{\text{вых}}(t)$.

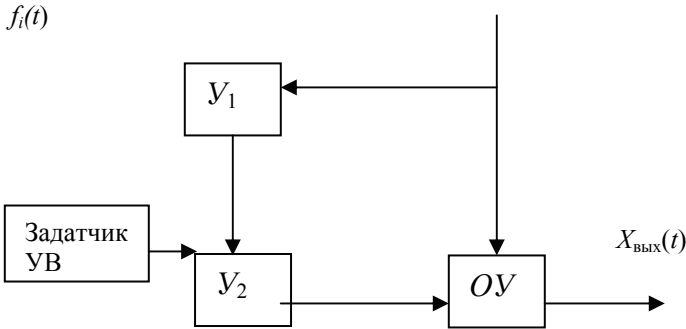


Рис.1. Блок схема системы компенсации.

ОУ – объект управления, УВ – управляющее воздействие;
 Y_1 – измеритель (газоанализатор), Y_2 – сравнивающее устройство

Это возмущение (изменение состава колошникового газа) измеряется с помощью газоанализаторов Y_1 . Полученный сигнал, соответствующий приращению суммы ($\text{CO} + \text{CO}_2$), преобразуется и сравнивается со значениями задатчика, соответствующими оптимальному доменному процессу, Y_2 формирует управляющий сигнал. Следовательно, управляющее воздействие является функцией возмущающего воздействия

$$t_{\text{и}}(t) = F[f_i(t)], \text{ где}$$

$t_{\text{и}}$ – среднеинтегральная температура чугуна, $^{\circ}\text{C}$;

$f(t)$ – случайное возмущающее воздействие, изменяющее соотношение прямого и косвенного восстановления закисы железа

Величина и знак управляющего воздействия должны быть такими, чтобы полностью или частично компенсировать случайные возмущающие воздействия на объект (доменный процесс).

Если у некоторого объема шихты в зоне косвенного восстановления вследствие ухудшения распределения газов на колошнике или вследствие ухудшения восстанавливаемости железосодержащих материалов будет отнято меньше кислорода, то, естественно, избыточный кислород будет отнят в зоне прямого восстановления с затратой твердого углерода и большего количества тепла.

Об увеличении доли прямого восстановления можно судить заранее, по приращению суммы ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в колошниковом газе до того как материалы с недостатком физического нагрева и углерода кокса придут на фурмы. Эта сумма пропорциональна степени прямого восстановления, а следовательно, и степени похолодания горна печи и наоборот. Если уменьшится сумма ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в колошниковом газе, то это означает уменьшение доли прямого восстановления окислов железа, а следовательно, через некоторое время (в зависимости от скорости схода шихты) следует ожидать прихода на фурмы излишнего кокса и хорошо нагретых материалов.

При использовании суммы ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в качестве критерия прямого восстановления, а следовательно, и теплового состояния горна, необходимо уметь учитывать влияние на сумму ($\text{CO}+\text{CO}_2$) других факторов, к которым относятся:

- изменение доли кислорода в дутье;
- изменение карбонатов в шихте;
- изменение расхода природного газа;
- вынос колошниковой пыли.

Разработанные структурные схемы систем управления тепловым состоянием горна доменной печи с учетом управляющих воздействий (изменением температуры, влажности дутья либо рудной нагрузки) приведены ниже. При этом необходимо учитывать, что некоторые входные параметры влияют на содержание ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в колошниковом газе и, тем самым, затемняют влияние изменения доли прямого восстановления на ($\text{CO}+\text{CO}_2$). Поэтому необходимо учитывать их изменения и вводить поправки из следующих расчетов:

1. При изменении расхода кислорода на $\pm 10\text{мм}^3/\text{мин}$ ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в колошниковом газе меняется на $\pm 0,5\%$;

2. При изменении влажности дутья на $\pm 2\text{ г}/\text{мм}^3$, ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в газе меняется на $\pm 0,1\%$;

3. При изменении расхода природного газа на $\pm 1000\text{ мм}^3/\text{час}$ ($\text{CO}+\text{CO}_2$) в газе меняется на $\pm 0,25\%$.

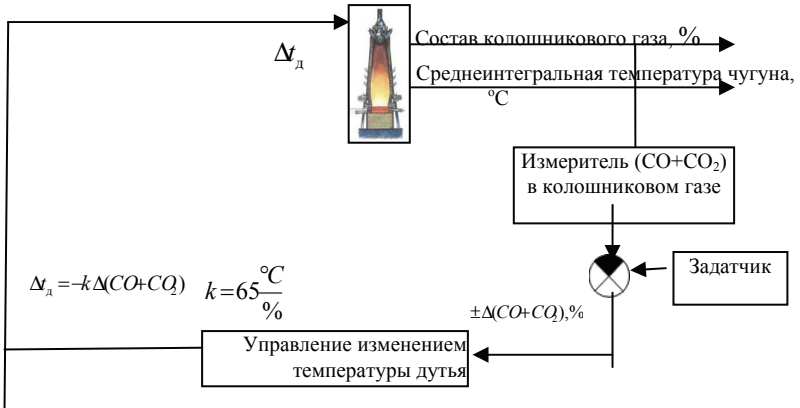


Рис.2. Структурная схема системы управления тепловым состоянием горна доменной печи по отклонению суммы (CO+CO₂) колошникового газа относительно ее оптимального значения изменением температуры дутья

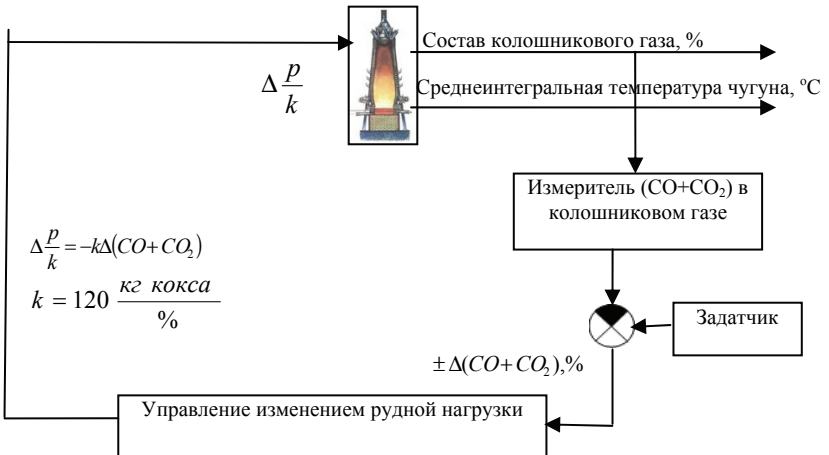


Рис.3. Структурная схема системы управления тепловым состоянием горна доменной печи по отклонению суммы (CO+CO₂) колошникового газа относительно ее оптимального значения изменением рудной нагрузки

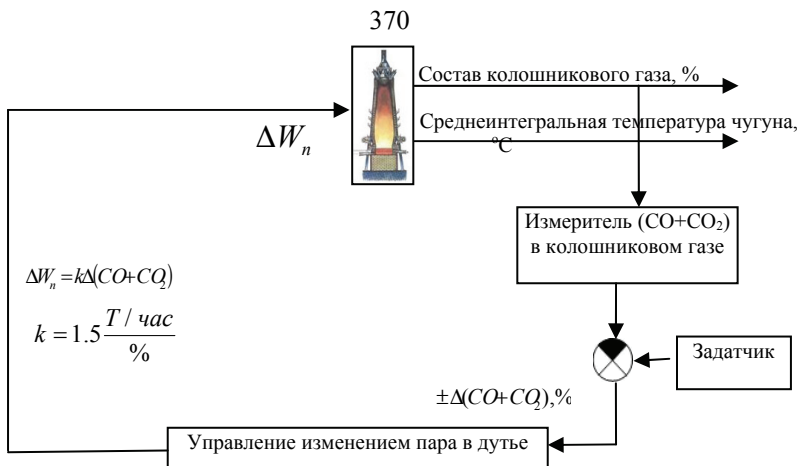


Рис.4. Структурная схема системы управления тепловым состоянием горна доменной печи по отклонению суммы (CO+CO₂) колошникового газа относительно ее оптимального значения изменением пара в дутье.

Апробация разработанных структурных систем компенсации случайных возмущающих воздействий непосредственно в производственных условиях дала положительные результаты. Внедрение разработанных алгоритмов, рекомендаций и систем будет осуществлено после установки двухцветного оптического пирометра на ДП №2 во время капитального ремонта третьего разряда для непрерывного измерения температуры жидкого чугуна на выпусках.

1. Готлиб А.Д., Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А. Основы автоматического регулирования доменного процесса//В кн.: Доменный процесс по новейшим исследованиям. – М.:Металлургиздат,1963.– С.285–295.
2. Гиммельфарб А.А., Ефименко Г.Г. Автоматическое управление доменным процессом. – М.: Металлургия, 1969.– 309с.
3. Тараканов А.К. О рациональных технологических принципах построения алгоритмов управления тепловым режимом доменной плавки // Известия вузов. Черная металлургия.–1987.–С.134–138.
4. Тараканов А.К. Развитие теоретических основ и промышленная реализация новых методов управления технологическим режимом доменной плавки. Дисс. докт. техн. наук.– Днепропетровск,1991.
5. Похвиснев А.Н. Управление доменным процессом по изменению состава колошникового газа // Теория и практика металлургии.—1939.— №8.—С.15–19.
6. Похвиснев А.Н., Воловик Г.А. К вопросу о регулировании хода доменной печи по анализу колошникового газа // Научные исследования в помощь доменному производству (сборник трудов) – Днепропетровское книжное издательство.—1960 – С.107–114.

7. *Кочо В.С. Полянский Г.А.* Контроль теплового состояния низа доменной печи //Металлург.—1967.—№6.
8. *Воловик А.В., Хомич В.Н.* // Бюл ЦНИИЧМ. — 1966.—№5.—С.31–32
9. *Похвиснев А.Н., Курунов И.Ф.* О критерии теплового состояния горна в связи с вопросами регулирования теплового состояния доменной печи//сталь.— 1966.—№4.—с.333.
10. *Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л.* Теплообмен в доменной печи. — М.:Металлургия, 1966. — 355с.
11. Способ стабилизации тепловых состояний доменной печи / В.И.Набока, Н.В.Крутас, М.Е.Шарапов, Г.А.Полянский // Сталь.—2003. — №10. — С.11–12.
12. *Сорокин В.А.* Комплексная автоматизация доменных печей. — Metallurgizdat, 1963.
13. *Теплообмен* в доменной печи. / Китаев Б.И. и др. — М.: «Металлургия»,1966.
14. *Рамм А.Н.* // Бюлл. ЦИИЧМ.1964.№11.(487). с.12–20.
15. *Солодовников В.В.* Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. — М.: Физматгиздат,1960. — 655с.
16. *Ребеко А.Ф. Мкртчян Л.С., Бесфамильный В.В.* Исследование теплового состояния доменной печи как объекта автоматического управления // Сталь.— 1966. — №8. — С.679–682.
17. *Товаровский И.Г., Севернюк В.В., Лялюк В.П.* Анализ показателей и процессов доменной плавки.—Днепропетровск: Пороги, 2000. — 420с.
18. *Кочо В.С., Полянский Г.А.* Исследование взаимосвязи параметров, характеризующих тепловое состояние доменной печи // Известия вузов.Черная металлургия. —1969.—№12. — С.141–142.
19. Исследование и разработка алгоритмов управления доменным процессом / В.И.Набока, Г.А.Полянский, А.П.Фоменко, Н.В.Крутас // Сталь. — 2005. — №11. — С.15–17.
20. Исследование динамики переходных процессов теплового состояния горна доменной печи / В.И.Набока, Г.А.Полянский, А.П.Фоменко, Н.В.Крутас. // Металлургия. Сбірник наукових праць. Запоріжжя: ЗДІА. — 2005. — Вип.11. — 128с.
21. Исследование взаимосвязи среднеинтегральной температуры чугуна на выпусках и составах колошникового газа с целью разработки алгоритмов управления доменным процессом / / В.И.Набока, Г.А.Полянский, А.П.Фоменко и др. //Теория и практика металлургии. — 2006. — №6. — С.15–20

Сведения об авторах:

Полянский Геннадий Алексеевич – доцент, канд. техн. наук. Запорожский национальный технический университет

Набока Владимир Иванович – зам. технического директора, начальник технического отдела ОАО «Запорожсталь»

Крутас Николай Васильевич – начальник доменного цеха ОАО «Запорожсталь»

Фоменко Александр Павлович – главный специалист по металлургическому производству ОАО «Запорожсталь»