

Министерство образования и науки Российской Федерации
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухоносова

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫПЛАВКИ
ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2018

УДК 681.51:669.162.2(075.8)

Рецензенты:

Проректор по учебной работе ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
доктор технических наук, профессор
А.А. Радионов

Профессор кафедры ВТиП ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
доктор технических наук, профессор
И.М. Ячиков

Парсункин, Б.Н.

Автоматизация и оптимизация управления процессом выплавки чугуна в доменных печах: учеб. пособие / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухоносова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 215 с.

ISBN 978-5-9967-1208-3

В учебном пособии представлены результаты анализа и исследования существующих основных положений автоматизированного управления процессом выплавки чугуна в доменных печах. Рассмотрены возможности синтеза систем оптимального управления и математической формализации автоматического управления параметрами доменного процесса на основе современных технических микропроцессорных средств.

Предназначено для обучающихся по направлению подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах» при изучении дисциплины «Автоматизация технологических процессов и производств». Также пособие будет полезно для обучающихся бакалавриата и магистратуры других направлений, изучающих автоматизированные системы управления технологическими процессами, широкого круга инженерно-технических работников и технологического персонала.

УДК 681.51:669.162.2(075.8)

ISBN 978-5-9967-1208-3

© Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И. Носова, 2018
© Парсункин Б.Н., Андреев С.М.,
Сухоносова Т.Г., 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1. УСТРОЙСТВО ДОМЕННОЙ ПЕЧИ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА	9
1.1. Краткая историческая справка	9
1.2. Конструкция и элементы доменной печи	9
1.3. Технологические особенности доменной плавки	11
Контрольные вопросы к разделу 1	14
2. ДОМЕННОЯ ПЕЧЬ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ	15
2.1. Основные положения оптимизации управления процессом доменной плавки	17
2.2. Методы синтеза математических моделей доменного производства	19
Контрольные вопросы к разделу 2	21
3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ	22
3.1. Принципиальная схема контроля основных параметров доменного процесса	22
3.1.1. Загрузка шихтовых материалов в ДП	22
3.1.2. Информация о текущем состоянии верхней зоны печи (колошника)	24
3.1.3. Информация о текущем состоянии доменного процесса по высоте шахты ДП	24
3.1.4. Информация о параметрах комбинированного дутья, подаваемого в ДП	24
3.1.5. Информация о текущем состоянии нижней зоны ДП (горна)	25
3.2. Функциональная схема контроля и управления доменной печи	26
Контрольные вопросы к разделу 3	40
4. УПРАВЛЕНИЕ ЗАГРУЗКОЙ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА	41
4.1. Системы подачи шихтовых материалов к скипам	41
4.1.1. Системы с вагонами-весами	41
4.1.2. Системы с конвейерным транспортированием шихтовых материалов к скипам	42

4.1.3. Системы с непосредственной выдачей шихтовых материалов в весовые воронки	46
4.1.4. Системы конвейерной подачи шихтовых материалов на колошник печи	49
4.1.5. Технологические требования, предъявляемые к системам шихтоподачи	50
4.1.6. Функциональная схема контроля и управления системы автоматизации подачи шихтовых материалов к скипам	51
4.2. Управление загрузкой шихтовых материалов в доменную печь	53
4.2.1. Управление загрузкой шихтовых материалов в ДП при использовании двухконусного засыпного устройства	56
4.3. Автоматизация управления загрузкой шихты в доменную печь при использовании бесконусного загрузочного устройства лоткового типа	60
4.3.1. Достоинства БЗУ по сравнению с двухконусными аппаратами	63
4.3.2. Устройство, краткое описание бесконусного загрузочного устройства лоткового типа, порядок работы	65
4.3.3. Функциональная схема автоматического контроля и управления загрузкой ДП с использованием БЗУ лоткового типа	71
4.3.4. Программа (матрица) загрузки шихтовых материалов в доменную печь при работе БЗУ лоткового типа	78
4.3.5. Математическое моделирование процесса загрузки шихтовых материалов с использованием БЗУ лоткового типа	81
Контрольные вопросы к разделу 4	84

5. СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА.....85

5.1. Общие положения математического отражения статических и динамических характеристик технологических процессов металлургического производства	85
5.2. Определение частоты съема информационных сигналов при дискретном контроле величин технологических параметров	90
5.3. Динамические характеристики доменного процесса	93
5.4. Статические характеристики доменного процесса	105
Контрольные вопросы к разделу 5	111

6. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА КОКСА 112

6.1. Общие положения	112
----------------------------	-----

6.2. Принцип работы системы автоматической оптимизации управления подачей природного газа дискретного (шагового) действия	125
6.3. Исследование влияния параметров настройки САОУ удельным расходом природного газа на изменение величины удельного расхода кокса	137
Контрольные вопросы к разделу 7	146
7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ (АСУ ТП) ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	147
Контрольные вопросы к разделу 7	163
8. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	164
8.1. Общие сведения, состояние вопроса	164
8.2. Технологические основы экспертных систем доменной плавки	166
8.3. Общая характеристика ЭС «интеллект доменщика»	169
8.4. Обработка входной информации	173
8.5. Алгоритмы сглаживания технологической информации	175
8.5.1. Алгоритм сглаживания среднего	175
8.5.2. Алгоритм экспоненциального сглаживания	176
8.5.3. Алгоритм релейного экспоненциального сглаживания информационного сигнала	176
8.5.4. Алгоритм формирования управляющих воздействий, рекомендаций, корректировок и обучения	177
8.6. Характеристика базы знаний	178
Контрольные вопросы к разделу 8	186
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Листинг программы для поиска оптимального расхода природного газа	189
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Технические характеристики и Параметры состояния доменной плавки при составлении базы знаний экспертной системы.....	198

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии представлены результаты анализа и исследования существующих основных положений автоматизированного управления процессом выплавки чугуна в доменных печах. Рассмотрены возможности математического представления и формализации автоматического управления на основе современных технических микропроцессорных средств и синтеза систем оптимального управления параметрами доменного процесса.

Пособие предназначено для обучающихся по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах» при изучении дисциплины «Автоматизация технологических процессов и производств». Также пособие рассчитано на студентов других направлений, изучающих автоматизированные системы управления технологическими процессами и широкий круг инженерно-технических работников, специализирующихся в области автоматизации и оптимизации управления процессом выплавки чугуна, технологический персонал, интересующийся работой автоматизированных систем управления технологическим процессом.

ВВЕДЕНИЕ

Выплавка чугуна в доменных печах (ДП) до настоящего времени является самым высокопроизводительным дискретно-поточным технологическим процессом. Это самый экологически чистый и практически безотходный процесс в металлургии: выплавляемый чугун является основным продуктом для сталеплавильного производства; доменный шлак является исходным материалом для производства цемента и строительных изделий; доменный газ используется для отопления различных промышленных печей.

Особенностью доменного процесса, как объекта автоматического управления, является затруднение получения необходимой текущей информации о реальном состоянии процесса как во времени, так и по длине рабочего пространства ДП. Это объясняется достаточно высокими давлением и температурой в рабочем пространстве печи.

Поэтому автоматическое управление доменным процессом осуществляется, в основном, с использованием косвенных параметров, характеризующих технологический процесс.

Значительную трудность представляет проблема непрерывно-периодической загрузки исходных материалов в ДП, находящуюся под давлением 3 и более атмосфер. В представленной работе рассмотрены системы автоматизированного управления как устаревшей двухконусной системой, так и современной лотковой системой загрузки и распределения материалов по рабочему пространству печи.

В работе достаточно подробно рассмотрены вопросы обоснования автоматического контроля и управления основными приоритетными параметрами доменного процесса и приведено подробное описание функциональных схем контроля и управления всеми основными технологическими параметрами доменного процесса.

Уделено достаточно много внимания управлению и оптимизации управления обогащением дутья кислородом и использованию природного газа как альтернативного источника тепловой энергии, обеспечивающих снижение удельного расхода дорогостоящего дефицитного кокса и повышение производительности ДП.

Рассмотрены исходные и предварительные условия для разработки прогнозирующих экспертных систем интеллектуального управления доменным процессом. Учитывая значительную инерционность и большое запаздывание в условиях закрытости процесса, в представленной работе большое внимание уделено определению и анализу статических и динамических характеристик основных технологических параметров доменного процесса.

С учетом реальных производственных условий приведен выбор метода оптимизации управления подачей природного газа в горячее дутье с целью снижения удельного расхода кокса и дан конкретный пример реализации такой системы оптимального управления.

В работе приведены рекомендации, основанные на практическом опыте квалифицированных экспертов-технологов по оценке реального состояния определенных процессов доменной плавки по косвенным контролируемым параметрам с целью принятия обоснованного решения по устранению возможных нарушений стабильного режима работы ДП.

1. УСТРОЙСТВО ДОМЕННОЙ ПЕЧИ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

1.1. Краткая историческая справка

Цель доменного процесса состоит в получении чугуна (сплава железа с углеродом) путем восстановления из железной руды (окислов железа Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4) в доменных печах.

Исходными материалами доменной плавки являются: твердое топливо (кокс); железная руда; агломерат; окатыши; флюсовые добавки.

Чугун был известен до 4 века до н.э. в результате развития сыродувного процесса – «прямого» получения кричного железа в твердом состоянии непосредственно из железной руды путем восстановления в низких горнах или шахтных печах (домницах) с использованием древесного угля.

Первые домницы, шахтного типа доменные печи, в Европе появились с середины 14 века, а в России – около 1630 г. вблизи г. Тулы и г. Каширы.

На Урале первый чугун получен в 1701 г., а в середине 18 века за счет интенсивного развития уральской металлургии Россия вышла на первое место в мире, которое сохраняла до начала 19 века, используя в качестве топлива древесный уголь.

В 1735 г. А. Дерби использовал в доменной плавке каменноугольный кокс.

В 1829 г. Дж. Нилсон предложил нагрев дутья, а в 1875 г. Э. Каупер изобрел воздухонагреватель регенеративного типа.

Доменные печи до сих пор остаются основными практически безотходными поточными высокоэффективными и высокопроизводительными металлургическими агрегатами.

1.2. Конструкция и элементы доменной печи

Современная доменная печь представляет собой вертикальную шахтную печь, имеющую специальный профиль рабочего пространства.

Конструкция (а) и профиль (б) рабочего пространства доменной печи с засыпным аппаратом лоткового типа представлена на рис. 1. Рабочее пространство доменной печи разделено на зоны.

Колошник – верхняя часть печи, куда загружаются и где распределяются по сечению исходные материалы доменной плавки.

Шахта – основная вертикальная часть рабочего пространства, где происходят основные процессы восстановления железа, нагрева шихтовых материалов, испарение влаги и разложение карбонатов (флюсов). Для обеспечения компенсации теплового расширения шихтовых материалов диаметр шахты расширяется сверху вниз.

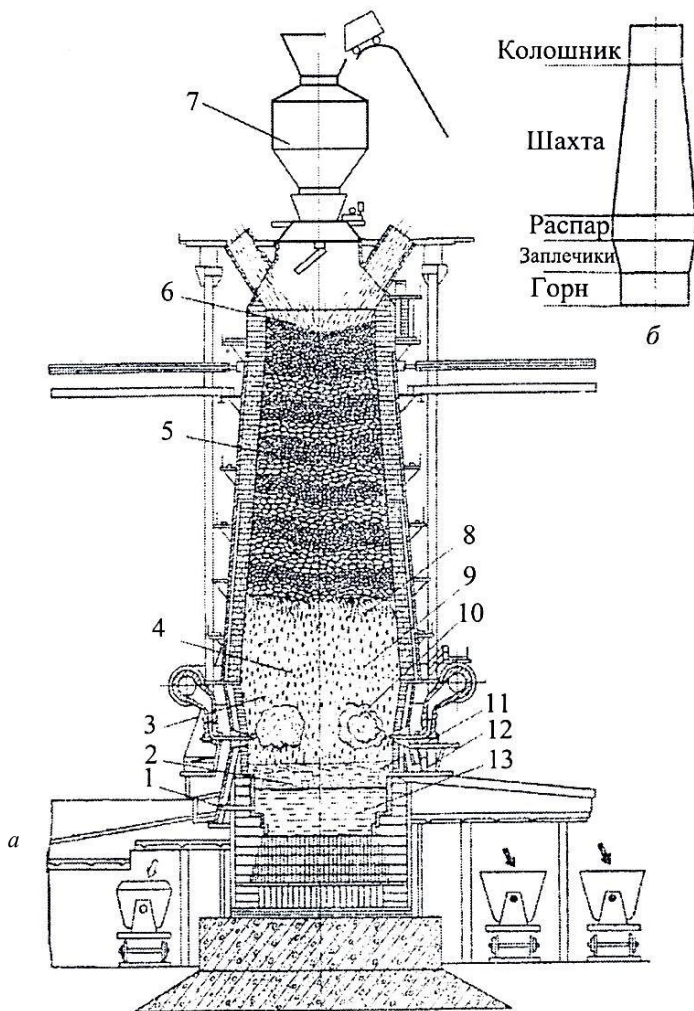


Рис. 1. Конструкция ДП с лотковой системой подачи материалов в разрезе (а) и в профиль (б): 1 – чугу́нная летка; 2 – горн; 3 – заплечики; 4 – распар; 5 – шахта; 6 – колошник; 7 – засыпной аппарат; 8 – горизонт образования чугуна; 9 – горизонт образования шлака; 10 – зона горения кокса; 11 – слой шлака; 12 – шлаковая летка; 13 – расплавленный чугун

Распар – в этой части шихтовые материалы размягчаются, и начинается процесс их плавления.

Заплевички – в этой части рабочего пространства вследствие высокой температуры происходит практически окончание процесса плавления шихтовых материалов с образованием чугуна и шлака. Поскольку при плавлении материалов происходит уменьшение объема расплава, то сечение профиля рабочего пространства доменной печи уменьшается.

Горн – это важная технологическая часть рабочего пространства доменной печи (ДП). В этой самой нижней части скапливаются жидкие продукты доменной плавки (чугун и шлак). В верхней части горна (фурменной зоне) в результате горения кокса (топлива) образуются восстановительные газы. Внизу горна имеются специальные отверстия – летки (для периодического выпуска жидких продуктов доменной плавки).

Высокопроизводительные доменные печи имеют объемы рабочего пространства от 3000 до 5000 м³. Воздух подогревается до 1100÷1250 °С и подается в печь через 14-36 фурм в верхнюю часть горна.

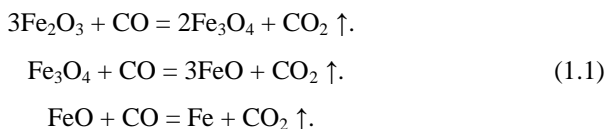
Доменные печи работают непрерывно в течение 5÷10 лет. При выплавке 1 т передельного чугуна в среднем расходуется до 1,8 т офлюсованного агломерата, 550 кг кокса.

1.3. Технологические особенности доменной плавки

Через фурмы подается под давлением (0,4 МПа) нагретое дутье, обогащенное кислородом и увлажненное за счет подачи пара.

В современных доменных печах используется комбинированное дутье, включающее подачу природного газа.

За счет кислорода дутья в окислительной зоне вблизи фурм происходит горение кокса с образованием монооксида углерода, при движении которого вверх происходит восстановление железа из его оксидов по схеме:



Аналогично по такой же схеме (только с образованием железа и водяного пара) происходит восстановление железа водородом, являющимся продуктом диссоциации влаги шахты или водяного пара, используемого для увлажнения дутья.

Восстановление железа за счет СО и Н₂ называется косвенным.

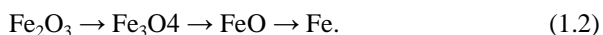
Кокс поступает в горн нагретым до 1400÷1500 °С. Образующийся в зоне горения диоксид углерода СО₂ при высокой температуре и избытке углерода неустойчив и превращается в оксид углерода СО.

За пределами зон горения горновой газ в основном состоит из оксида углерода, азота и небольшого количества водорода.

Смесь этих газов, нагретая до 1800÷2000 °С, поднимается вверх, передавая тепло шихтовым материалам, опускающимся в горн вследствие выгорания кокса и образования жидких чугуна и шлака.

В процессе нагревания опускающихся шахтовых материалов происходит удаление из них влаги, летучих веществ кокса, разложение карбонатов CaCO₃.

Оксиды железа под действием восстановительных газов, как было показано, постепенно переходят от высших степеней окисления к низшим, а затем в металлическое железо по схеме



Восстановленное железо науглероживается еще в твердом состоянии и по мере увеличения содержания углерода в железе температура плавления понижается.

Науглерожненное железо, содержащее около 4 % углерода, некоторое количество кремния, марганца и фосфора плавится при температуре 1210÷1350 °С и стекает в виде капель чугуна в горн.

Образование жидкого шлака из составных частей шлаковых добавок, пустой породы шихтовых материалов происходит в нижней половине шахты печи. Снижению температуры плавления шлака способствуют не до конца восстановленные оксиды железа и марганца. В стекающем вниз шлаке при повышении его температуры расплавляются пустая порода, флюсы и зола, получающаяся при сгорании кокса.

При взаимодействии жидких продуктов плавки с раскаленным коксом в заплечиках и верхней части горна происходит восстановление кремния, марганца и фосфора из их оксидов, растворенных в шлаке. Здесь же поглощенная металлом в ходе плавки сера переходит в шлак.

Железо и фосфор практически полностью восстановленные переходят в чугун. Степень восстановления кремния и марганца и полнота удаления серы в значительной мере зависят от температурных условий, химического состава шлака (его основности) и количества шлака.

Благодаря различию удельных весов чугуна и шлака они разделяются в горне. По мере их накопления они периодически выпускаются из печи соответственно через шлаковые летки (верхний шлак) и чугунную летку во время выпуска чугуна (нижний шлак).

Очевидно, что все технологические процессы происходят в доменной печи одновременно, оказывая взаимное влияние друг на друга.

Высокопроизводительная работа доменной печи зависит от распределения газового восстановительного потока по сечению и высоте шахты.

Проходя путь 25÷40 м в течение нескольких секунд газовый поток должен выполнить тепловую и восстановительную функции, обеспечивая

ровный сход шихтовых материалов, поскольку до 50÷60 % веса столба шихты уравнивается динамическим напором газового потока.

Движение газового потока и распределение его по сечению шахты определяется множеством факторов, важнейшими из которых являются:

- гранулометрический состав шахтовых материалов;
- распределение шахтовых материалов на колошнике во время их загрузки в доменную печь;
- перераспределение материалов по мере их движения в шахте доменной печи.

Кроме косвенного, в рабочем пространстве доменной печи происходит при высоких температурах и прямое восстановление железа за счет углерода кокса с образованием железа и оксида углерода по схеме



Прямое восстановление осуществляется с поглощением тепла. Область прямого восстановления в рабочем пространстве ДП расположена от внешней границы окислительных околофурменных зон до горизонта с температурой 900÷950 °С.

В доменной печи шихтовые материалы опускаются в основном под действием своей массы в пространство, освобождающееся в результате уменьшения объема шихты при горении кокса в фурменных очагах, расхода углерода кокса на прямое восстановление, образования жидких продуктов чугуна и шлака и уплотнении шихты при движении за счет температурного размягчения материалов.

Так, 44÷52 % общего уменьшения объема шихты приходится за счет горения углерода кокса, 11÷16 % – за счет прямого восстановления; 25÷35 % за счет плавления материалов и образования жидких чугуна и шлака и 5÷15 % за счет уплотнения шахтовых материалов при их размягчении под действием высокой температуры.

Очевидно, что уменьшение объема шихты происходит в основном в фурменных зонах. Эти зоны можно характеризовать как своеобразные воронки, через которые движется основная масса шихты.

Периферийное расположение зон горения определяет преимущественное движение шихты на колошнике со скоростью 90÷140 мм/мин, в то время как скорость движения в центре печи составляет 70÷120 мм/мин. Продолжительность пребывания шихты в печи составляет от 5 до 7 ч.

Повышение скорости схода шихты на периферии колошника определяется и расширением профиля шахты печи и более интенсивным по сравнению с коксом движением железорудных компонентов, располагающихся в большем количестве на периферии (у стен).

В результате неодинаковой скорости перемещения шихтовых материалов по высоте шахты одновременно загруженные на колошнике материалы приходят в горн не одновременно. Это явление называется «опережением», которое необходимо учитывать при изменении условий работы печи, особенно при переходе на выплавку другой марки чугуна и изменении состава шихтовых материалов. Для экономичной работы каждой ДП необходимо индивидуальное сочетание процессов прямого и косвенного восстановления. Это сочетание определяется температурным распределением по высоте шахты печи.

Контрольные вопросы к разделу 1

1. Почему профиль ДП имеет форму, представленную на рис. 1?
2. Запишите и дайте пояснения к химическим реакциям прямого и косвенного восстановления.
3. Почему выпуск чугуна и шлака осуществляется периодически?

2. ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

Доменная печь как объект управления характеризуется специфическими особенностями:

- доменная печь работает непрерывно под большим давлением в течение многих лет и в ней реализуется практически закрытый процесс;
- в доменную печь практически непрерывно (с дискретностью 5÷8 мин) загружаются исходные шихтовые материалы, а снизу подается горячее дутье (температурой до 1200 °С), и периодически (с дискретностью 1,0÷1,5 ч) выпускается чугун и шлак;
- за счет противотока шихты и восстановительных газов тепловой коэффициент полезного действия составляет до 80÷90 % при условии обеспечения необходимого контакта газов и шихтовыми материалами;
- топливом в ДП используется кокс, как дорогостоящий источник тепла, так и как химический реагент-восстановитель, поэтому доменный газ содержит значительное количество оксида углерода, используемого для косвенного восстановления железа.

Сложность автоматического управления процессом доменной плавки заключается в том, что технологический процесс восстановления осуществляется во всем рабочем пространстве ДП, а управляющие воздействия возможно реализовать только на границах рабочего пространства.

Принципиальная схема формирования управляющих воздействий на доменный процесс представлена на рис. 2.

Управление «сверху» позволяет решать стратегические (долгосрочные) задачи по изменению параметров технологического процесса в ДП и характеризуется наличием запаздывания и большой инерционностью (6÷8 ч).

Управление «снизу» позволяет решать тактические (срочные) задачи и характеризуется более высокой оперативностью.

Выбор необходимого текущего режима и вида управления или их комбинации, учитывая закрытость доменного процесса, – сложная задача, которая должна решаться при автоматизации управления процессом выплавки чугуна в ДП.

Доменная печь и технологический процесс выплавки чугуна представляют собой объекты автоматизации, характеризующиеся значительной аккумулирующей способностью, существенной распределенностью во времени и пространстве технологических параметров и огромными величинами инерционности и запаздывания.

Основной, главной и приоритетной задачей при автоматизации и оптимизации управления процессом выплавки чугуна в ДП является определение и стабилизация технологических параметров, при которых

обеспечивается стабильность хода печи и достигается максимальная производительность при выплавке чугуна заданной марки.

Основными возмущающими воздействиями, нарушающими стабильность хода ДП, являются: изменение параметров загружаемых шихтовых материалов гранулометрического состава; физико-химико-минералогического состава. Это приводит к изменению распределения газового потока в рабочем пространстве по сечению печи, теплового состояния печи, соотношения распределения степеней прямого и косвенного восстановления.

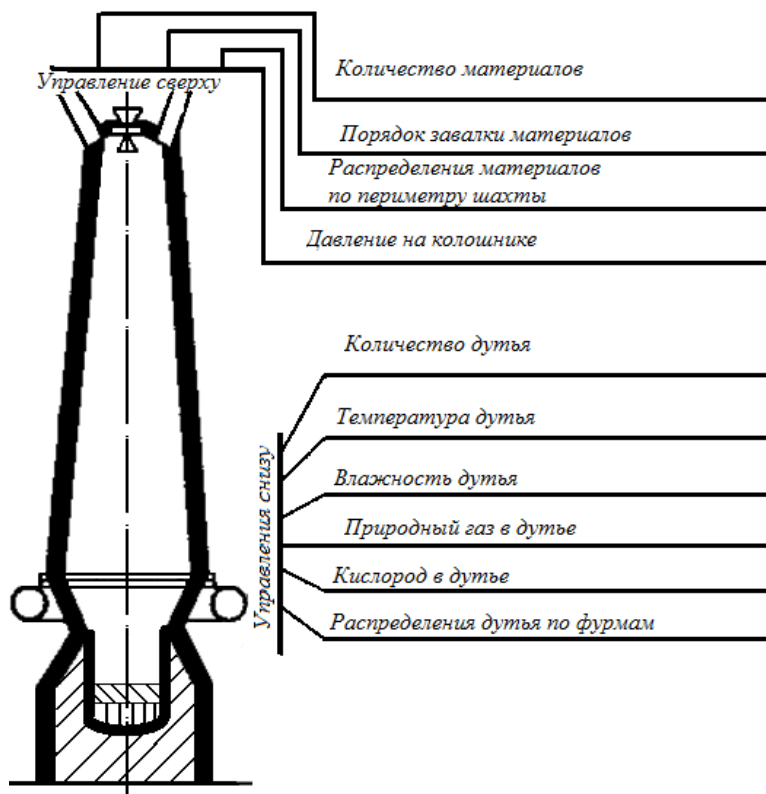


Рис. 2. Схема формирования входных управляющих воздействий на доменный процесс

К основным управляющим воздействиям (см. рис. 2) относятся:
– параметры режима загрузки «управление сверху»: рудная нагрузка (отношение массы агломерата и руды к массе кокса) загружаемых в печь

материалов шихты; последовательность подачи шихтовых материалов; распределение загружаемых материалов по сечению колошника;

– режим дутья «управление снизу»: расход дутья; температура дутья; влажность дутья; расход кислорода в дутьё; расход природного газа в дутьё.

Выходными параметрами процесса выплавки чугуна в ДП являются:

- производительность ДП;
- экономическая эффективность доменного процесса.

Производительность ДП оценивается по фактическому показателю выплавки чугуна (т/сут). Экономическая эффективность – по удельному расходу кокса на тонну выплавляемого чугуна (кг/т).

Выходными параметрами процесса выплавки чугуна, характеризующими тепловое состояние ДП, являются: температура чугуна на выпуске; температура шлака на выпуске; содержание кремния и серы в чугуне; температура и состав колошничного доменного газа.

Учитывая значительную инерционность доменного процесса и наличие существенного запаздывания, формирование управляющих воздействий при возникновении возмущающих факторов можно классифицировать на два вида.

Компенсацию входных возмущающих воздействий путем формирования упреждающего влияния на доменный процесс называют «управлением по возмущению».

Если в результате возмущающих воздействий технологический процесс доменной плавки отклонится от установившегося режима, что привело к изменению и отклонению параметров процесса, то формирование управляющих воздействий для компенсации отклонений называют «управление по отклонению».

Очевидно, что более оперативным является «управление по возмущению». Для реализации этого управления необходимо учитывать не только изменение величин текущего значения стабилизируемого параметра процесса, но и текущую скорость изменения значения этого параметра или первую производную изменения параметра во времени.

2.1. Основные положения оптимизации управления процессом доменной плавки

Определение и поддержание наилучшего технологически обоснованного сочетания внешних и внутренних условий протекания доменного процесса для достижения максимально возможной количественно выраженной цели называется оптимизацией.

Основным условием эффективной оптимизации является наличие одной чётко выраженной математически сформулированной цели (критерия оптимизации).

Нельзя, например, обеспечить максимальную производительность ДП при минимальном расходе кокса, поскольку каждая из поставленных

целей достигается при определенном сочетании значений технологических параметров процесса.

Компромиссным решением проблемы может быть достижение поставленной одной цели при условии наложения ограничений на некоторые параметры процесса:

- достижение максимальной производительности ДП при условии расхода кокса не выше заданного порогового значения;
- получение минимального расхода кокса при обеспечении заданной производительности ДП.

Необходимым и обязательным условием реализации эффективной оптимизации является наличие унимодального (одноэкстремального) вида статической характеристики оптимизируемого процесса в координатах «оптимизируемый параметр – управляющее воздействие».

Количественно формализованное выражение цели оптимизации называется критерием оптимизации.

При синтезе системы автоматической оптимизации управления доменной печи (в принципе любым) технологическим процессом необходимо соблюдение следующих условий:

- обоснованный выбор критерия (цели) оптимизации;
- наличие степеней свободы, т.е. технологических ресурсов управляющих воздействий;
- наличие экстремального (унимодального) вида статической характеристики оптимизируемого процесса в координатах «оптимизируемый параметр – управляющее воздействие»;
- количественное формализованное отражение (математическая модель) поискового процесса оптимизации управления.

Обоснованный выбор критерия оптимизации и формализованное представление модели определения стационарного экстремального значения количественной оценки критерия называется статической оптимизацией.

Переход от одного стационарного (статического) режима технологического процесса к другому сопровождается изменением во времени параметров процесса. Обеспечение наилучшей траектории переходного процесса для определения и поддержания экстремального значения количественной оценки выбранного критерия (целевой функции) оптимизируемого процесса называется динамической оптимизацией.

Динамическая оптимизация по сравнению со статической оптимизацией является более сложной проблемой, требующей для своей реализации использования дифференциальных уравнений, в которых учитываются не только численные, но и скоростные характеристики параметров оптимизируемого процесса.

Целевой функцией (критерием) оптимизации могут быть различные приоритетные технологические параметры доменного процесса:

производительности ДП; равномерность схода шихты; удельный расход кокса и другие параметры.

Более универсальными, применимыми для любого производственного процесса являются экономические критерии: минимизация себестоимости готового продукта (чугуна); максимальная прибыль; минимизация капитальных затрат на выполнение мероприятий по совершенствованию доменного процесса и др.

В условиях реального производства следует учитывать ограничения, накладываемые на технологические, производственные и экономические выбранные критерии оптимизации.

Ограничения могут иметь как технический, так и социально-экономический характер, например, могут быть определены условиями охраны окружающей среды или наличием трудовых ресурсов и т.д.

2.2. Методы синтеза математических моделей доменного производства

Эффективное управление процессом выплавки чугуна в ДП возможно только при наличии достоверного (адекватного) формализованного представления характера взаимосвязей и взаимовлияния параметров процесса в виде математической модели.

В настоящее время существуют различные типы математических моделей:

- детерминированные, представляющие балансовые уравнения, основанные на фундаментальных законах;
- экспериментально-статистические, основанные на использовании теории вероятности и математической статистики, для обработки экспериментального материала;
- основанные на использовании искусственных нейронных сетей (нейросетевые модели), являющие по сути адаптивными моделями экспериментально-статистического типа;
- основанные на принципах нечеткой логики и теории нечетких множеств, основанные на принципах формализации эмпирических правил управления в виде лингвистической формы выражения.

Детерминированные (балансовые) модели характеризуются универсальностью, но они недостаточно адекватно отражают индивидуальные характеристики реального процесса. Экспериментально-статистические модели доменного процесса специализированы, отражают индивидуальные особенности данного процесса, но они лишены универсальности, адекватны только текущим условиям при сборе экспериментальных данных и не учитывают изменение параметров и условий доменного процесса по мере старения ДП в течение компании.

Нейросетевые модели, являясь по сути экспериментально-статистическими, обладают уникальным свойством адаптации к реальным условиям и изменениям параметров доменного процесса, но они существуют только в виде компьютерных программ, содержащих величины наборов коэффициентов (синоптических весов), отражающих количественную связь между нейронами искусственной нейронной сети выбранной архитектуры. Нейросетевые модели не имеют формализованного математического отражения взаимосвязей между параметрами доменного процесса, обладают способностью обобщения и достаточно высокой точностью определения значений текущего выходного выбранного приоритетного параметра процесса.

Модели, основанные на принципах нечеткой логики и нечетких множеств, основанные на использовании набора лингвистических правил вида: «Если ... (событие), тогда ... (результат)», являются фундаментальными и универсальными лингвистическими аппроксиматорами лучших эмпирических правил оценки реального состояния доменного процесса и правил управления этим процессом с целью достижения поставленной цели.

Принципы нечеткой логики [6, 7] созданы для того, чтобы позволить управляющим компьютерным программам функционировать в диапазоне различных степеней истинности.

Вместо двоичных систем, отражающих истинные и ложные реальные события (0, 1), были введены степени истинности, которые действуют в диапазоне от 0,0 до 1,0, включительно.

Нечеткое управление оказывается особенно полезным, когда технологические управляемые процессы являются слишком сложными для анализа с использованием общепринятых количественных методов или когда доступные источники информации о текущем состоянии процесса интерпретируются атрибутивно, качественно, неточно или неопределенно.

Нечеткая логика, на принципах которой основано нечеткое управление технологическим процессом, по сути ближе к человеческому экспертному мнению и лингвистическому принципу отражения автоматического управления.

Наличие формализованного (математического) определения средств отражения нечеткой исходной информации позволяет создавать математические модели, адекватные реальным процессам.

Системы автоматического управления, основанные на принципе нечеткой логики, обладают явными преимуществами и достоинствами перед традиционными способами автоматизированного управления за счет замены, как правило, существенно упрощенной математической количественной модели управляемого технологического процесса многосторонней качественной лингвистической (словесной) логической модели, составленной из определенных логических правил.

Очевидно, что наибольшей адекватностью и общностью (универсальностью) и возможностями точного прогноза текущего состояния доменного процесса обладают аналитические описания явлений, основанные на физических и энергетических закономерностях их протекания.

Сложность и многофакторность доменного процесса, недостаточная его изученность не позволяют целиком опираться на такие описания.

Аналитическое (точное) решение часто связано и сопряжено с практически непреодолимыми проблемами даже в простейших случаях, когда используется только балансовое соотношение.

Поэтому в инженерной практике для математического описания технологических процессов используются приближенные (численные) методы.

Следует отметить, что для решения систем конечных нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, используемых для распределенных процессов, характерных для доменного производства, общих численных методов до сих пор еще нет. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо находить и использовать частный метод решения. При этом следует помнить следующее: слишком большая декомпозиция отдельных явлений доменного процесса при синтезе математической модели приводит к неоправданному усложнению модели, которое сделает невозможным ее практическую реализацию. Чрезмерное упрощение модели может сделать ее неадекватной реальному процессу.

Контрольные вопросы к разделу 2

1. В чем заключается сложность автоматического управления процессом в ДП?
2. Назовите основные параметры управления «сверху» и «снизу» ДП, а также выходные управляемые параметры доменного процесса.
3. Перечислите виды математических моделей и способы их реализации.

3. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Информационное обеспечение, формируемое контрольно-измерительными техническими средствами, позволяет получить доступную для контроля информацию о текущих параметрах доменного процесса, о тепловом состоянии печи и вспомогательного оборудования. Важной задачей является обеспечение безопасных условий работы людей и нормальной работы всех агрегатов, составляющих технологический комплекс доменного производства.

3.1. Принципиальная схема контроля основных параметров доменного процесса

Технологически можно выделить несколько структурно независимых направлений автоматического контроля за параметрами доменного процесса.

Принципиальная структурная схема контроля основных приоритетных параметров доменного процесса представлен на рис. 3 [3, 4].

Схема включает в себя информацию о химическом составе элементов рудно-флюсовой нагрузки с датчиков – 1, о химическом составе и качестве кокса с датчика – 2.

Такая информация формируется периодически (один раз в смену или в сутки). Она используется для коррекции при расчете шихты доменной плавки. Для ускорения анализа используются спектральные квантометры или рентгеновские спектрометры.

3.1.1. Загрузка шихтовых материалов в ДП

В этот информационный блок входит:

- информация о рудной и коксовой подачах – 3, 4;
- информация о числе подач – 5;
- информация о порядке загрузки материалов – 6;
- информации о работе конусов – 7;
- информация об уровне засыпи с датчиков;
- данные о положении вращающего распределителя шихты (ВРШ) – с датчика – 9;
- данные о распределении материалов на колошнике доменной печи – 10.

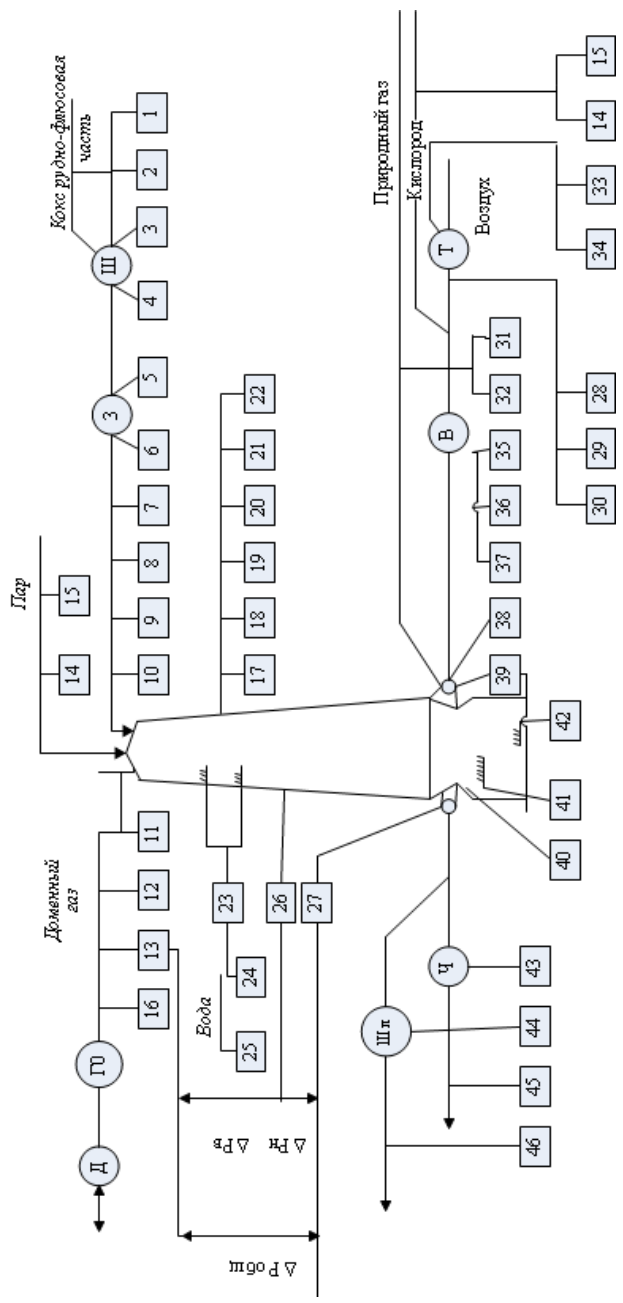


Рис. 3. Структурная схема контроля приоритетных основных параметров доменного процесса:
 Д – доменный газ; ГО – газоочистка; З – система загрузки; Ш – шихтовые материалы;
 Т – турбовоздуходувка; В – воздуходогреватель; Ч – чугун; Шл – шлак

3.1.2. Информация о текущем состоянии верхней зоны печи (колошника)

Здесь используются информационные сигналы:

11 – о давлении колошникового (доменного) газа; 12 – о температуре доменного газа в каждом газоотводе; 13 – о давлении газа в каждом газоотводе; 14 – о расходе пара подаваемого в засыпной аппарат; 15 – о давлении пара; 16 – о давлении газа в межконусном пространстве; 17 – о температуре по окружности колошника; 18 – о температуре по диаметру колошника, формируемой специальными зондами в определенных позициях зонда; 19, 20, 21 – информация о содержании CO, CO₂, H₂ в доменном газе; 22 – о распределении содержания указанных газов по диаметру колошника при вводе информационного зонда в печь. Информация о распределении температуры и о составе колошникового газа по диаметру формируется периодически.

3.1.3. Информация о текущем состоянии доменного процесса по высоте шахты ДП

Оценка текущего состояния доменного процесса по высоте шахты ДП производят по информации, формируемой с помощью технических средств:

23 – по показаниям термопар, установленных в кладке ДП по окружности на разных горизонтах; 24 – о расходе и 25 – температуре воды, охлаждающей шахтные холодильники; 26 – о давлении в рабочем пространстве ДП в средней части шахты с использованием отбора, представленного на рис. 4;

22, 13 – измеряются частные перепады давления по высоте шахты доменной печи:

– P_n – нижний перепад между кольцевым воздухопроводом и давлением в средней части шахты;

– P_v – верхний перепад между давлением на колошнике и в средней части шахты (13 – 26);

– $P_{общ}$ – общий перепад давления между кольцевым воздухопроводом и колошником (27 – 13).

Величины частных перепадов определяют величины гидравлического сопротивления шихты газовому потоку на различных горизонтах по высоте шахты.

3.1.4. Информация о параметрах комбинированного дутья, подаваемого в ДП

Информация о текущих параметрах комбинированного дутья формируется датчиками:

28 – о количестве и расходе холодного дутья; 29 – о давлении; 30 – о температуре холодного дутья; 31 – о расходе; 32 – о давлении природного газа, подаваемого в дутье; 33 – о расходе; 34 – о давлении кислорода, используемого в дутье; 35 – о содержании кислорода в обогащенном дутье; 36 – о влажности горячего дутья; 37 – о температуре горячего дутья; 38 – о распределении горячего дутья по фурмам; 39 – о распределении природного газа по фурмам при индивидуальном подводе природного газа.

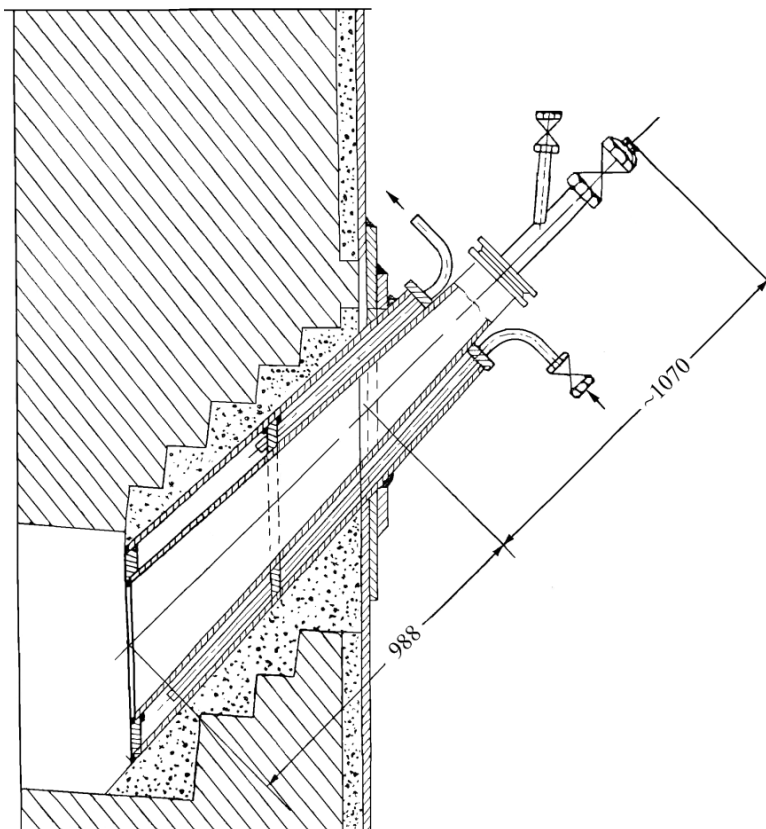


Рис. 4. Устройство для отбора импульса давления в средней части шахты ДП по высоте для формирования частных перепадов

3.1.5. Информация о текущем состоянии нижней зоны ДП (горна)

Информация о состоянии горна ДП формируется с использованием технических средств, измеряющих следующие параметры:

40 – температуру фурменной зоны; 41 – температуру лещади по периметру; 42 – температуру фундамента ДП; 43 – температуру чугуна на выпуске; 44 – температуру шлака при выпуске; 45 – содержание кремния и серы в чугуне; 46 – основность шлака.

Информация о параметрах шлака и чугуна формируется периодически (при выпусках).

Система автоматического контроля и управления основных параметров доменного процесса представляет собой сложный комплекс датчиков, нормирующих преобразователей, регулирующего микропроцессорного контроллера, усилителей и исполнительных устройств, объединенных в систему централизованного контроля и управления (СЦКУ).

Вся текущая информация о состоянии доменного процесса отображается на экране монитора рабочего места технолога-оператора.

3.2. Функциональная схема контроля и управления доменной печи

Функциональная схема автоматического контроля, сигнализации и управления процессом выплавки чугуна в доменной печи представлена на рис. 5.

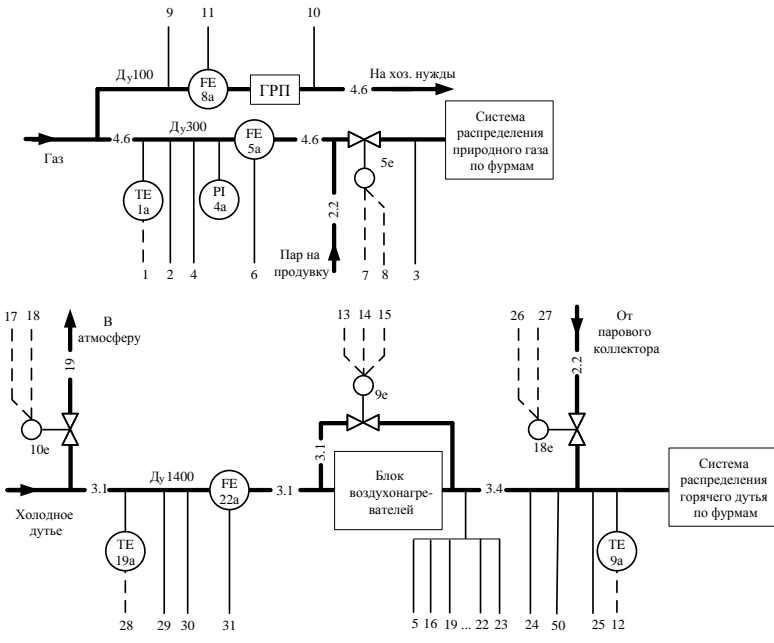
Схемой автоматического контроля, управления и сигнализации предусматривается следующее:

1 – Контролируется температура природного газа. Измерение производится с использованием термоэлектрического преобразования ТХА и после нормирующего преобразования в унифицированной форме – 20 мА поступает в регулирующий микропроцессорный контроллер (РМК) для осуществления поправки хозрасчетного расходомера по температуре природного газа.

2 – Контролируется давление природного газа путем измерения с использованием датчика избыточного давления Метран-22 ДИ. Сигнал с датчика давления нормируется и подается на вход РМК для осуществления коррекции расхода природного газа по давлению.

3 – Контролируется давление природного газа перед подачей его в доменную печь. Измерение осуществляется датчиком Метран-22 ДИ, предусмотрена аварийная сигнализация при падении давления природного газа ниже заданного предела.

4, 5 – Предусмотрен контроль перепада давлений между давлением природного газа и давлением горячего дутья, для исключения попадания горячего дутья в газопровод и предотвращения аварийной ситуации. Измерение осуществляется с использованием датчика разности давлений Метран-100-ДД. Схемой предусмотрено наличие аварийной сигнализации при уменьшении перепада давлений ниже допустимого предела.



	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	50 °C	0.7 МПа	0.7 МПа	0.1 МПа	25000 кг/ч	0 - 100 %			0.5 МПа	выше 0.15 МПа ниже 0.03 МПа	2500 м³/ч	1250 °C		0 - 100 %		0.3 МПа		0 - 100 %	
Приборы по месту	PI 2a	PIA 3a	PD1 4a	FT 5a					PI 6a	PIA 7a	FT 8a					PI 10a			
Щит преобразователей								Y 5a							Y 9a			Y 10a	
Щит КИП и А	PIR 2b HL 2	PIR 3b HL 3	PIR 4b ZH 5r HS 5b	BI 4b HS 4b SA 4b	BI 5b HS 5b SA 5b	K1 HL 3 HL 4						PIR 9b HL 5	BI 9b HS 9b SA 9b			PIR 10b BI 10b HS 10b SA 10b		K3	
PMK	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}	0 _{B1}
Параметр	Температура	Давление	Перепад давлений	Расход				Давление	Расход	Температура				Давление					
	Природный газ				Природный газ на хозяй. нужды				Горячее дутьё										

Рис. 5. Функциональная схема контроля и управления ДП (начало)

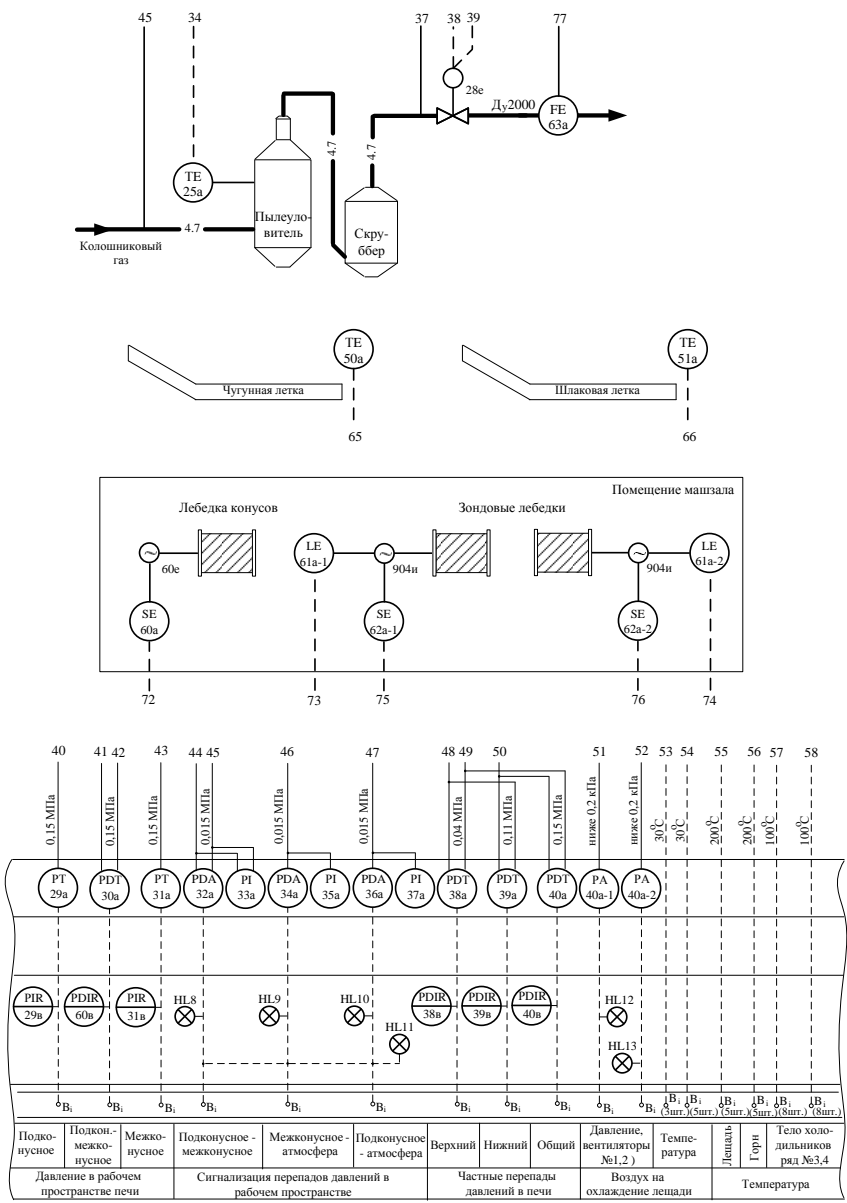
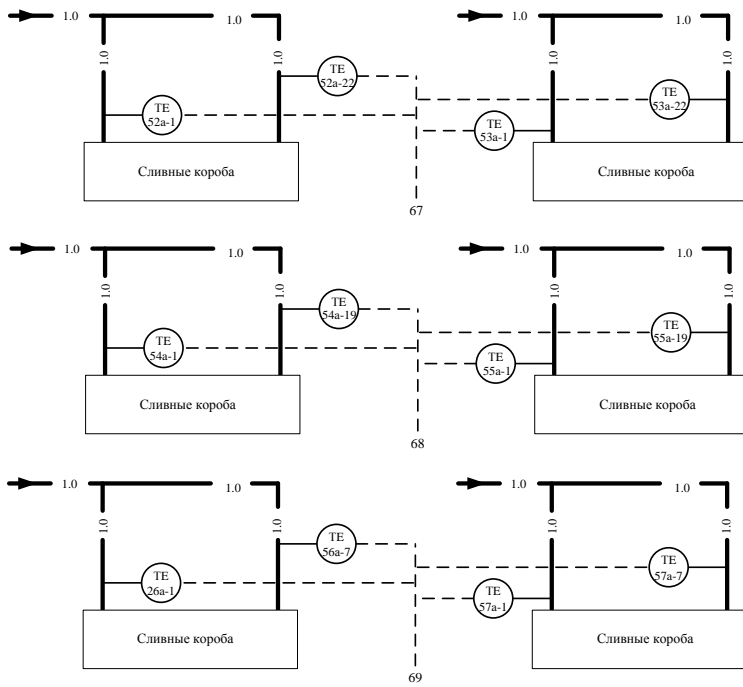


Рис. 5. Функциональная схема контроля и управления ДП (продолжение)



59	60	61	62	...	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
ниже 200°C	200°C	ниже 200 Па	ниже 200 Па	ниже 200 Па	ниже 200 Па	ниже 1450°C	1450°C	3°C	3°C	3°C									
PA 48a-1	PA 48a-2	PA 49a-1	PA 49a-2			TY 506	TY 516												FI 636
	HL14		HL16									GHR 58a	GIR 59a	GIR 60a	LIR 61a-1	LIR 61a-2	SIR 62a-1	SIR 62a-2	FIR 63a
	HL15		HL17																
↓B _i (17шт.)	↓B _i (7шт.)	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i (44шт.)	↓B _i (38шт.)	↓B _i (14шт.)	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i	↓B _i РМК
Разгар горна	Прогар фурм и клапанов горячего дутья		Температура чугуна и шлака		Леточные холодильники		Горновые холодильники		Работа ВРН	Работа конусов		Запад Восток Уровень засыпи		Запад Восток Скорость схода шихты		Выход коллоидного газа			
Температура							Температура отходящей воды						Система загрузки						

Рис. 5. Функциональная схема контроля и управления ДП (окончание)

6-8 – Измеряется и регулируется расход природного газа на ДП. Измерение осуществляется с использованием диафрагмы ДБС и дифманометра Метран-100-ДД. Управление расходом природного газа осуществляет РМК по схеме ПИ-регулирования с использованием бесконтактного реверсивного пускателя ПБР-2М и исполнительного механизма МЭО-100/69-0,25. Схемой предусмотрено два режима управления «РУЧ» и «АВТ» и контроль положения регулирующего клапана в диапазоне 0÷100% хода путем использования блока ручного управления БРУ.

9 – Измеряется давление природного газа с использованием Метран-22-ДИ в общецеховом коллекторе. После нормирования сигнал подается на вход устройства связи с объектом (УСО) регулирующего контроллера (РМК).

10 – Измеряется давление природного газа после газораспределительного пункта (ГРП). С использованием датчика Метран-22-ДИ схемой предусматривается автоматическая аварийная сигнализация при падении и при повышении давления природного газа в общецеховом магистральном газопроводе.

11 – Измеряется расход природного газа на хозяйственные нужды. Измерение осуществляется диафрагмой и дифманометром Метран-100-ДД. Информационный сигнал подается на вход РМК для расчета экономических показателей работы печи.

12-14 – Измеряется и регулируется температура горячего дутья на печь. Измерение температуры осуществляется термопарой ТПП, установленной на воздухопроводе горячего дутья рядом с кольцевым воздухопроводом. Регулирование осуществляется разбавлением горячего дутья холодным, путем изменения расхода холодного дутья на обводном воздухопроводе блока воздухонагревателей (байпасе).

Схемой предусмотрена (13) сигнализация о полном закрытии регулирующего клапана холодного дутья на обводном воздухопроводе (сигнал на необходимость изменения режима работы воздухонагревателя с дутья на нагрев).

Предусмотрено два режима работы контура управления температурой горячего дутья «ДИСТ» – управляет технолог-оператор; «АВТ» – управляет РМК. Выбор режима управления осуществляет технолог-оператор с использованием блока ручного управления БРУ. Схемой предусмотрен контроль текущего положения регулирующего клапана на обводном воздухопроводе холодного дутья. Управление осуществляется с использованием ПБР-2М исполнительным механизмом постоянной скорости МЭО-1000/69-0,63.

16-18 – Измеряется и регулируется давление горячего дутья на печь. Регулирование давления горячего дутья осуществляется сбросом части холодного дутья в атмосферу, чтобы не тратить тепловую энергию, аккумулированную воздухонагревателями на нагрев лишнего дутья. Из-

мерение осуществляется датчиком Метран-22-ДИ, сигнал с которого нормируется и подается в РМК, который в соответствии с текущим заданным значением величины давления управляет положением регулирующего клапана на магистрали сброса дутья в атмосферу.

Данный контур работает только при необходимости восстановления нормального режима схода шихты. А в основном ДП работает на максимально допустимом давлении горячего дутья для обеспечения максимального его расхода. Схемой предусмотрено два режима работы «ДИСТ» (дистанционный - ручной) и «АВТ» (автоматический).

17 – Контролируется положение регулирующего клапана.

19-22 – Измеряется давление горячего дутья на каждом воздухонагревателе для реализации безопасной работы системы автоматического перевода воздухонагревателей с режима нагрева в режим дутья и наоборот. Данные параметры используются в качестве технологических блокировок в электрической схеме управления «перекидкой клапанов».

23 – Измеряется давление горячего дутья прибором Метран-22-ДИ для использования данного параметра в системе аварийной сигнализации и в качестве информационного сигнала в схеме электробезопасности для обеспечения безопасных условий работы ДП.

24 – Контролируется содержание кислорода в дутье ДП. Измерение осуществляется газоанализатором магнитного, а чаще электрохимического принципа действия с использованием эффекта электронной проводимости на границе твердых электролитов типа Al_2O_3 или ZrO_2 .

Информация о содержании кислорода в дутье поступает в РМК для выполнения технологических расчетов и решения технологических задач в системе АСУ ТП.

25-27 – контролируется и регулируется влажность горячего дутья путем подачи пара в воздухопровод холодного дутья для интенсификации нагрева воздуха за счет теплообмена излучением (наличие трехатомного газа H_2O).

Сезонные колебания влажности атмосферного воздуха составляют от $0,1 \div 2,5$ г/м³ зимой до $20 \div 30$ г/м³ летом. Такое изменение влажности горячего дутья оказывает влияние на тепловое состояние ДП, поскольку изменение влажности на 1 г/м³ вызывает изменение температуры фурменной зоны на 9 °С.

Влажность дутья оказывает негативное влияние на стабильность доменного процесса, т.к. на диссоциацию воды затрачивается значительное количество тепловой энергии. Кроме того, образующиеся кислород и водород изменяют восстановительную способность горновых газов и условия горения кокса. Поэтому для стабилизации условий протекания доменного процесса поддерживают влажность дутья на постоянном максимальном 30 г/м³ уровне путем увлажнения паром холодного дутья.

Управление подачей пара реализовано с использованием типового контура стабилизации с применением ПИ- или ПИД-законов. В качестве датчиков влажности используются приборы, основанные на использовании психометрических или термоабсорбционных методов. Управление подачей пара осуществляем в двух режимах: «Дист» и «Авт». Выбор режима осуществляется использованием блока ручного управления БРУ-32. Предусмотрен контроль текущего положения регулирующего клапана подачи пара.

28 – Измеряется температура холодного дутья с использованием в качестве датчика термоэлектрического преобразования ТХК или медного термометра сопротивления ТСМ.

После нормирования информационный сигнал подается в РМК для расчета в системе управления периодами работы воздухонагревателей.

29 – Измеряется давление холодного дутья на входе блока воздухонагревателей ДП с использованием датчика Метран-22-ДИ. Нормированный информационный сигнал поступает на РМК для расчета гидродинамических характеристик каждого воздухонагревателя и для оценки гидравлических сопротивлений магистрали подвода дутья к ДП.

30 – Измеряется давление холодного дутья для формирования информационного сигнала в систему аварийной сигнализации и в систему управления температурой горячего дутья.

31 – Измеряется расход холодного дутья на печь с использованием комплекта, содержащего измерительную диафрагму, установленную на трубопроводе холодного дутья, дифференциального манометра типа Метран-100-ДД. Информационный сигнал о расходе холодного дутья на ДП поступает на вход микропроцессорного регулирующего контроллера.

32 – Контролируется температура колошникового газа в вертикальных газоходах ДП с использованием термодатчиков градуировки ТХА. Информационные сигналы с датчиков, расположенных в газоходах и по периферии колошника, подаются на вход РМК для оценки характера распределения газового потока по высоте шахты. Чем выше температура в данном секторе контроля, тем хуже идут процессы косвенного восстановления и наоборот.

33 – Контролируется температура колошникового газа по периферии колошника доменной печи (в 5-6 точках) с использованием термоэлектрических преобразователей ТХА для более точного определения (чем температуры в вертикальных газоходах) характера распределения газового потока по высоте шахты.

34 – Измеряется температура доменного газа в пылеуловителе с использованием термодатчиков градуировки ТХА или ТХК.

35 – Измеряется с использованием вводимого в печь информационного зонда температура колошникового газа по радиусу ДП для контроля характера распределения газового потока по сечению рабочего

пространства печи. Температура измеряется в нескольких точках от периферии к центру печи. Одновременно с измерением температуры по ходу информационного зонда в глубь печи осуществляется отбор пробы доменного газа для определения содержания CO , CO_2 , H_2 с использованием оптико-акустического газоанализатора.

Информация подается на вход РМК для оценки теплового состояния ДП и о ходе процесса косвенного восстановления по высоте шахты.

36 – Измеряется температура доменного газа в подконусном пространстве по радиусу (в 12 точках) для оценки распределения газового потока и хода процесса косвенного восстановления. Измерение осуществляется с использованием информационного зонда с отбором проб доменного газа для определения содержания CO , CO_2 , H_2 на выходе из печи.

37-39 – Измеряется и регулируется давление колошникового газа до дроссельной группы. Отбор давления расположен после скруббера очистки газа от колошниковой пыли. Повышение давления колошникового газа способствует уменьшению скорости восстановительного газа по высоте шихты. Это приводит к улучшению косвенного восстановления за счет улучшения продолжительного контакта газа с шихтой.

Измерение давления осуществляется датчиком Метран-22-ДИ, после нормирования сигнал поступает на вход РМК, который с использованием ПИ- или ПИД-законов управления формирует управляющий сигнал.

Управление исполнительным механизмом типа МЭО 1000-0,69-0,25 осуществляется с использованием ПБР-3М. Выбор режима управления «ДИСТ» или «АВТ» осуществляется блоком ручного управления БРУ-32, в котором предусмотрен контроль положения поворотного регулирующего клапана (угол поворота вала исполнительного механизма) – 38.

40 – Измеряется давление в подконусном пространстве ДП для использования в качестве технологического импульса при управлении подачей шихты с использованием двухконусного засыпного аппарата. Давление измеряется датчиком Метран-22-ДИ. Информационный сигнал подается в РМК для контроля нормальной работы засыпного аппарата.

41, 42 – Измеряется перепад давления между надконусными и подконусным давлением газа. Измерение осуществляется прибором Метран-100 ДД для выравнивания давлений перед опусканием большого конуса при загрузке шихты в ДП. Информационный сигнал подается на вход РМК для контроля и управления работой засыпного аппарата.

43 – Измеряется давление газа в межконусном пространстве засыпного аппарата при опускании малого конуса и большого конуса. Данный импульс предназначен для дублирования информационного сигнала с целью обеспечения надежной работы механизмов засыпного аппарата.

В межконусном пространстве перед опусканием малого конуса давление должно быть равно атмосферному, а перед опусканием боль-

шого конуса давление должно быть равно давлению газа на колошнике ДП. Информационный сигнал подается на вход РМК для контроля и учета работы засыпного аппарата при загрузке в печь шихты.

Измеряются давление колошникового газа в вертикальных газоходах и на входе в пылеуловитель газоотводящей системы ДП. Предусмотрен контроль перепада давления между отмеченными участками газоотводящей системы. Для контроля давления используются приборы Метран-22 ДИ, а для контроля перепада дифманометр типа Метран-100-ДД.

Данные информационные каналы используются как технологические при остановке печи.

44, 45 – Измеряется перепад давления газа между межконусным пространством и подконусным для обеспечения возможности опускания малого конуса и опусканием большого конуса. Этот дублированный канал обеспечивает надежность и безаварийность работы засыпного аппарата двухконусного типа.

Измерение осуществляется прибором Метран-22 ДИ и информационный сигнал подается в РМК для формирования команды на опускание конусов большого и малого, при соблюдении необходимых логических условий с учетом дублирования информационных сигналов. Схемой предусмотрена аварийная сигнализация при отклонении перепада от нормальных величин, требуемым при соблюдении технологии загрузки.

Предусмотрен дублированный информационный канал для контроля перепада между подконусным и межконусным пространствами. Это сделано для обеспечения нормальной и безопасной обстановки и возможности опускания большого конуса при загрузке шихтовых материалов в печь. Опускание большого конуса возможно только при наличии двух требуемых по величине информационных сигналов.

Схемой предусмотрена аварийная сигнализация при нарушении нормального технологического процесса работы механизмом засыпного аппарата. Данный информационный сигнал поступает на вход МРК, который контролирует работу засыпного аппарата по заданной программе.

46 – Измеряется перепад давления между конусным пространством и атмосферой для обеспечения условий опускания малого конуса. Давление в межконусном пространстве перед опусканием малого конуса должно быть равно атмосферному.

Одновременно контролируется величина давления в межконусном пространстве.

Информационный сигнал о величине текущего перепада давления поступает на вход МРК для контроля за нормальной последовательностью работы механизмов засыпного аппарата.

Схемой предусматривается автоматическая аварийная сигнализация при отклонении значений перепада от номинальных технологически обоснованных параметров.

Предусмотрен дублирующий информационный канал для измерения перепада давлений между атмосферой и межконусным пространством. Это сделано для обеспечения надежности и безаварийности работы засыпного аппарата двухконусного типа.

Управляющая команда на опускание малого конуса будет сформирована только при наличии двух информационных сигналов с необходимыми величинами. Схемой предусмотрена аварийная сигнализация при нарушении нормального процесса.

47 – Измеряется перепад давления между подконусным пространством и атмосферой для обеспечения условий опускания малого конуса.

48-50 – Измеряются частные перепады давления по высоте шахты доменной печи. Эти перепады характеризуют гидравлическое сопротивление на разных горизонтах по высоте шахты. Эта информация является объективной характеристикой эффективности косвенного восстановления и распределения газового потока по высоте шахты.

Контролируются следующие резервные частные перепады:

48, 49 – «Верхний» перепад;

50, 48 – «Нижний» перепад;

50, 49 – «Общий» перепад.

Изменение перепадов осуществляется дифференциальными манометрами Метран-100-ДД, сигналы нормируются и подаются на вход РМК для формирования управления загрузкой рудно-коксовых подач шихты.

51, 52 – Измеряется давление воздуха на выходе I и II вентиляторов. Воздух используется для охлаждения лещади с целью сокращения интенсивности её «разгорания» (разрушения) под воздействием жидкого чугуна. Лещадь – донная часть печи, собрана из углеродистых блоков, но за 8-10-летнюю кампанию в ней образуется значительная полость, в которой скапливается до 300÷400 т жидкого чугуна. Прорыв этой массы чугуна может привести к крупной аварии. И для предотвращения этого явления лещадь через специальные каналы охлаждается воздухом, подаваемым от двух вентиляторов.

Информационные сигналы от датчиков давления Метран-22-ДИ поступают на вход РМК. Схемой предусматривается аварийная сигнализация при падении давления воздуха на выходе каждого вентилятора.

53, 54 – Измеряются температуры воздуха на охлаждении лещади на входе в каналы 3 точки – 53 и на выходе 5 точек – 54. Измерение осуществляется термopарами ТХК и информационные сигналы подаются на вход РМК для контроля за работой системы воздушного охлаждения лещади ДП.

55 – Контролируется температура лещади в пяти точках по периметру лещади с целью предотвращения возможности разрушения (разгара) и возникновения последующей аварийной ситуации. Измерение осуществляется путем установки термопар градуировки ТХК и ТХА. Нормированные сигналы о текущем температурном состоянии лещади подаются на вход РМК с целью контроля за температурным режимом и своевременного обнаружения опасности возникновения аварийной ситуации.

56 – Измеряется температура горна в 5-6 точках по периметру. Это сделано для обнаружения возможности разгара огнеупорной защитной кладки горна в процессе длительной эксплуатации печи. Измерение осуществляется термопарами градуировки ТХА. Нормированный сигнал с термопар подается на вход РМК для объективного контроля за состоянием огнеупорной защитной кладки.

57 – Измеряются температуры охлаждающей воды холодильников шахты первого ряда в количестве 8 шт. В качестве датчиков используют термометры сопротивления ТСМ или термопары ТХК. Информационные сигналы поступают на вход РМК для контроля за профилем разгара шахты.

58 – Измеряются температуры охлаждающей воды на сливе холодильников 3-го ряда в количестве 8 шт. В качестве датчиков используются термометры сопротивления ТСМ или термопары градуировки ТХК.

Информационные сигналы подаются на вход РМК для анализа и контроля профиля разгара шахты на уровне расположения холодильников. В течение кампании шахтные холодильники постепенно по мере разрушения защитной кладки шахты выходят из строя.

59 – Измеряются температуры в различных 17 точках по периферии и по сечению нижней части горна доменной печи. Измерение осуществляется длинномерными термопарами градуировки ТХА с целью контроля за разгаром защитной огнеупорной кладки горна в процессе длительной эксплуатации печи для предотвращения прорыва жидкого чугуна и кокса.

Информационные сигналы с датчиков температуры, поступающие на вход РМК, анализируются, и при возникновении опасной ситуации выдается на экран монитора соответствующее предупреждение.

60 – Измеряются температуры в различных семи точках защитной кладки в верхней части горна ДП. Измерение осуществляется термопарами градуировки ТХА, и информационные сигналы подаются на вход РМК, где анализируются для формирования профиля разгара горна на определенном горизонте с выдачей информации на экран монитора при возникновении опасной ситуации.

61, 62 – Контролируется прогар фурм ДП с использованием дублированных дискретных датчиков, установленных на сливе системы охлаждения каждой фурмы. На сливе каждой фурмы устанавливается

специальный блок, в верхней части которого располагаются контакты, через которые питается реле. Поскольку давление горячего дутья больше, чем давление охлаждающей воды, то при прогаре или нарушении герметичности фурмы дутье проникает в охлаждающую воду. Воздух задерживается в верхней части сигнального блока и контакт между электродами нарушается, реле отключается и формирует своими нормально разомкнутыми контактами дискретный сигнал о неисправности фурмы. Информационный сигнал о нарушении герметичности фурмы подается на вход РМК для индикации на экране монитора.

Дублирование информационного дискретного сигнала необходимо для проверки достоверности получаемой информации, т.к. замена фурм на работающей печи – это сложная и опасная операция, требующая остановки печи, хотя и на короткое время.

63, 64 – Контролируется прогар клапана горячего дутья на воздухонагревателях ДП. Дискретный информационный сигнал о нарушении герметичности водоохлаждаемого клапана горячего дутья воздухонагревателя формируется аналогично сигналу о прогаре воздушных фурм горячего дутья.

Для повышения достоверности информации дискретные сигналы дублированы от двух независимых блоков обнаружения прогара путем последовательного включения в цепь двух контактов (реализация логического элемента «И»). Информационный сигнал подается на вход РМК для отражения на экране монитора рабочего места технолога-оператора о обнаруженном нарушении герметичности водоохлаждаемого элемента конструкции ДП или воздухонагревателя.

65 – Измеряется температура чугуна на выпусках из каждой из двух чугунных леток. Измерение осуществляется с использованием спектральных пирометрических оптических приборов типа DES-1200-25-1600. Нормированный сигнал о температуре чугуна поступает на вход РМК для определения текущего теплового состояния доменной печи.

66 – Измеряются температуры шлака на выпусках из каждой используемой шлаковой летки. Измерение по аналогии с температурой чугуна осуществляется с использованием оптических пирометров DES-1200-25-1600. Информационные сигналы подаются на вход РМК для оценки теплового текущего состояния доменного процесса и коррекции подачи топлива при отклонениях контролируемых параметров от номинальных значений.

67 – Измеряются температуры охлаждающей воды на сливе леточных амбразур чугунных и шлаковых леток (выпускных отверстий).

Измерение осуществляется путем установки термомпар или термометров сопротивления в водопроводы охлаждающей воды на сливе. Температура воды на сливе из водоохлаждаемых элементов технологических

агрегатов металлургического производства не должна превышать 60 °С с целью предотвращения выпадения солей, содержащихся в воде, в охлаждаемых элементах. Информация о текущих 44-х температурах подается на вход РМК или системы централизованного контроля для оценки текущего состояния и принятия своевременных мер по предотвращению разрушения защищаемых элементов конструкций печей.

68, 69 – Измеряются температуры охлаждающей воды на сливе горновых холодильников каждой из двух секций. Изменение температуры охлаждающей воды осуществляет термопарами градуировки ТХК, установленными в водопроводах на сливе всех магистралей в районе сливных коробов.

Информация о текущих величинах температур воды на сливе всех охлаждаемых элементов горна доменной печи поступает на вход РМК для оценки текущего состояния системы охлаждения и выдачи оперативной информации о нарушении системы охлаждения какого-либо элемента горна.

70 – Измеряется положение вращающего распределителя шихты (ВРШ) с указанием текущего положения. Данная информация используется для контроля и управления распределением коксовых и рудно-флюсовых подач по периметру колошника доменной печи для управления распределением газового потока по высоте шахты.

71 – Контролируется дискретным сигналом положение и работа малого и большого конуса в системе загрузки шихты в доменную печь. Информация о текущих положениях большого и малого конусов подается в РМК для организации системы загрузки.

72 – Контролируется аналоговыми датчиками (непрерывно) работа малого и большого конусов в процессе загрузки материалов в ДП. Контроль текущего промежуточного положения конусов может осуществляться аналоговыми или цифровыми датчиками.

Информация подается на вход РМК для анализа текущей информации и оперативного обнаружения и ликвидации нештатных ситуаций при загрузке шахты.

73, 74 – Контролируется с использованием двух информационных зондов (шомполов) уровень засыпи шихтовых материалов на колошнике доменной печи в районе «запад», «восток».

Информационные сигналы о текущем уровне засыпи поступает на вход РМК для анализа и управления ходом доменной печи путем изменения уровня засыпи, порядка подачи материалов в печь и управлению дутьевым режимом ДП.

75, 76 – Измеряются скорости схода шихты с использованием аналоговых или цифровых систем для каждого шомпола по двум направлениям «запад», «восток».

77 – Контролируется количество колошникового газа, получаемого в ДП.

Наличие такого кажущегося избыточным количества приборов контроля вызвано сложными условиями работы ДП и закрытым характером процесса, который осуществляется непрерывно в течение длительной кампании.

Контрольные вопросы к разделу 3

1. Перечислите особенности управления давлением горячего дутья ДП.
2. Перечислите особенности управления температурой горячего дутья ДП.
3. Перечислите особенности управления влажностью горячего дутья ДП.
4. Для чего измеряются частные перепады давления по высоте шахты ДП?
5. Как влияет величина давления газа на колошнике ДП на эффективность косвенного восстановления?
6. Зачем контролируется перепад давлений между горячим дутьем и природным газом?
7. Чем измеряется содержание кислорода в обогащенном дутье?
8. Объясните принцип работы системы обнаружения прогара водоохлаждаемых элементов ДП.

4. УПРАВЛЕНИЕ ЗАГРУЗКОЙ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Система управления загрузкой шихтовых материалов обеспечивает нормальную высокопроизводительную работу ДП путем решения двух главных задач:

1. Управление набором, взвешиванием и доставкой шихтовых материалов к скипам и транспортерам.

2. Управление загрузкой материалов в печь с использованием различных способов подачи шихты в рабочее пространство ДП, находящееся под большим (до 3 кг/см^2 или 3 атм.) давлением, которое представляет сложную проблему.

Система управления загрузкой шихтовых материалов представляют сложную распределенную во времени и пространстве структуру, обладающую запаздыванием.

4.1. Системы подачи шихтовых материалов к скипам

4.1.1. Системы с вагонами-весами

На некоторых работающих доменных печах старой конструкции до сих пор используется устаревшая система подачи материалов к скипам с помощью вагонов-весов. Дозирование шихтовых материалов и транспортирование их к скипам при помощи вагонов-весов представляет собой простую и весьма ранее распространенную систему, схема которой представлена на рис. 6. В основном, такая система применима на печах малого объема.

Набор и взвешивание железосодержащей части шихты и добавок осуществляется вагонами-весами 4, которые загружают скип 6 через течку 5. Кокс из бункера 1 транспортируется в весовую воронку 3 грохотом 2, который отсеивает мелкие фракции. Взвешенный в воронке кокс подается в скип. В настоящее время данная схема практически не применяется, т.к. в ней затруднен отсев мелочи кокса и тяжелые условия работы машиниста вагонов-весов.

Управление вагонами-весами осуществляется машинистом. На отечественных доменных печах применяются вагоны-весы грузоподъемностью 25 и 40 т. На доменных печах объемом свыше 1386 м^3 применялись вагоны-весы грузоподъемностью 40 т.

Уменьшение цикла работы вагонов-весов может быть достигнуто как за счет сокращения числа компонентов шихты и снижения продолжительности операций, так и за счет более рациональной организа-

ции работы вагонов-весов, учитывающей вид программы загрузки печи и распределение материалов по бункерам шихтоподачи.

Ввиду сложности решаемой задачи попытки автоматического управления работой вагонов-весов оказались малоперспективными и трудно реализуемыми в техническом исполнении.

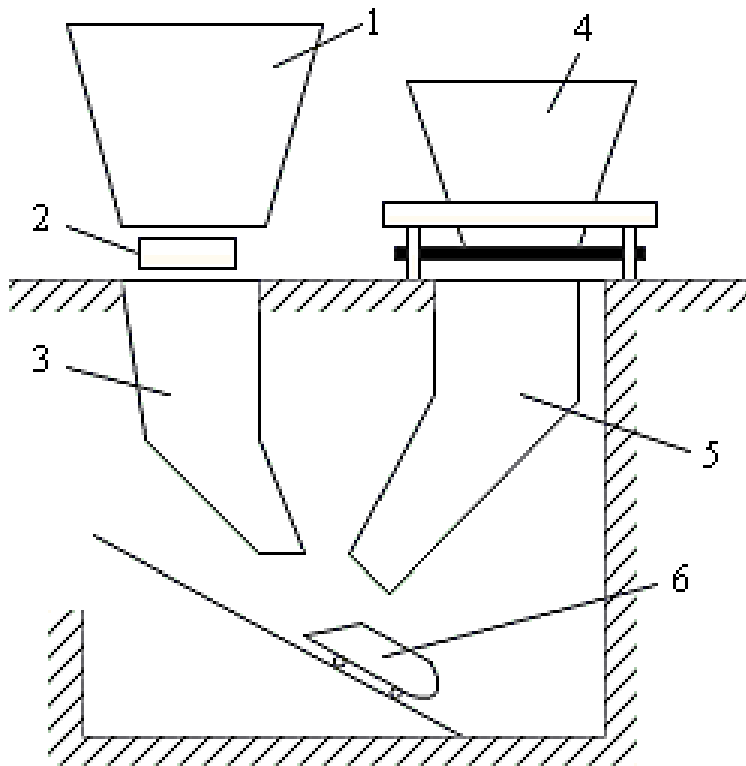


Рис. 6. Схема загрузки печи с применением вагонов-весов

4.1.2. Системы с конвейерным транспортированием шихтовых материалов к скипам

Впервые в нашей стране конвейерная система подачи шихтовых материалов к скипам была применена на одной из доменных печей Магнитогорского металлургического комбината (ПАО «ММК») во время ее реконструкции в 1960 г. В этой системе, представленной на рис. 7, горячий агломерат с температурой 500-600°C, известняк, кварцит и динасы размещаются в бункерах, расположенных двумя рядами. Бункера одного ряда

предназначены для агломерата, а бункера другого – для добавок. С одной стороны печи располагаются рабочие бункера, с другой – резервные.

Подача материалов из бункеров к скипам осуществляется двумя парами конвейеров: пластинчатыми 1, 2 и ленточными 3, 4. Добавки и агломерат подаются с помощью электровибрационных питателей 10-13 на соответствующие конвейеры (добавки дозируются в весовых воронках 7 и 8), которые доставляют материалы в рудные весовые воронки 6, расположенные над скиповой ямой. Поступление материала в одну из воронок осуществляется с помощью перекидного лотка 14. Добавки поступают в рудные весовые воронки после взвешивания агломерата, а кокс транспортируется грохотами 9 в весовые воронки 5.

В 1960 г. на КМЗ была задута доменная печь объемом 2000 м³, оборудованная системой шихтоподачи с конвейерной загрузкой материала в скипы. Эта система оказалась весьма сложной: подача агломерата и добавок от бункеров к скипам через многочисленные промежуточные механизмы и устройства осуществляется с помощью четырех конвейеров. Кроме того, предусмотрена система довеса агломерата для повышения точности дозирования, а также промежуточные бункера добавок для одновременной их подачи с агломератом в скипы.

Кокс в этой системе поступает в скипы по схеме: бункер кокса – грохот – весовая воронка – скип.

На последующих печах объемом 2000 м³ отказались от питателей довеса агломерата, промежуточных бункеров добавок, от конвейеров добавок и др.

На доменной печи, задутый в 1962 г., система шихтоподачи более рациональна и представлена на рис. 8 [9]. Здесь агломерат грохотами подается на пластинчатый конвейер 11 (12). На этот же конвейер одновременно с агломератом подаются и добавки, предварительно взвешенные в воронках 5-10. Эти материалы через распределительный лоток 15 попадают в весовые воронки 3 (4) и далее в скип.

Подача кокса и эвакуация мелочи шихтовых материалов производится по обычной схеме: бункера кокса – грохоты – весовые воронки 1 (2) – скипы. Эвакуация мелочи агломерата осуществляется с помощью конвейеров 13 (14).

За рубежом на современных доменных печах системы шихтоподачи характеризуются групповым расположением бункеров и оборудования. Это связано с тем, что шихтовые материалы из бункеров транспортируются конвейерами в соответствующую весовую воронку.

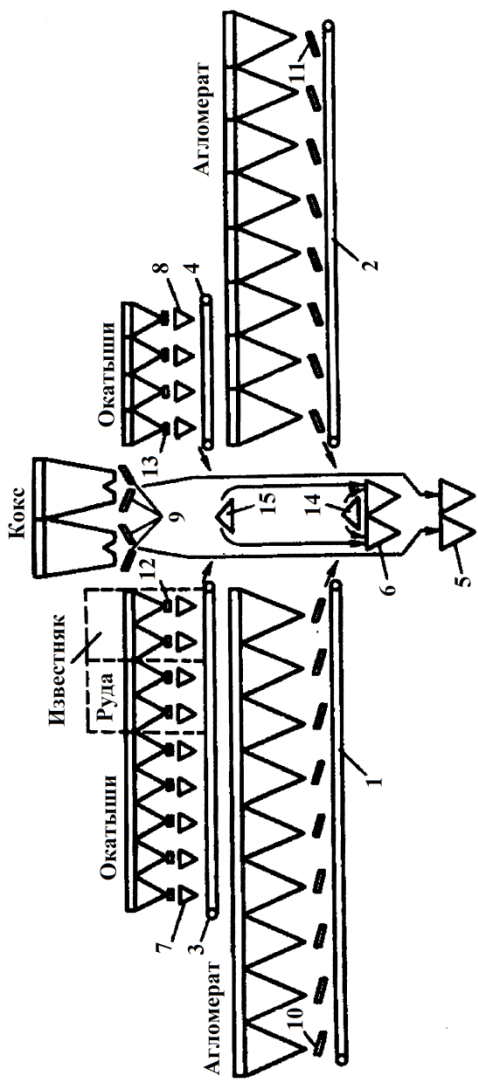


Рис. 7. Система шихтоподачи доменной печи ПАО «ММК»:
 1, 2 – пластинчатые конвейеры; 3, 4 – ленточные конвейеры; 5-8 – весовые воронки;
 9 – грохоты; 10-13 – электровибрационные питатели; 14, 15 – перекидной лоток

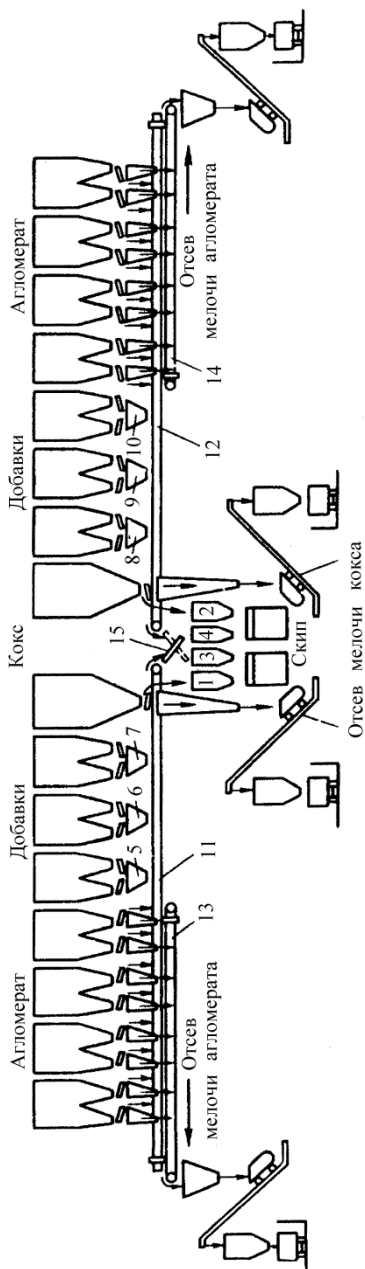


Рис. 8. Система шихтоподдачи доменной печи объемом 2000 м³ КМЗ:
 1-10 – весовые воронки; 11, 12 – пластинчатые конвейеры;
 13, 14 – ленточные конвейеры; 15 – распределительный лоток

4.1.3. Системы с непосредственной выдачей шихтовых материалов в весовые воронки

Рассмотрим систему, оборудованную центральными бункерами агломерата, которая спроектирована Ленгипромезом для Череповецкого металлургического завода, представленную на рис. 9. С каждой стороны этой печи расположено по одному коксовому бункеру, по два центральных и по четыре боковых бункеров железосодержащей части шихты и по три бункера добавок. В отличие от системы шихтоподачи доменной печи объемом 2700 м^3 КМЗ, эта система имеет три грузопотока: трассу дозирования кокса, трассу дозирования агломерата из центральных бункеров и трассу дозирования агломерата и добавок из боковых бункеров.

Система с центральными бункерами агломерата применена также на доменной печи Карагандинского металлургического комбината (КарМК). Принципиальное отличие этой схемы от системы шихтоподачи печи ЧерМЗ (см. рис. 9) состоит в том, что ленточные конвейеры могут подать из боковых бункеров агломерат, либо агломерат с добавками, либо только добавки в промежуточные бункеры и далее в скипы. Дозирование в этом случае производится в весовых воронках, расположенных между боковыми бункерами и конвейерами.

Дальнейшее развитие система с непосредственной выдачей материалов из центральных бункеров в весовые воронки получила на доменной печи объемом 3200 м^3 НЛМЗ. Проект шихтоподачи выполнен липецким филиалом Гипромеза. Комплекс оборудования шихтоподачи состоит из двух групп механизмов, расположенных по обе стороны от оси печи. Печь имеет два наклонных моста, по каждому из которых движется скип, приводимый лебедкой, общей для обоих скипов. Система шихтоподачи доменной печи объемом 3200 м^3 НЛМЗ представлена на рис. 10.

Каждая группа механизмов обслуживает один скип. Подача кокса осуществляется из двух бункеров кокса грохотами 5 (6) на сборные конвейеры 1, 3 (2, 4) и после взвешивания в весовых воронках 9 (10) по течкам 11 (12) кокс поступает в скипы 30. Агломерат из центральных бункеров подается в весовые воронки 18 (19) грохотами 13 (14) и по течкам 20, 21 в скипы 30. Из боковых бункеров агломерат в весовые воронки 18 (19) транспортируется грохотами 15 и далее конвейерами 16 (17). Добавки питателями 24 (25) конвейерами 26 (27) подаются в весовые воронки 28 (29) и после взвешивания транспортируются конвейерами 16 (17) в весовые воронки агломерата 18 (19). Коксовая мелочь и мелочь агломерата транспортируется конвейерами 7 (8) и 22 (23) на сборные конвейеры и далее в железнодорожные вагоны.

Производительность оборудования выбрана из условия нормальной загрузки печи при работе одной группы механизмов шихтоподачи.

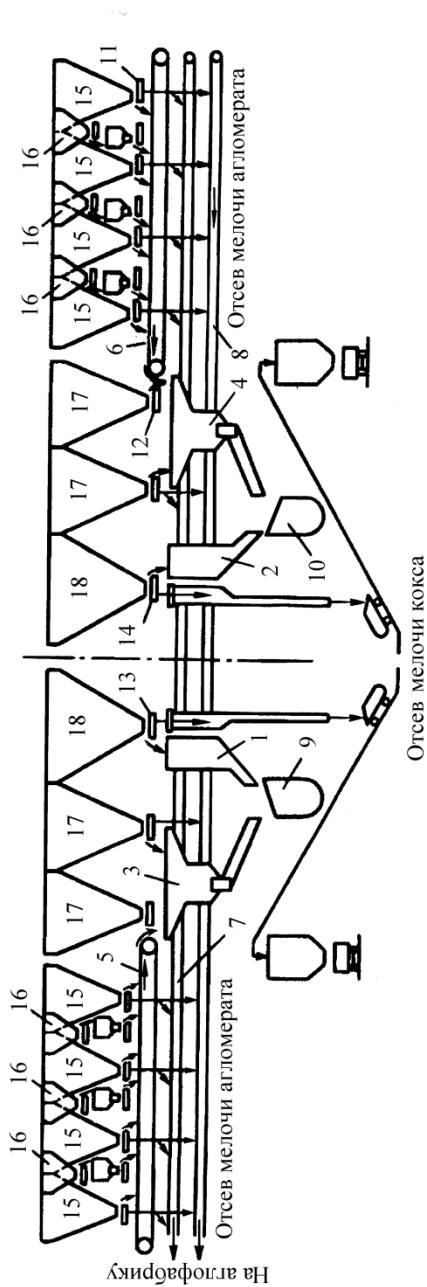


Рис. 9. Система шихтоподачи доменной печи объемом 2700 м³ ЧерМЗ:

- 1, 2 – весовые воронки агломерата; 3, 4 – весовые воронки агломерата; 5, 6 – конвейеры агломерата;
- 7, 8 – конвейеры мелочи; 9, 10 – скипы; 11, 12 – грохоты агломерата; 13, 14 – грохоты кокса;
- 15 – боковые бункеры агломерата; 16 – бункеры добавок; 17 – центральные бункеры агломерата;
- 18 – бункеры кокса

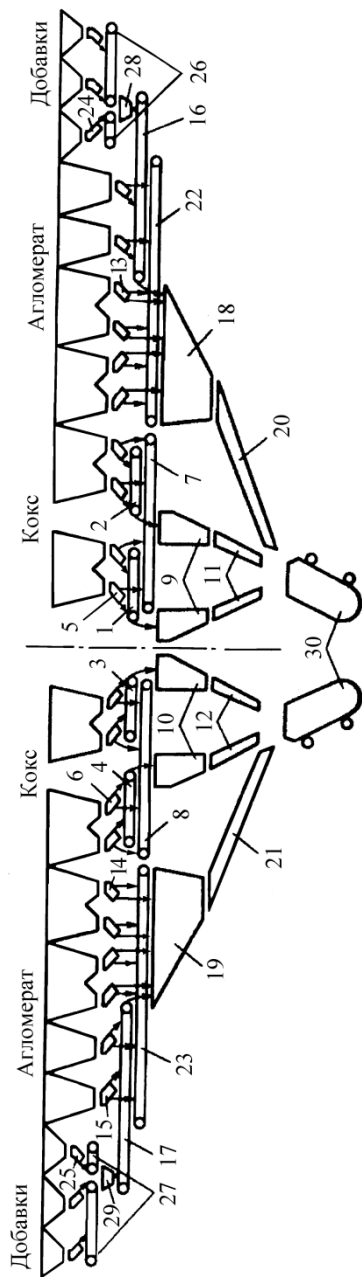


Рис. 10. Система шихтоподачи доменной печи объемом 3200 м³ НЛМЗ:

- 1-4, 7, 8, 16, 17, 22, 23, 26, 27 – конвейеры; 5, 6, 13-15 – грохоты;
- 9, 10, 18, 19, 28, 29 – весовые воронки; 11, 12, 20, 21 – тетки;
- 24, 25 – питатели; 30 – скипы

Агломерат из центральных бункеров подается в весовые воронки грохотами и по течкам в скипы 30. Из боковых бункеров агломерат в весовые воронки 18 (19) транспортируется грохотами и далее конвейерами. Добавки конвейерами подаются в весовые воронки и после взвешивания транспортируются конвейерами 16 (17) в весовые воронки агломерата 18 (19). Коксовая мелочь и мелочь агломерата транспортируется конвейерами на сборные конвейеры.

4.1.4. Системы конвейерной подачи шихтовых материалов на колошник печи

На сверхмощных ДП объемом 5000 м^3 используется система подачи шихтовых материалов на колошник конвейерного типа. В качестве примера рассмотрим схемы шихтоподачи доменной печи объемом 5000 м^3 КМЗ с конвейерной загрузкой шихтовых материалов в печь.

Технологическая схема подачи шихтовых материалов доменной печи КМЗ состоит из 18 каналов выгрузки шихтовых материалов на сборные горизонтальные конвейеры (рис. 11), по 9 с каждой стороны наклонного конвейера. Группа каналов, расположенных с одной стороны печи, по своей производительности должна обеспечить нормальную загрузку доменной печи шихтовыми материалами. Проектом предусматривалось, что другая (неработающая) группа каналов будет находиться в резерве. Окатыши, кокс и добавки подаются на двухрядную эстакаду печи железнодорожными вагонами. Агломерат подают непосредственно с горно-обогатительного комбината системой ленточных конвейеров (ширина ленты 1600 мм).

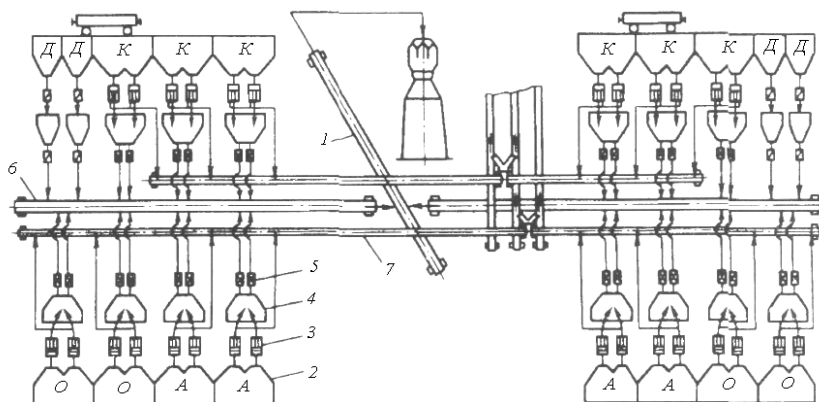


Рис. 11. Система шихтоподачи доменной печи объемом 5000 м^3 КМЗ:
 1 – наклонный конвейер; 2 – бункера с материалом; 3 – грохоты;
 4 – весовые воронки; 5 – питатели; 6 – сборные горизонтальные конвейеры; 7 – конвейер мелочи материала
 (А – агломерат, О – окатыши, К – кокс, Д – добавки)

Подача материалов по каждому каналу (кроме добавок) осуществляется по следующей схеме: бункер 2 – два параллельно работающих питателя 5. Питатели подают материал на сборные горизонтальные конвейеры 6, которые перегружают шихту на наклонный конвейер 1.

Добавки на горизонтальный конвейер подаются по схеме: бункер – питатель – весовая воронка – питатель. Система шихтоподачи работает следующим образом.

По окончании разгрузки весовой воронки 4 производится включение грохотов 3 и заполнение воронки новой дозой материала. Разгрузка весовой воронки осуществляется питателями, которые работают по заданной программе загрузки печи, обеспечивающей расположение доз материалов на конвейере с требуемыми последовательностью и интервалами. Горизонтальные и наклонный конвейеры работают непрерывно, а их производительность, обусловленная интервалами между дозами, определяется скоростью схода шихты в рабочее пространство печи.

Скорость движения ленты конвейеров 2 м/с, угол подъема наклонного конвейера $10^{\circ} 30'$, длина 509 м. Объем весовых воронок агломерата, кокса и окатышей 25 м^3 , максимальная масса дозы добавки 3 т. Мелочь агломерата, окатышей и кокса от грохотов собирается горизонтальными конвейерами 7, которые подают ее на три наклонных конвейера (один конвейер резервный) и далее в сборные бункера и железнодорожные вагоны.

4.1.5. Технологические требования, предъявляемые к системам шихтоподачи

Различные материалы, подаваемые в доменную печь, нередко состоят из 5-8 компонентов. Уменьшение числа компонентов, а в пределе переход к моношихте, позволит не только улучшить ход доменной плавки, но и уменьшить капитальные затраты на сооружение шихтоподачи при той же производительности системы.

В настоящее время на крупных доменных печах в скип загружают, как правило, не более трех-четырех компонентов шихты.

Целесообразность циклической подачи шихтовых материалов в доменную печь объясняется следующим. Если в скип подается только один компонент шихты, то в одной подаче из многих компонентов, имеющих всего два рудных скипа, нельзя подать все материалы, входящие в шихту. Возникает необходимость в загрузке разных по своему составу подач. Поэтому в настоящее время на доменных печах применяют несколько (по содержанию) видов подач. Система управления шихтоподачей позволяет составить цикл из трех подач разного вида.

Преимущества циклической загрузки состоят в следующем:

1) каждый вид материала, входящего в состав шихты, имеет свойственный ему характер радиального распределения на колошнике печи и оказывает различное влияние на газопроницаемость потока;

2) создается широкая возможность размещения вершин разных материалов по различным точкам окружности (периметра) колошника;

3) допускается различное вертикальное распределение отдельных материалов по высоте шахты ДП.

Система шихтоподачи должна обладать достаточной производительностью для реализации любого вида подачи при их различных стыковках.

Весьма важным требованием, предъявляемым к системам шихтоподачи, является возможность реализации любой рудной нагрузки, которая представляет собой отношение массы рудной части шихты к массе кокса в одной подаче. Рудная нагрузка на современных доменных печах составляет 3,5-4,7. Следовательно, при проектировании систем шихтоподачи и выборе объема весовых воронок кокса и рудной части шихты необходимо исходить из условия реализации минимально возможной рудной нагрузки.

Одним из факторов, обеспечивающих бесперебойную работу доменной печи, помимо производительности системы шихтоподачи, является ее надежность. Современные доменные печи оборудованы конвейерными системами подачи шихтовых материалов к скипам, а доменные печи большого объема – конвейерными системами подачи шихты на колошник.

В отличие от систем шихтоподачи с вагонами-весами эти системы имеют большое число одновременно работающих механизмов, что снижает общую надежность системы.

Отказ любой подсистемы шихтоподачи, подающей кокс, агломерат либо добавки, приводит к прекращению подачи любого вида материала. То же самое можно сказать и о трактах уборки мелочи шихтовых материалов.

Поэтому системы шихтоподачи должны обладать достаточно высокими показателями надежности. Это может быть достигнуто либо установкой высоконадежного оборудования, либо резервированием отдельных механизмов подсистемы, а возможно и всей системы шихтоподачи.

В общем виде задача выбора технологически обоснованной (рациональной) структурной схемы системы шихтоподачи должна решаться не только с учетом критериев производительности и надежности, но также и эффективности ее применения.

Здесь имеется в виду создание такой шихтоподачи, которая имела бы при высоких характеристиках производительности и надежности малые капитальные затраты на сооружение и небольшие эксплуатационные затраты на обслуживание и ремонт.

4.1.6. Функциональная схема контроля и управления системы автоматизации подачи шихтовых материалов к скипам

Вариант функциональной схемы автоматизированного контроля и управления подачей шихтовых материалов к скипам представлен на рис. 12.

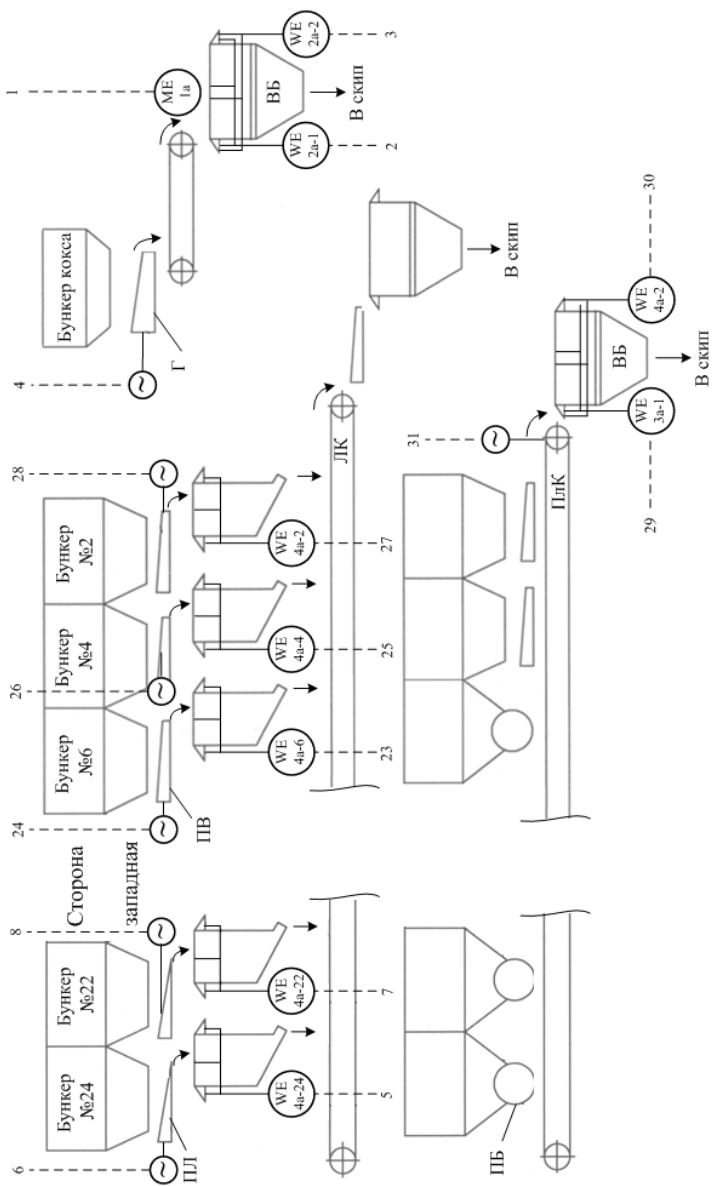


Рис. 12. Функциональная схема автоматизированного контроля и управления подачей шихтовых материалов к скипам ДШ: ПЛ – питатель лотковый; ПБ – питатель барабанный; ПВ – питатель вибрационный; Г – грохот; ВБ – весы бункерные; ЛК – ленточный конвейер; ПлК – пластинчатый конвейер

Функциональной схемой автоматического контроля и управления предусматривается:

1, 2, 3 – Измерение и автоматическая коррекция массы (веса) кокса по влажности. Схемой предусмотрено измерение влажности кокса нейтронным влагомером. Информационный сигнал о текущей влажности нормируется и подается на РМК для формирования корректирующей поправки задания контура управления массой загружаемого в скип кокса.

2, 3, 4 – Измеряется и регулируется масса кокса, загружаемого в скип из расходного бункера путем управления вибрационным питателем.

5-6, 7-8, ..., 25-26, 27-28 – Аналогично измеряется и регулируется масса материалов на ленточный конвейер из расходных бункеров с четными номерами от 2 до 24. Управление дозированием материалов на ленточный конвейер осуществляется централизованно с использованием индивидуальных регуляторов, задание массы которых формирует управляющий комплекс, реализованный с использованием отдельной ЭВМ (РМК).

29, 30, 31 – Измеряется и регулируется масса горячего агломерата, отбираемого на пластинчатый конвейер из расходных бункеров с использованием питателей барабанного типа. Регулирование массы агломерата, загружаемого в скип осуществляется локальным стабилизирующим контуром (по аналогии с управлением загрузки кокса) с учетом корректирующего сигнала задания, формируемого РМК, технически реализованного на УЭВМ (управляющей электронной вычислительной машине), способной надежно работать в производственных условиях.

4.2. Управление загрузкой шихтовых материалов в доменную печь

Управление доменным процессом или ходом доменной печи можно осуществлять путем изменения способа загрузки шихтовых материалов в ДП. Этот способ называется «управлением сверху».

Высокопроизводительная работа каждой ДП зависит от индивидуального рационального распределения потока восстановительного газа по высоте шахты, которое в основном определяется используемой на печи системой загрузки материалов.

Существует определенная система условных обозначений подаваемых в печь материалов:

К – кокс;

А – агломерат;

Р – руда;

↓ – опускание большого конуса вниз (число стоящее после стрелки, указывает, при каком уровне шихты Н опускается большой конус);

Н – уровень засыпи, определяется как расстояние от нижней кромки большого конуса в опущенном положении до поверхности шихты в печи.

Например, $A_3K_2\downarrow 1,8$ определяет подачу, состоящую из первоначальных поданных трех скипов с агломератом, затем два скипа кокса и загружаемая в ДП при достижении уровня засыпи 1,8 м.

Систему подачи типа ААККК↓ называют «рудой (агломератом) вперед».

Систему подачи КККРР – «коксом вперед».

Систему РКРК↓ или КРКРК↓Н называют «смешанной».

АКА↓НКАК↓Н называют «расщепленной».

В реальных условиях наиболее распространены циклические системы загрузки типа $nA_2K_2\downarrow NmKPK\downarrow H$, где n и m – число подач в цикле $n:m$ как 1:6, 2:5 и т.д.

При использовании системы загрузки «рудой вперед» рудная часть шихты, как показывает практический опыт, сосредотачивается на периферии шахты печи. Это обуславливает уменьшение температуры колошникового газа на выходе печи и увеличение содержания CO_2 в колошниковом газе. В этом случае использование тепловой энергии и химической активности газового потока улучшается.

Наибольшая загрузка периферийной части шахты агломератом (рудной частью шихты) получается при подачах типа АК↓НАК↓АК↓, однако при такой системе загрузки нарушается нормальный ход печи.

При измерении системы загрузки изменяется характер распределения газового потока, что приводит к изменению формы кривой распределения содержания диоксида углерода CO_2 в газе по радиусу доменной печи, представленной на рис. 13.

Кривая распределения CO_2 по радиусу доменной печи имеет три характерные точки:

$(CO_2)_п$ – содержание CO_2 на периферии;

$(CO_2)_ц$ – содержание CO_2 в центре печи;

$(CO_2)_{max}$ – максимальное содержание CO_2 на расстоянии a_{max} .

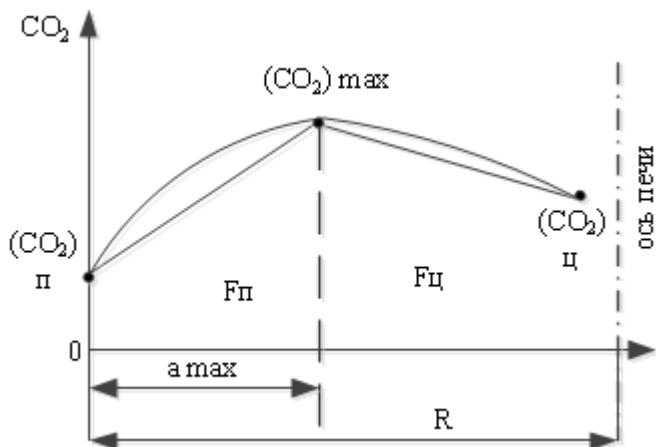


Рис. 13. Характерное распределение содержания CO_2 в колошниковом газе по радиусу доменной печи

В качестве параметров, характеризующих кривую распределения диоксида углерода по радиусу ДП, используются величины:

$$M_1 = \frac{(\text{CO}_2)_{\max} - (\text{CO}_2)_{\text{п}}}{(\text{CO}_2)_{\max} - (\text{CO}_2)_{\text{ц}}}, \quad (4.1)$$

$$M_2 = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{ц}}} = \frac{a_{\max}}{R - a_{\max F}} \cdot \frac{(\text{CO}_2)_{\max} - (\text{CO}_2)_{\text{п}}}{(\text{CO}_2)_{\max} - (\text{CO}_2)_{\text{ц}}}, \quad (4.2)$$

где $F_{\text{п}}$ и $F_{\text{ц}}$ – площади диаграммы кривой распределения CO_2 по радиусу ДП на рис. 13.

Разрыхление периферийной части столба шихты по высоте шахты сопровождается развитием периферийного газового потока и увеличением M . Это означает, что показатель M является количественной характеристикой входной величины распределения газового потока по сечению шахты ДП.

Входной величиной при управлении распределения газового потока с учетом параметра M по рекомендации, изложенной в работе [8], служат различные системы загрузки, классифицируемые по номерам от 1 до 7.

Переход от системы с меньшим номером к системе с большим номером способствует большой концентрации (сосредоточению) рудных материалов в периферийной зоне. Обратный переход соответствует разгрузке периферии и сосредоточению рудных масс газопроницаемых материалов в центре ДП.

Номер системы подачи	Рекомендуемая последовательность подачи материалов в ДП
1	$\text{K}_2 \downarrow \text{HA}_2 \downarrow$
2	$\text{K}_2 \downarrow \text{HA}_2 \downarrow \text{H}$ или $\text{K}_2 \text{A}_2 \downarrow \text{H}$
3	$\text{KA}_2 \text{K} \downarrow \text{H}$
4	$\text{A}_2 \text{K}_2 \downarrow \text{H}$
5	$\text{КАКА} \downarrow \text{H}$
6	$\text{АКАК} \downarrow \text{H}$
7	$\text{АК} \downarrow \text{НАК} \downarrow \text{H}$

С учетом сказанного входной величиной системы автоматизированного управления распределением газового потока следует считать номер рекомендуемой системы загрузки. В этом случае рабочая статистическая характеристика системы будет иметь вид

$$M_2 \approx -aN + b, \quad (4.3)$$

где $a \approx 0,4 \div 0,7$.

Переход от системы загрузки с меньшим номером к системе с большим способствует повышению тепловой экономичности работы печи, но одновременно приводит и к снижению производительности и наоборот.

Автоматически изменяя значение N в небольших пределах можно поддерживать оптимальную выходную величину M_2 для данной печи при технологических возмущениях, влияющих на величины a и b в (4.3).

Например, для системы загрузки $5A_2K_2 \downarrow H_2KA_2K \downarrow H$ величина

$$N = \frac{5 \cdot 4 + 2 \cdot 3}{7} = 3,71.$$

Для системы загрузки $5A_2K_2 \downarrow HKA_2K \downarrow H$

$$N = \frac{6 \cdot 4 + 1 \cdot 5}{7} = 4,14 \text{ и т.д.}$$

Информация о распределении содержания CO_2 по радиусу ДП, полученная с использованием информационного зонда, может быть использована в автоматизированной системе управления газодинамическим режимом.

4.2.1. Управление загрузкой шихтовых материалов в ДП при использовании двухконусного засыпного устройства

На многих отечественных печах для загрузки шихтовых материалов используются двухконусные засыпные аппараты, позволяющие периодически загружать шихту в ДП, находящуюся под давлением.

Два скипа в соответствии с заданной программой загрузки поочередно по наклонной эстакаде доставляют шихту на колошник ДП. Затем шихта поступает в приемную воронку малого конуса двухконусного засыпного аппарата.

Схема работы двухконусного засыпного аппарата и схема работы уравнительных клапанов при реализации загрузки материалов в печь представлены на рис. 14.

Система загрузки доменной печи при подаче шихтовых материалов предусматривает строгую последовательность во времени включения механизмов, выполняющих технологические операции по транспортировке шихты из расходных бункеров к скиповым подъемникам ленточными транспортерами.

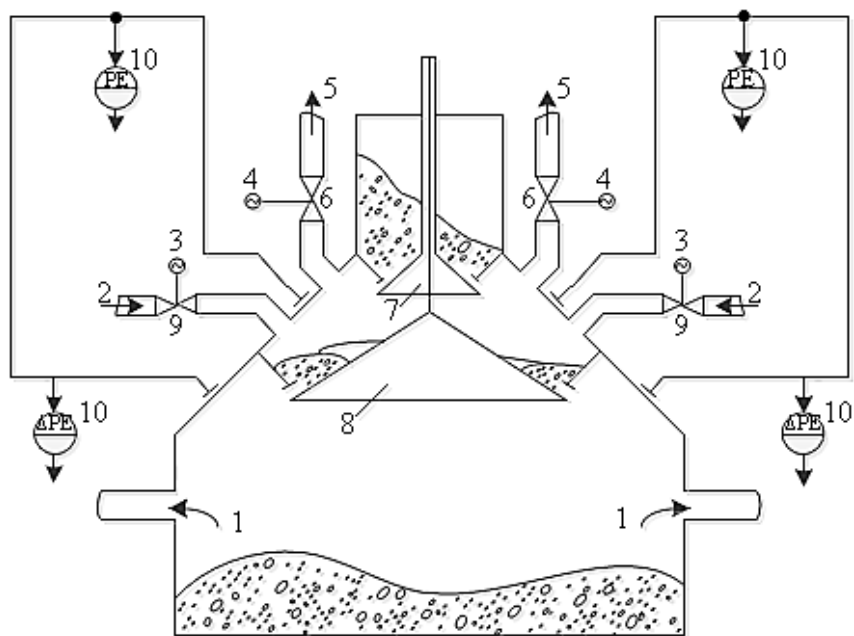


Рис. 14. Схема работы двухконусного засыпного аппарата и работа уравнивающих клапанов при загрузке материалов в ДП:

- 1 – газоотводы колошникового газа; 2 – газоотводы очищенного доменного газа для заполнения межконусного пространства перед опусканием большого конуса; 3 – исполнительные механизмы уравнивающих наполнительных клапанов 9;
- 4 – исполнительные механизмы уравнивающих атмосферных клапанов 6;
- 5 – свечи для сброса давления из межконусного пространства;
- 6, 9 – клапаны; 7 – малый конус; 8 – большой конус;
- 10 – сигнализаторы датчика давления и перепада давлений

Операции по транспортировке шихты следующие:

- набор кокса из коксовых бункеров в весовые воронки с одновременным отсеком коксовой мелочи на грохотах;
- взвешивание массы кокса в весовой воронке с регистрацией массы и коррекцией по влажности кокса;
- набор агломерата и шлакообразующих добавок из бункеров в весовые воронки;
- взвешивание массы агломерата и добавок с регистрацией;
- загрузка в скипы кокса и руднофлюсовых материалов из весовых воронок в определенном порядке;

- управление работой скиповой лебедкой (пуск, ускорение, замедление, остановка);
- выравнивание давления в межконусном пространстве до атмосферного путем открытия уравнительных клапанов 4 (см. рис. 14) перед опусканием малого конуса;
- перемещение на следующую станцию вращающего распределителя шихты (ВРШ) перед опусканием малого конуса;
- опускание малого конуса после завершения перемещения ВРШ (при подаче каждого скипа с шихтовыми материалами) по заданной программе загрузки;
- выравнивание давления в межконусном пространстве с давлением на колошнике под большим конусом путем подачи очищенного доменного газа при открытии наполнительных клапанов 3 (см. рис. 14);
- измерение уровня засыпи;
- поднятие информационных шомполов;
- опускание большого конуса для загрузки «подачи» в доменную печь.

Вращающий распределитель шихты (ВРШ) распределяет шихтовые материалы в соответствии с заданным режимом загрузки по окружности колошника путем соответствующего распределения материалов на большом конусе.

При высыпании материалов шихты из скипа в воронку малого конуса всегда наблюдается характерная неравномерность уровня материала (см. рис. 14). Программа работы ВРШ предусматривает изменение угла поворота (станции) после каждого скипа.

Если ВРШ имеет шесть станций (т.е. на поверхности большого конуса размещается шесть скипов и угол между станциями составит 60°), то после первого скипа поворот не происходит, при втором скипе воронка малого конуса ВРШ перемещается на 60° и далее после каждого скипа на 120° , 180° . Затем поворачивается в обратном направлении на 120° и 60° .

После загрузки шести скипов и опускании большого конуса цикл повторяется. Число станций ВРШ на новых доменных печах может быть 12 или даже 24.

Управление системой загрузки осуществляется в программно-заданном режиме с использованием программно-логического командоконтроллера программы (ККП) и командоконтроллера циклов подач (ККЦ). ККП устанавливает очередность загрузки материалов в скипы, а ККЦ – чередование подач в цикле загрузки.

Порядок работы механизмов загрузки регламентируется наличием соответствующих логических блокировок, которые обеспечивают включение механизмов в работу в строго заданной последовательности.

Функции блокировок выполняет ККП.

Автоматическая программно заданная работа всех механизмов загрузки при транспортной подаче шихты в скип происходит в строгой последовательности.

Включение пластинчатого транспортера для подачи горячего агломерата происходит после отправки очередного скипа с агломератом при наличии агломерата в соответствующем расходном бункере, уровень заполнения в котором контролируется уровнемером, и установки перекидного лотка в положение загрузки заданной весовой воронки.

После набора заданной массы в воронку транспортер останавливается. Затвор весовой воронки автоматически открывается при выполнении следующих условий:

- рудный скип установлен в скиповой яме;
- в воронку загружена заданная масса агломерата;
- пластинчатый транспортер агломерата не работает;
- по заданной программе загрузки в печь необходимо с очередным скипом подать агломерат.

Аналогичные условия должны выполняться и при загрузке различных добавок и шлакообразующих материалов доменной шихты.

Автоматическая программно реализуемая загрузка кокса из расходных бункеров в скипы осуществляется при помощи коксового грохота и весовой воронки.

После закрытия затвора весовой воронки кокса автоматически включается грохот, который одновременно служит затвором коксового бункера, и начинается заполнение весовой воронки отдельным от мелочи коксом крупной фракции. По достижении заданной массы кокса с учетом поправки на влажность кокса грохот останавливается.

Сигнал на разрешение загрузки кокса в скип из весовой воронки формируется ККЦ при выполнении следующих условий:

- если скип стоит в скиповой яме в крайнем нижнем положении;
- если предыдущий скип защищен программой ККП и находится в позиции загрузки кокса;
- грохот прекратил подачу кокса в весовую воронку после набора заданной массы;
- в весовой воронке находится заданная масса кокса с учетом поправки на влажность.

При движении очередного скипа с материалами вверх на колошник открываются уравнительные клапаны малого конуса для выравнивания давления в межконусном пространстве с атмосферным. Выполнение этого условия контролируется сигнализаторами разности (перепада) давлений *10* (см. рис. 14).

ВРШ по команде ККП поворачивается на заданный угол, после выгрузки шихты в воронку малого конуса из скипа, материал высыпается на поверхность большого конуса при опускании малого конуса. Малый

конус поднимается для приема порции следующего скипа и т.д. до шести скипов по заданной программе загрузки.

Разрешающий автоматический сигнал на опускание большого конуса формируется при выполнении следующих условий:

- при поступлении от уровнемеров засыпи шихты сигнала о необходимом и безопасном опускании шихты на уровень, обеспечивающий нормальное опускание большого конуса;
- оба автоматических шомпола подняты и находятся в крайних верхних положениях;
- произведено выравнивание давления в межконусном пространстве и давлении в печи от сигнализатора перепада давлений 10 (см. рис. 14).

При соблюдении всех условий большой конус опускается и содержимое загружается в печь по контролируемой ККП программе в цикле заданной ККЦ.

Автоматическая система управления загрузкой строго контролирует соблюдение условия: в момент опрокидывания груженого скипа на колошнике порожний скип находится в начальном положении скиповой ямы и ККП сформирована команда на его загрузку по заданной программе.

При использовании на ДП двухконусной системы загрузки оперативный контроль за работой автоматической системы управления загрузкой шихты в доменную печь осуществляется по специальному сигнальному информационному табло или по изображению на экране монитора, установленного в помещении центрального пульта управления процессом доменной плавки.

4.3. Автоматизация управления загрузкой шихты в доменную печь при использовании бесконусного загрузочного устройства лоткового типа

Управление сверху является основным приемом достижения максимального использования тепловой и восстановительной энергии газового потока при интенсивном ведении плавки и ровном устойчивом ходе материалов. Компоненты шихты состоят из кусков различной величины и формы. Поры между кусками образуют сообщающиеся между собой извилистые каналы, по которым движутся газы, совершая тепловую и восстановительную работу. Важными характеристиками шихтовых материалов являются сегрегация при ссыпании, в результате которой более крупные куски скатываются в периферийную зону, а мелкие в центральную, и склонность образовывать при ссыпании конус, форма которого характеризуется углом естественного откоса материала. Этими свойствами материалов пользуются для перераспределения газов в печи.

На движение и распределение газов существенное влияние оказывает перераспределение материалов при их опускании – усадка, выкли-

нивание кокса к стенкам печи, а рудной части к осевой зоне. Газопроницаемость печи определяется положением и формой зоны размягчения (пластичности) железорудных материалов, куда они поступают в процессе схода и нагрева шихты. Под зоной пластичности пространство печи заполнено жидкими фазами и коксовой насадкой. Опусканию материалов препятствует сопротивление подпора восходящего газового потока, сил внешнего трения о стенки печи, внутреннего трения между кусками, выталкивания из жидкой фазы частично погруженного в него столба шихты. В свою очередь, восходящий газовый поток оказывает большое влияние на распределение газов вследствие разрыхления и увеличения порозности в слоях материалов. В результате устойчивость схода материалов определяется активным весом столба шихты.

Многочисленные исследования, проведенные с помощью «зондирования» действующих доменных печей и изучения столба шихты после охлаждения печей, подтверждают тот факт, что ход доменной плавки в значительной степени определяется динамической структурой сформированного столба шихтовых материалов в сухой и пластической зонах. Основными показателями структуры столба шихты являются удельные характеристики распределения материалов и газов, которые определяют температурно-тепловой и физико-химический режимы по высоте и сечению печи.

Нормальная работа печи характеризуется ровным ходом, основными признаками которого являются:

1) плавный и устойчивый сход шихтовых материалов с установленными скоростями по всему сечению печи;

2) стабильное заданное распределение материалов по сечению печи, обеспечивающее максимальное использование физической и химической энергии газового потока и, следовательно, минимальный для данных условий плавки расход энергоресурсов;

3) устойчивое тепловое состояние, обеспечивающее выплавку чугуна заданного состава;

4) постоянные параметры газодинамического режима – теоретическая температура горения, кинетическая энергия дутья и скорость газа в шахте;

5) ритмичная выдача продуктов плавки.

Количество газов, проходящих через слой различных материалов при одинаковых потерях напора, значительно различается. В зонах с высокой газопроницаемостью количество газов на единицу шихты больше, чем это необходимо для тепловой и восстановительной работы. Газ покидает эти зоны с запасом энергии, для создания которой было израсходовано металлургическое топливо. В зонах с низкой газопроницаемостью количество газа недостаточно, материалы приходят в нижние горизонты печи неподготовленными и требуют для завершения процессов нагрева и восстановления дополнительного расхода кокса.

Для быстрого опускания материалов и лучшего использования газа шихта должна быть рациональным образом распределена на колошнике.

У стен и в центре печи необходимо в относительно большем количестве располагать кусковые материалы (кокс и крупные фракции агломерата), а в промежуточной зоне сосредоточивать более мелкую железосодержащую часть шихты. При таком распределении шихты увеличивается поток газа в осевой и периферийной зонах печи, облегчается сход материалов и их обработка газом в промежуточной зоне.

Чрезмерное разрыхление периферийной зоны на широком кольце приводит к снижению использования тепловой и восстановительной способностей газа, к загромождению осевой зоны, похолоданию горна и неровному сходу шихты, к преждевременному выходу из строя холодильников и кладки шахты из-за неустойчивости гарнисажа. Чрезмерное раскрытие центра печи также приводит к снижению использования газа и неустойчивому ходу печи.

Возможность добиться наиболее оптимальных соотношений между периферийным и осевым потоками газа создает условия для плавного опускания равномерно обработанных шихтовых материалов, что позволяет снизить тепловые нагрузки на футеровку, исключить преждевременный выход из строя холодильников и прогар воздушных фурм.

Переход на подготовленную шихту (агломерат, окатыши), повышение давления газов под колошником, увеличение диаметра колошника обусловили необходимость повышения эффективности систем загрузки шихты. На современных доменных печах операции по дозированию и формированию порций шихтовых материалов, транспортировке их на колошник и загрузке в печь полностью автоматизированы.

Основные требования к загрузочному устройству печи:

- загрузка подготовленных порций шихты с необходимым резервом по производительности;
- возможность эффективного управления распределением материалов по сечению колошника;
- обеспечение герметичности рабочего пространства печи;
- обеспечение взрывопожаробезопасности и защиты атмосферы;
- стойкость в условиях абразивных потоков шихтовых материалов и запыленных газов при больших динамических и термических нагрузках;
- ремонтпригодность.

В мировой практике наиболее распространены модификации следующих поколений загрузочных устройств:

- двухконусный засыпной аппарат с вращающимся распределителем шихты, колошниковая защита – стационарная;
- то же загрузочное устройство в комплекте с подвижными плитами колошника;
- бесконусное загрузочное устройство (БЗУ) с лотковым распределителем шихты в рабочем пространстве печи над поверхностью засыпи.

4.3.1. Достоинства БЗУ по сравнению с двухконусными аппаратами

При использовании двухконусного аппарата шихтовые материалы, сыпаясь с большого конуса, располагаются на поверхности засыпи сплошными кольцами. Такую технологию можно отнести к технологии кольцевых загрузок. На расположение колец шихты на поверхности засыпи при этом влияет несколько факторов, главными из которых являются высота уровня засыпи, объем порций и последовательность загружаемых материалов по видам.

Как показала практика эксплуатации двухконусных аппаратов, они не обеспечивают достаточно равномерной и эффективной загрузки. Это связано прежде всего с тем, что окружная неравномерность по массе и гранулометрическому составу шихты, образующаяся при накоплении материалов на большом конусе, сохраняется во время выгрузки их в печь. Кроме того, из-за выгрузки шихты с большого конуса по практически постоянной траектории не удается эффективно воздействовать на формирование профиля шихты по радиусу печи.

Технологические возможности двухконусных аппаратов были расширены благодаря появлению подвижных колошниковых плит, с помощью которых появилась возможность подгружать центральную часть печи, но это техническое решение связано с установкой на печи дополнительного довольно сложного оборудования.

Ограниченные возможности двухконусных аппаратов явились предпосылкой к созданию бесконусных загрузочных устройств лоткового типа. Их широкое распространение ознаменовало новый этап в развитии техники и технологии загрузки доменных печей. Эти аппараты не имеют запорных конусов, а в качестве распределителя шихты в них используют вращающийся лоток, способный также изменять угол наклона к горизонту. При загрузке шихтовых материалов в печь с помощью лотка осуществляется так называемая технология струйной или однопоточной загрузки. Наибольших успехов в создании лотковых аппаратов добилась фирма «Paul Wurth», Люксембург. Ее аппараты установлены более чем на 160 доменных печах в различных странах мира.

Благодаря применению лотковых аппаратов значительно улучшена технология доменного производства. Прежде всего, снижена окружная неравномерность распределения шихтовых материалов, обеспечено получение заданного профиля загрузки. Важнейшим преимуществом лотковых аппаратов является возможность секторной и точечной загрузки. При использовании БЗУ достигается снижение удельного расхода кокса на 3-5 % и на столько же увеличивается производительность печи [9].

В настоящее время лотковые аппараты признаны наивысшим достижением в технике загрузки доменных печей. Однако эти загрузочные устройства не лишены недостатков. Основным из них является достаточ-

но большая продолжительность ссыпания одной порции материала с лотка и связанная с этим ограниченная производительность загрузки. Кроме того, сохраняется неравномерность по гранулометрическому составу в процессе выгрузки одной порции шихтовых материалов из промежуточных емкостей, которая затем переходит в окружную неравномерность. При низкой скорости ссыпания шихтовых материалов шихта фактически укладывается на изменяющийся уровень засыпи, что затрудняет эффективное управление загрузкой.

Основным достоинством такого устройства является то, что с помощью БЗУ имеется возможность вести управляемое, эффективное распределение шихтовых материалов на колошнике доменной печи по заданной программе загрузки, что в конечном итоге позволяет повысить производительность и снизить затраты на 1 т выплавленного чугуна.

Бесконусное загрузочное устройство расширяет возможности оператора печи в глубоком регулировании распределения шихты и в управлении шихтовым потоком.

Основным режимом загрузки на печах, оборудованных бесконусным загрузочным устройством, является многокольцевой цикл с подачей определенного количества кокса в осевую зону колошника. Эта обеспечивает наиболее равномерное окружное распределение материалов и такую укладку их по радиусу колошника, при которой содержание CO_2 сохраняется почти постоянным по большей части радиуса, заметно понижаясь только у стенки колошника и в его осевой зоне, где создаются благоприятные условия для более интенсивного развития газового потока. Ширина этих зон устанавливается такой, чтобы при существующей шихте и заданной интенсивности плавки получить максимальную степень использования восстановительной способности газа.

При существенных изменениях шихтовых условий, в первую очередь гранулометрии и прочностных характеристик железорудных материалов и кокса, а также при обнаружении признаков усиления периферийного или центрального хода печи необходимо соответствующим образом изменять режим загрузки.

В печи могут развиваться осевой или периферийный ходы, ход каналами, обрывами. Предупреждать или ликвидировать эти нарушения можно только согласованием режимов загрузки и газодинамики в нижней и в верхней частях печи.

Регулирование распределения газового потока по окружности печи производится изменениями программы работы вращающегося распределителя шихты, изменениями дутьевого режима, корректировкой состава шихты и величин рудной нагрузки. При этом большая часть мелких железорудных материалов грузится в сектор с повышенной температурой. На печах с бесконусным загрузочным устройством для такого регулирования применяется секторный режим.

Различного рода нарушения в загрузке шихтовыми материалами, наряду с другими причинами, могут вызвать тяжелые расстройства в работе доменной печи – холодный ход, горячий ход, ход с обрывами и подвижениями шихты, загромождение горна, образование на стенках настывлей.

Эффективное использование бесконусных загрузочных устройств с возможностью гибкого регулирования радиального распределения шихтовых материалов на колошнике потребовало разработки и математического описания основных критериев управления загрузкой, методов расчета программ загрузки, исследования и систематизации взаимосвязей между параметрами загрузки и показателями работы печи. Решающее значение приобрели объем и качество информации о точности реализации заданной программы загрузки, профиле и распределении скорости схода шихты, температуре и интенсивности газового потока.

Практика показала актуальность оснащения новых и реконструируемых мощных доменных печей БЗУ с лотковым распределителем [13, 14]. БЗУ по сравнению с традиционным конусным распределителем имеют несомненные технико-экономические преимущества в части возможностей управляемого распределения шихтовых материалов по всей поверхности колошника и существенного улучшения за счет использования химической и тепловой энергии газового потока эффективности работы доменных печей.

Экономия кокса и увеличение производительности печи при установке БЗУ по сравнению с конусным загрузочным устройством составляют $3\div 7\%$, снижаются простои печи из-за неисправностей по загрузке более чем в 2 раза, экономятся расходы на обслуживание и ремонты на 50 %, возрастает длительность кампании печи на 20 %. БЗУ имеет меньшие массу и габариты, отличаются компактностью и универсальностью заменяемых узлов и механизмов. Ориентированный подвод шихты на колошник по лотку снижает дополнительную измельчаемость материалов при загрузке и их сегрегацию. Вместе с этими преимуществами установка БЗУ при реконструкции печи требует больших единовременных затрат. Окупаемость дополнительных капитальных вложений на БЗУ по сравнению с конусным вариантом составляет за счет изложенных выше технико-экономических преимуществ примерно 3 года.

4.3.2. Устройство, краткое описание бесконусного загрузочного устройства лоткового типа, порядок работы

1. Устройство БЗУ и возможности распределения материалов.

Опыт эксплуатации доменных печей большого объема свидетельствует, что конусные загрузочные устройства не удовлетворяют в полной мере требованиям технологии распределения шихтовых материалов при загрузке в печь, их функциональные возможности ограничены. Поэтому основные тенденции развития в этой области связаны в настоящее время с созданием и использованием БЗУ лоткового типа, которые существенно расширяют технологические возможности загрузки шихтовых материалов в доменную печь. Устройство БЗУ лоткового типа представлено на рис. 15.

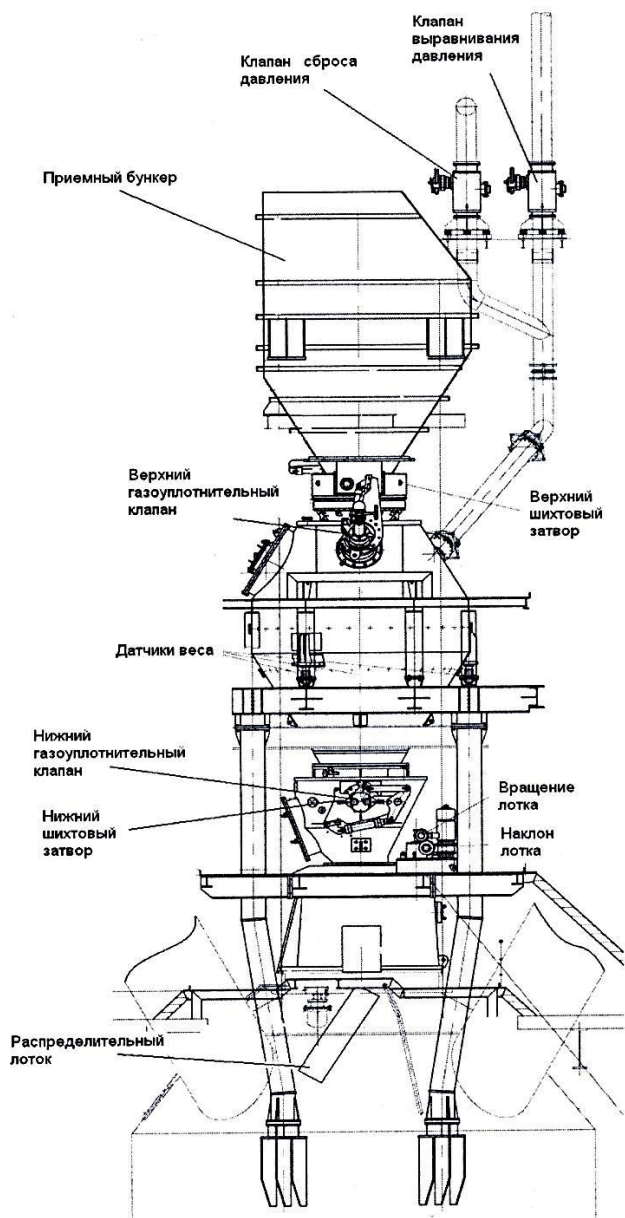


Рис. 15. Бесконусное однотоковое загрузочное устройство лоткового типа

Основным достоинством такого устройства является то, что с помощью БЗУ имеется возможность вести управляемое, эффективное распределение шихтовых материалов на колошнике доменной печи по заданной программе загрузки, что в конечном итоге позволяет повысить производительность и снизить затраты на 1 т выплавленного чугуна.

Управление распределением шихтовых материалов производится наклоном и вращением распределительного лотка БЗУ.

БЗУ позволяет реализовать следующие виды распределения материалов, загружаемых в печь:

1) кольцо – равномерное распределение материалов по окружности колошника при неизменном угле наклона лотка;

2) спираль – отличается от кольцевой загрузки изменением угла наклона во время загрузки;

3) сектор – распределение материалов производится колебаниями лотка в заданном секторе колошника;

4) точка – лоток позиционируется в заданное положение, после чего производится загрузка материала.

Как было отмечено ранее, основные концептуальные и конструктивные решения, реализация технических идей БЗУ принадлежит фирме «Paul Wurth», Люксембург [10]. Заметный вклад в теоретическое обоснование и разработку конструкций БЗУ лоткового типа внесли ученые и изобретатели России [9, 11, 12].

Созданы два типа отечественных БЗУ: однотоковое с одним центральным бункером, полезная вместимость которого рассчитывается на объем шихты двух-трех скипов; двухтоковое с двумя бункерами, каждый из которых рассчитывается на прием шихты в объеме полезной вместимости двух скипов. При установке однотоковых БЗУ достигается экономия 20-25% первоначальных капиталовложений, однако увеличивается время возможных вынужденных простоев печи при ремонтах отдельных узлов БЗУ в процессе эксплуатации со снижением ее производительности.

При применении двухтокового БЗУ возрастают капитальные вложения, но увеличивается эксплуатационное время работы печи, т.к. имеется возможность организации ремонтов отдельных узлов БЗУ (например, уплотнительных колец газовых клапанов) на ходу без остановки печи. Поэтому окончательное решение по выбору типа БЗУ должно принимать предприятие в соответствии с местными традициями и практикой эксплуатации доменных печей.

По мнению специалистов Гипромеца г. Магнитогорска, однотоковые БЗУ целесообразно применять для печей с полезными объемами 1500-2000 м³, а двухтоковые – для более крупных печей, простои которых в процессе эксплуатации будут связаны с большими потерями производства.

При выборе геометрической вместимости бункеров следует исходить из необходимости такого регулирования ссыпания шихты из них, при котором может быть гарантирована укладка распределительным лотком 10-11 колец шихтового материала за время разгрузки шихтового бункера. Как правило, скорость вращения распределительного лотка принимается 48 град/с, т.е. один оборот за 7,5 с. Это значит, что при определении полезной вместимости шихтового бункера следует исходить из оптимального времени его регулируемой разгрузки в течение 75-82 с. Это требование относится в одинаковой степени к шихтовым бункерам одно- и двухтрактовых БЗУ. Суммарное время на один цикл загрузки порции шихты из двух скипов в печь, включая время на открытие и закрытие соответствующих клапанов, выравнивание давления и додавливание и регулируемую разгрузку шихтового бункера составляет 300-320 с (в нормальном режиме работы) и 150-180 с (в режиме догонки).

Чистое время регулируемой разгрузки шихтового бункера составляет 25-30% от расчетного времени загрузки данной порции шихты в печь. Поэтому, исходя из суточного производства чугуна и потребности в шихте, определяют количество двух скиповых порций шихты (или соответствующий объем шихты при конвейерной загрузке бункера) и объемную производительность загрузочного устройства.

Производными от геометрической вместимости шихтового бункера являются: габариты загрузочного устройства, его высота и связанные с этим изменения в конструкции копрового устройства и наклонного моста; расход энергоносителей, обеспечивающие технологичность работы, взрывобезопасность и экологическую безопасность БЗУ.

Работа, направленная на снижение общей высоты БЗУ, ведется в основном за счет изменения конфигурации устройства и уменьшения габаритов грузовых и газоплотнительных клапанов, т.к. высоты приемных воронок и шихтовых бункеров, определенные с учетом их геометрической вместимости и обеспечения схода шихтовых материалов, являются минимально возможными.

Высоту двухтрактового БЗУ частично снижают, применяя наклонные течи и размещая на них газоплотнительные клапаны. Такая же конфигурация асимметричного расположения шихтового бункера с наклонной верхней загрузочной точкой и установкой на ней газоплотнительного клапана, обеспечивающая некоторое уменьшение высоты устройства, показана для одкотраковых БЗУ. Поэтому главным резервом снижения высоты БЗУ является поиск уменьшения высоты грузовых и газоплотнительных клапанов. Грузовые клапаны применяются в БЗУ, как правило, секторного типа, в которых лепестки секторов отводятся в боковые пазухи, чем достигается минимизация высоты грузового клапана и загрузочного устройства в целом. Газоплотнительные клапаны имеют тарельчатую конструкцию с резиновыми или металлическими уплотнительными элементами. Их базовая высота зависит от диаметра тарели.

Одним из важнейших вопросов работы БЗУ является регулирование разгрузки шихты из бункеров. На двухтрактовых БЗУ равномерный сход шихты регулируется секторной заслонкой, установленной на боковой восьмиугольной течке. Восьмиугольная форма и размеры течки определяются эмпирически. Здесь также применяется известный из теории разгрузки бункеров принцип, что более высокая степень регулирования потока сыпучих материалов будет иметь место при меньшем их давлении на заслонку регулирующего клапана. На однотрактовых БЗУ, с центральным расположением бункера, такой способ разгрузки неприемлем. Здесь наиболее рациональным является метод центрального вертикального истечения материала.

Важной характеристикой загрузочных устройств различных типов является их потребность в энергоносителях, главным образом в азоте и воде, т.к. расходы электроэнергии, осушенного сжатого воздуха для средств автоматизации и смазочных материалов различными типами загрузочных устройств существенно не различаются, расход природного газа для наддува в камеру установки редуктора БЗУ практически отсутствует, т.к. он является резервным энергоносителем.

Азот в загрузочных устройствах всех типов применяется для обеспечения их экологической безопасности, а в БЗУ также для наддува в камеру установки редуктора вращения и наклона распределительного лотка, для продувки форсунок аварийного охлаждения подкупольного пространства печи, для обдува газовых клапанов с резиновым уплотнением.

2. Описание БЗУ.

Однотрактное бесконусное загрузочное устройство имеет следующие основные узлы (см. рис. 15):

1. Приёмный бункер. Служит для хранения материалов, поступающих с бункерной эстакады (объём $27 \text{ м}^3 - 2$ скипа).

2. Верхний шихтовый затвор. Применяется для выгрузки материалов из приёмного бункера в шихтовый бункер.

3. Верхний газоплотнительный клапан. Изолирует шихтовый бункер от атмосферы.

4. Шихтовый бункер. В нём хранится материал, загружаемый в печь (объём 35 м^3).

5. Нижний шихтовый затвор. Регулирует расход шихты, поступающей из шихтового бункера.

6. Нижний газоплотнительный клапан. Изолирует шихтовый бункер от доменной печи, предотвращая проникновение в него доменных газов при заполнении бункера шихтой.

7. Распределительный лоток. Распределение шихты в доменной печи осуществляется данным устройством путем его наклона и вращения. Наклон может производиться вне зависимости от вращения.

8. Клапан сброса давления. Позволяет выравнять давление в шихтовом бункере с атмосферным.

9. Клапан выравнивания давления. Позволяет выравнивать давление в шихтовом бункере с давлением в печи.

Такая конструкция БЗУ позволяет накапливать и распределять одновременно два вида материала: кокс и железорудную шихту. Например, в шихтовом бункере находится кокс, а в приёмном – железорудная шихта. После выгрузки кокса в шихтовый бункер из приёмного загружается шихта, верхний шихтовый затвор и верхний газоплотнительный клапан закрываются. Затем в приёмный бункер загружается кокс, пока из шихтового выгружается железорудная шихта.

3. Работа механизмов БЗУ (основная последовательность):

- материал с бункерной эстакады скиповым подъёмником подаётся в приёмный бункер;

- когда шихтовый бункер пуст и давление в нём выровнено с атмосферным, происходит открытие верхнего газоплотнительного клапана и верхнего шихтового затвора;

- материал из приёмного бункера выгружается в шихтовый бункер (конец выгрузки определяется по таймеру или по сравнению веса материала, загруженного в скип (скипы), с весом материала в шихтовом бункере, измеренным весовой системой БЗУ);

- закрываются верхний шихтовый затвор и верхний газоплотнительный клапан;

- открывается клапан выравнивания давления, происходит выравнивание давления в шихтовом бункере с давлением под БЗУ (печным);

- открывается нижний газоплотнительный клапан;

- по программе загрузки лоток позиционируется на заданную станцию наклона и при заданном угле поворота открывается на рассчитанный угол нижний шихтовый затвор;

- производится распределение материала порциями по заданным станциям (радиальным кольцам) колошника (позиционирования лотка по станциям). При кольцевой загрузке при переходе от станции к станции шихтовый затвор закрывается, при спиральной загрузке – не закрывается. Если задано секторное распределение, то материал выгружается в заданный сектор колебательными движениями лотка. Если задана точечная загрузка, то лоток позиционируется на заданные углы наклона и поворота;

- после окончания распределения материала (определяется весовой системой БЗУ) нижний шихтовый затвор и нижний газоплотнительный клапан закрываются;

- открывается клапан сброса давления, происходит выравнивание давления в шихтовом бункере с атмосферным;

- открывается верхний газоплотнительный клапан;

- открывается верхний шихтовый затвор.

Далее последовательность повторяется.

4.3.3. Функциональная схема автоматического контроля и управления загрузкой ДП с использованием БЗУ лоткового типа

Функциональная схема автоматического контроля и управления загрузкой доменной печи при использовании БЗУ лоткового типа представлена на рис. 16, спецификация средств автоматизации к рис. 16 приведена в табл. 8.

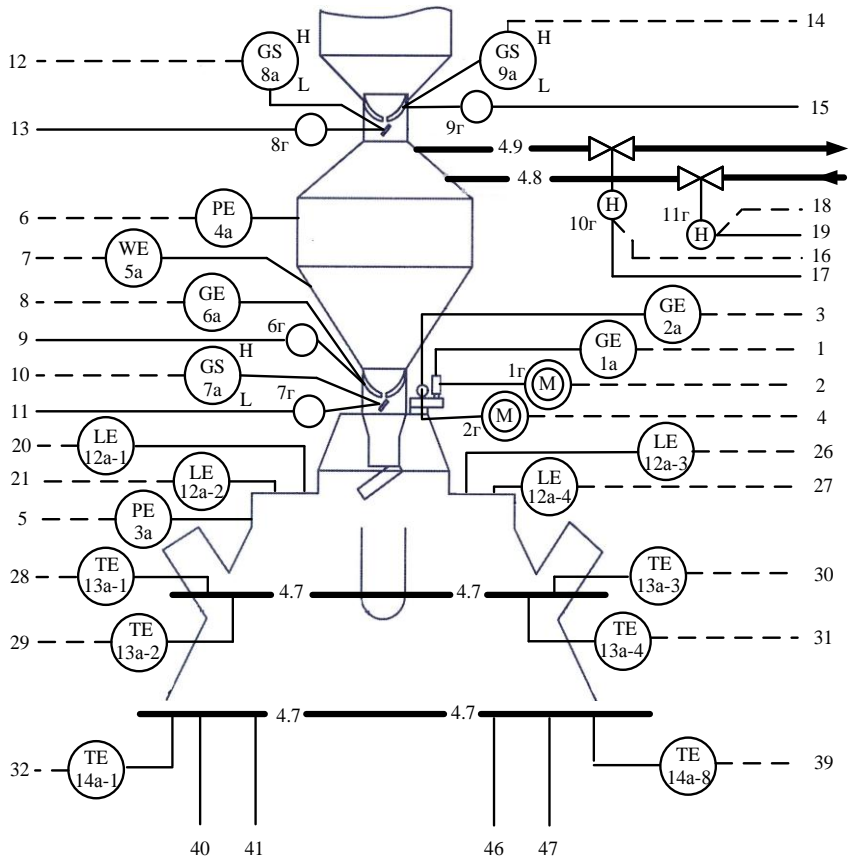


Рис. 16. Функциональная схема автоматического контроля и управления бесконусной загрузкой материалов (начало):

- 4.7 – доменные газы по периферии и на колошнике;
- 4.9 – газопровод для сброса давления;
- 4.8 – газопровод для выравнивания давления

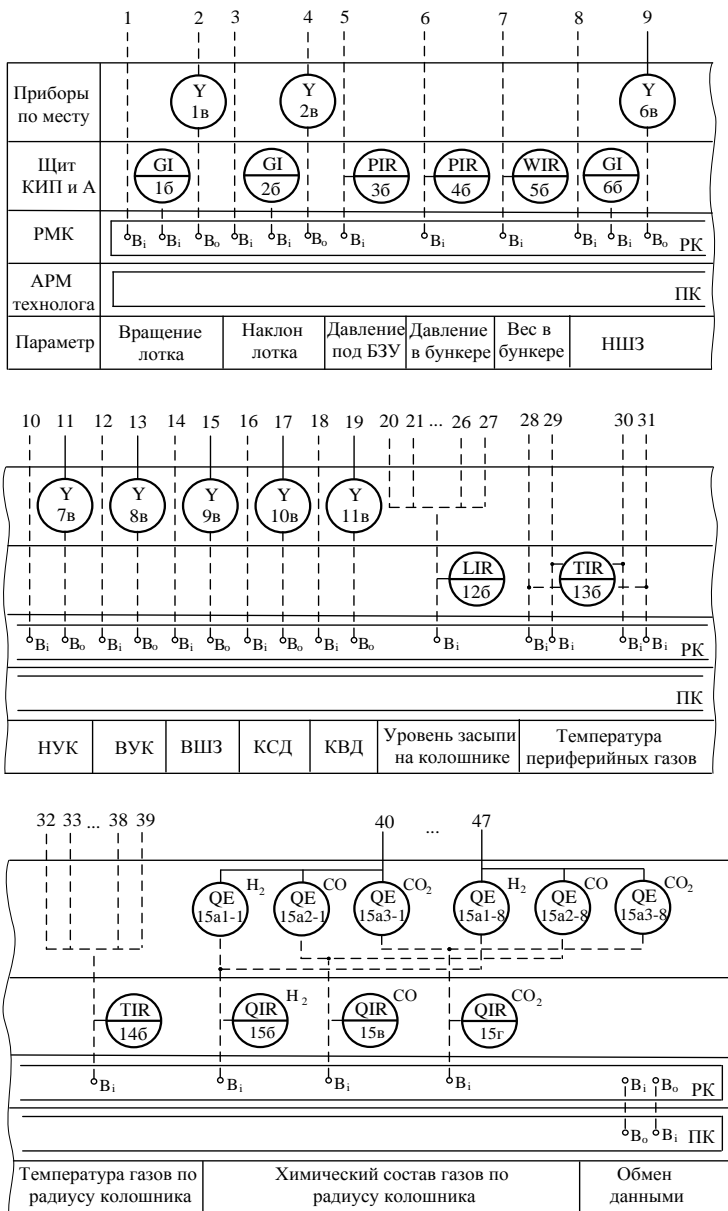


Рис. 16. Функциональная схема автоматического контроля и управления бесконусной загрузкой материалов (окончание)

Схема автоматизации и контроля верхней загрузки доменной печи предусматривает:

1а – 1г – управление вращением лотка БЗУ и индикация текущего угла поворота;

2а – 2г – управление наклоном лотка БЗУ и индикация текущего угла наклона;

3а, 3б – измерение и регистрация давления под БЗУ;

4а, 4б – измерение и регистрация давления в шихтовом бункере БЗУ;

5а, 5б – измерение и регистрация веса шихтового бункера;

6а – 6г – управление углом открытия нижнего шихтового затвора (НШЗ) и индикация текущего угла открытия;

7а – 7г – управление открытием нижнего газоуплотнительного клапана (НУК);

8а – 8г – управление открытием верхнего газоуплотнительного клапана (ВУК);

9а – 9г – управление открытием верхнего шихтового затвора (ВШЗ);

10а – 10г – управление открытием клапана сброса давления (КСД);

11а – 11б – управление открытием клапана выравнивания давления (КВД);

12а, 12б – измерение и регистрация уровня засыпи на колошнике;

13а, 13б – измерение и регистрация температуры периферийных доменных газов;

14а, 14б – измерение и регистрация температуры доменных газов по радиусу колошника;

15а – 15е – измерение и регистрация содержания H_2 , CO , CO_2 в отходящих по радиусу колошника.

Условия заполнения и разгрузки шихтового бункера и дискретные сигналы, формируемые при этом:

1) Условия заполнения бункера (см. рис. 16):

– бункер пуст (определяется весовой системой БЗУ – 5а);
– клапан выравнивания давления закрыт (концевой выключатель – 11г);

– клапан сброса давления открыт (концевой выключатель – 10г);

– давление с атмосферой выровнено (ноль по датчику давления – 4а);

– нижний газоуплотнительный клапан закрыт (концевой выключатель – 7а);

– нижний шихтовый затвор закрыт (ноль по датчику положения – 6а).

2) Условия разгрузки шихтового бункера:

– бункер заполнен (определяется весовой системой БЗУ – 5а);

– давление в бункере выровнено с печным (разница между показаниями датчиков 3а и 4а меньше уставки – обычно 15 кПа);

- уровень засыпи на колошнике не превышен (определяется радиолокационными уровнемерами – 12а-1, ..., 12а-4);
- клапан сброса давления закрыт (концевой выключатель – 10в);
- верхний газуплотнительный клапан закрыт (концевой выключатель – 8а);
- лоток занял заданную позицию (по датчикам положения – 1а и 2а).

Таблица 1

Спецификация средств автоматизации к рис. 16

Позиция	Наименование	Кол-во	Примечание
1а, 2а	Датчик положения	2	
3а, 4а	Преобразователь давления	3	
5а	Преобразователь массы	1	
6а	Датчик положения	1	
7а, 8а, 9а	Сигнализатор положений открыто-зарыто	3	
12а-1, ..., 12а-4	Радиолокационный уровнемер	4	
13а-1, ..., 13а-4	Термоэлектрический преобразователь	4	
14а-1, ..., 14а-8	Термоэлектрический преобразователь	8	
15а1-1, ..., 15а1-8	Газоанализатор содержания Н ₂	8	
15а2-1, ..., 15а2-8	Газоанализатор содержания СО	8	
15а1-1, ..., 15а1-8	Газоанализатор содержания СО ₂	8	
1б, 2б, 6б	Ручной задатчик	3	
3б, 4б, 5б	Вторичный регистрирующий прибор	3	
12б, 13б, 14б, 15б, 15в, 15г	Многоканальный регистрирующий прибор	6	
1в, 2в	Пускатель бесконтактный реверсивный	2	
6в, ..., 11в	Электропневматический преобразователь	6	
1г, 2г	Электропривод	2	
6г, ..., 11г	Пневматический механизм	6	
РК	Регулирующий микропроцессорный контроллер	1	
ПК	Промышленный компьютер	1	

Обозначения информационных сигналов отражены на функциональной схеме контроля и управления бесконусной загрузкой (см. рис. 16).

1. Верхний газоплотнительный клапан.
На открытие:
 - клапан выравнивания давления закрыт (концевой выключатель – 11г);
 - нижний газоплотнительный клапан закрыт (концевой выключатель – 7а);
 - давление с атмосферой выровнено (ноль по датчику давления – 4а).На закрытие:
 - верхний шихтовый затвор закрыт (концевой выключатель – 9а);
 - бункер не переполнен (определяется весовой системой БЗУ – 5а).
2. Верхний шихтовый затвор.
На открытие:
 - верхний газоплотнительный клапан открыт (концевой выключатель – 8а);
 - бункер пуст (определяется весовой системой БЗУ – 5а).На закрытие:
 - заданный вес набран (определяется весовой системой БЗУ – 5а).
3. Клапан сброса давления.
На открытие:
 - клапан выравнивания давления закрыт (концевой выключатель – 11г);
 - нижний газоплотнительный клапан закрыт (концевой выключатель – 7а).
4. Клапан выравнивания давления.
На открытие:
 - клапан сброса давления закрыт (концевой выключатель – 10г);
 - верхний газоплотнительный клапан закрыт (концевой выключатель – 8а).
5. Нижний шихтовый затвор.
На открытие:
 - нижний газоплотнительный клапан открыт (концевой выключатель – 7а);
 - уровень засыпи на колошнике не превышен (определяется радиолокационными уровнемерами 12а-1 ... 12а-4).На закрытие:
 - бункер пуст (определяется весовой системой БЗУ – 5а).
6. Нижний газоплотнительный клапан.
На открытие:
 - верхний газоплотнительный клапан закрыт (концевой выключатель – 8а);
 - клапан сброса давления закрыт (концевой выключатель – 10г);
 - клапан выравнивания давления открыт (концевой выключатель – 11г);
 - давление в бункере выровнено с печным (разница между показаниями датчиков 3а и 4а меньше уставки – обычно 15 кПа).

На закрытие:

– нижний шихтовый затвор закрыт (по датчику положения – ба).

Распределительный лоток. Угол наклона. Изменение угла наклона ($1-53^\circ$) разделено на 11 положений (1-е находится у центра, 11-е – у периферии).

Определение этих 11 положений осуществляется с помощью кривых падения материала и сравнением с доменными печами таких же размеров, оборудованными бесконусным загрузочным устройством. При загрузке доменной печи шихтой эти значения можно проверить и, при необходимости, скорректировать. Для каждого из 11 положений величина угла хранится в памяти управляющего устройства (обычно это программно-логический контроллер).

Из-за постоянного опускания столба шихты загрузка материалов происходит при разных уровнях засыпи, поэтому предусматривается производить коррекцию углов наклона лотка для каждого из 11 положений в соответствии с фактическим уровнем засыпи, определяемым радарными зондами (датчиками уровня). Для этих целей в памяти ПЛК хранится несколько наборов углов наклона. Каждый набор соответствует определенному диапазону уровня засыпи. При этом для различных видов шихты хранится соответствующий набор значений углов.

Для контроля текущего наклона лотка на приводе механизма наклона установлен датчик положения.

Вращение лотка. Положение лотка при вращении определяется угломерным датчиком положения. Датчик положения предназначен для обеспечения начала выгрузки шихты в печь и для загрузки её по секторам. Как правило, вращение лотка в автоматическом режиме не останавливается (для уменьшения механических напряжений на редукторе). Направление вращения изменяется при секторной загрузке или в обычном режиме через определенное количество выгрузок для равномерного износа лотка.

Нижний шихтовый затвор. Положение шихтового затвора, как и наклон лотка, определяется угломерным датчиком положения.

Угол открытия шихтового затвора при автоматической загрузке рассчитывается предварительно и осуществляется автоматически до требуемого положения.

При выгрузке материала из шихтового бункера нижний шихтовый затвор при открытии устанавливается на различное угловое положение в зависимости от типа шихты и схемы загрузки (число порций на каждую выгрузку). Для этого различные углы открытия хранятся в памяти ПЛК и на экран оператора выводятся в форме таблиц, например табл. 2. Каждый шихтовый затвор имеет свою собственную таблицу. В этих таблицах различные углы открытия α , град, соответствуют различным скоростям выгрузки Q , $\text{м}^3/\text{с}$.

Таблица 2

Таблица углов открытия шихтового затвора с соответствующими расходами материалов

КОКС	Угол [°]	К	0,47	Оцинк [кг/сек]			0,85	Порог по вибрации[кг]			УСТАНОВИТЬ НАЧАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ														
				0,10	0,15	0,20		0,40	0,45	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20		
Q [кг/сек]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
Научугол [°]	0,00	25,00	30,00	35,00	40,10	42,50	44,50	46,30	49,10	49,70	51,20	52,70	54,00	55,20	56,20	57,20	59,10	59,90	65,00	70,00	75,00	78,00	80,00	82,00	84,00
Темпшугол [°]	0,00	25,00	30,00	35,00	40,00	42,00	44,30	46,10	48,10	50,00	51,00	51,20	52,80	55,10	55,60	56,60	57,70	58,00	65,00	70,00	75,00	78,00	80,00	82,00	84,00

АЛЮМИНАТ	Угол [°]	К	1,75	Оцинк [кг/сек]			0,60	Порог по вибрации[кг]			УСТАНОВИТЬ НАЧАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ														
				0,15	0,20	0,25		0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	
Q [кг/сек]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
Научугол [°]	0,00	12,00	24,00	30,00	33,50	36,20	38,80	41,30	43,80	45,70	47,20	48,60	51,20	52,80	54,20	55,40	56,50	60,00	65,00	70,00	75,00	78,00	80,00	82,00	84,00
Темпшугол [°]	0,00	12,00	24,00	29,50	33,10	35,80	38,10	43,30	43,30	43,60	45,70	46,00	50,20	52,80	54,20	55,40	56,50	60,00	65,00	70,00	75,00	76,00	78,00	80,00	82,00

РУДА	Угол [°]	К	1,95	Оцинк [кг/сек]			0,60	Порог по вибрации[кг]			УСТАНОВИТЬ НАЧАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ														
				0,15	0,20	0,25		0,30 <th>0,35</th> <th>0,40</th> <th>0,45</th> <th>0,50</th> <th>0,55</th> <th>0,60</th> <th>0,65</th> <th>0,70</th> <th>0,75</th> <th>0,80</th> <th>0,85</th> <th>0,90</th> <th>0,95</th> <th>1,00</th> <th>1,05</th> <th>1,10</th> <th>1,15</th> <th>1,20</th>	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
Q [кг/сек]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
Научугол [°]	0,00	12,00	24,00	28,10	40,50	44,40	47,90	50,80	53,40	55,40	57,00	59,20	59,90	60,00	62,00	64,00	66,00	68,00	70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00
Темпшугол [°]	0,00	12,00	24,00	36,10	40,50	44,40	47,80	50,80	53,40	55,40	57,00	58,20	58,90	60,00	62,00	64,00	66,00	68,00	70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00

ОМАТЬШИ	Угол [°]	К	2,10	Оцинк [кг/сек]			0,50	Порог по вибрации[кг]			УСТАНОВИТЬ НАЧАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ														
				0,10	0,20	0,25		0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
Q [кг/сек]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45 <td>0,50</td> <td>0,55</td> <td>0,60</td> <td>0,65</td> <td>0,70</td> <td>0,75</td> <td>0,80</td> <td>0,85</td> <td>0,90</td> <td>0,95</td> <td>1,00</td> <td>1,05</td> <td>1,10</td> <td>1,15</td> <td>1,20</td>	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
Научугол [°]	0,00	15,00	31,10	34,30	37,50	40,70	43,90	47,00	50,10	45,00	56,60	55,00	63,00	66,00	69,00	73,00	75,00	76,00	82,00	85,00	89,00	92,00	95,00	98,00	100,00
Темпшугол [°]	0,00	15,00	31,10	34,30	37,50	40,70	43,90	47,00	50,20	45,00	56,60	55,00	63,00	66,00	69,00	73,00	76,00	79,00	82,00	85,00	89,00	92,00	95,00	98,00	100,00

Для выбора угла открытия сначала рассчитывается скорость выгрузки:

$$Q = \frac{W}{T \cdot K},$$

где W – вес материала в шихтовом бункере, измеренный перед выгрузкой, т;
 T – время выгрузки определенного вида шихты корректируется после каждой выгрузки, с;
 K – плотность для каждого типа материала, т/м³ (для кокса $K = 0,45$ т/м³, для шихты $K = 1,8$ т/м³).

Базовое время выгрузки рассчитывается как количество порций (колец), умноженное на время полного поворота лотка вокруг своей оси. Обычно одна выгрузка делится на 6 порций (т.е. материал распределяется на 6 колец), среднее время одного оборота 7,5 с, поэтому базовое время составляет 45 с.

4.3.4. Программа (матрица) загрузки шихтовых материалов в доменную печь при работе БЗУ лоткового типа

Коррекция времени выгрузки определенного вида шихты производится по последовательности, представленной на рис. 17.

Доменная печь, оснащенная БЗУ, может загружаться в соответствии с параметрами, определенными в программе (матрице) загрузки (рис. 18). Каждая строка матрицы загрузки определяет полный цикл загрузки. Несколько матриц загрузки могут показываться и корректироваться оператором на мониторе системы контроля в помещении управления доменной печи.

Каждая матрица выполнена в виде строк и столбцов и позволяет оператору задавать набор материалов по массе, загружаемых в скип, последовательность подачи этих материалов в скипах на колошник в БЗУ, а также станции (положения лотка), на которых производить распределение, и количество материалов на каждой станции.

Одна строка матрицы соответствует одному или двум скипам либо кокса, либо железорудной шихты. При этом эта же строка соответствует одному распределению (выгрузке из БЗУ).

Реализация строки матрицы происходит следующим образом:

1. Из строки формируется задание для нижней загрузки (бункерной эстакады). Задаются количество скипов (1 или 2), массы компонентов (добавки, агломерат, руда, окатыши, кокс и т.д.). Если задано два скипа, то в оба загружается одна и та же комбинация материалов.

2. Набранный материал скиповым подъемником доставляется на колошник, загружается в БЗУ.

3. Из строки берутся номера станций и количество колец распределения, после чего рассчитывается время выгрузки, угол открытия нижнего шихтового затвора и позиционируется лоток БЗУ. Производится выгрузка материалов на заданные станции.

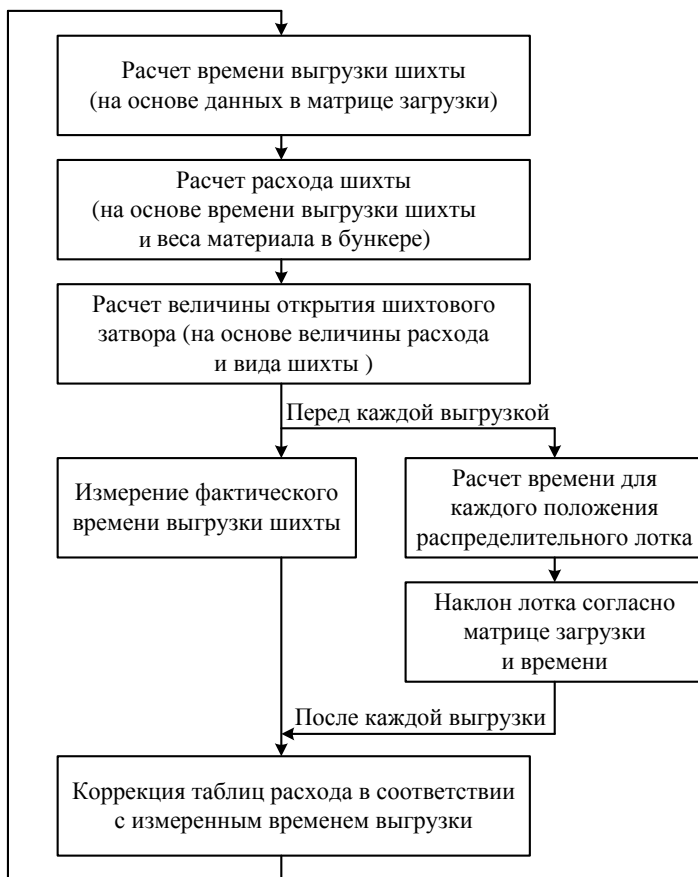


Рис. 17. Схема последовательности коррекции времени выгрузки определенного вида шихтовых материалов при загрузке в доменную печь

Каждая строка матрицы (см. рис. 18) дается для ввода параметров следующим образом:

Столбец 1 – показывает номер строки или скипа (только для считывания).

Столбец 2 – позволяет задать активность строки.

Столбец 3 – используется для ввода желаемого количества скипов. Тип материала и вес для каждого скипа может быть введен в столбцах 4 и 5.

Столбцы 4 и 5 – для выбора типа материала и указания заданного веса.

Столбцы 6-15 – для задания типа и веса добавок путем ввода соответствующих весов в столбцы с определенными добавками.

Строка		Кол-во		Материал		Запрощено		Добавки [кг]		Общий вес [кг]		Порции		Началь.		Время выгрузки [сек]															
Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Откл.														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
01	Дв	1	2	КОКС	5200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10400	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	45	0		
02	Дв	1	2	АЛЮМИНАТ	11100	0	600	0	0	0	7400	0	0	0	38200	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
03	Дв	1	2	КОКС	5200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10400	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	45	0		
04	Дв	1	2	АЛЮМИНАТ	11100	0	600	0	0	0	7400	0	0	0	38200	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
05	Дв	1	2	КОКС	5100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10200	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	45	0		
06	Дв	1	2	АЛЮМИНАТ	11100	0	600	0	0	0	7400	0	0	0	38200	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
07	Дв	1	2	КОКС	5100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10200	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	45	0		
08	Дв	1	2	АЛЮМИНАТ	11100	0	600	0	0	0	7400	0	0	0	38200	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
09	Дв	1	2	КОКС	3500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3500	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
10	Дв	1	2	КОКС	3500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3500	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
11	Дв	1	2	АЛЮМИНАТ	18200	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	17800	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
12	Дв	1	2	ОУЛЬШИ	18200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17800	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
13	Дв	1	2	---	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
14	Дв	1	2	---	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	
15	Дв	1	2	---	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	45	0	

Рис. 18. Программа (матрица) загрузки

Столбец 16 – показывает общий заданный вес материала (только для считывания).

Столбец 17 – показывает реальный общий вес материала, набранный системой шихтоподачи.

Столбец 18 – для выбора порядка выгрузки по порциям либо от центра к периферии ($1 \gg 11$), либо от периферии к центру ($11 \gg 1$).

Столбцы 19 – 29 – используются для ввода количества порций для каждой выбранной позиции лотка.

Столбец 30 – используется для выбора угла вращения или начальной точки для открывания шихтового затвора в заданной позиции. Если выбрано значение -1, то загрузка начнется со случайной позиции.

Столбец 31 – для отображения расчетного времени выгрузки.

Столбец 32 – для отображения реального времени выгрузки.

Главной задачей, решаемой с помощью БЗУ, является формирование слоев шихтовых материалов с заданной неравномерностью рудной нагрузки (увеличение рудной нагрузки от оси к периферии), что позволяет наиболее эффективно использовать восстановительную способность газового потока при осевом ходе доменной печи.

Обеспечение равномерного распределения газового потока и шихтовых материалов по окружности печи является весомым фактором уменьшения расхода энергоносителей, поддержания стабильного хода плавки, сохранения футеровки шахты и холодильников. Практика эксплуатации БЗУ определила два взаимно дополняющих пути устранения неравномерности окружного распределения шихты и газового потока. Это путь совершенствования конструкций БЗУ и вращающихся распределителей, направленный на устранение причин возникновения неравномерности распределения, результаты которого могут быть реализованы при создании последующих вариантов оборудования. Второй путь – разработка режимов и алгоритмов управления с целью компенсации неравномерности, создаваемой распределителем действующего устройства, и математическим моделированием процесса загрузки материалов с использованием БЗУ лоткового типа.

4.3.5. Математическое моделирование процесса загрузки шихтовых материалов с использованием БЗУ лоткового типа

При установке БЗУ на доменную печь в начальный период работы программу (матрицу) загрузки составляют и оценивают с помощью специального пакета программ ЕКО Stahl Matrix setpoints. Данный пакет позволяет моделировать формирование слоя шихтовых материалов в динамике, порозность материалов и рудную нагрузку по радиусу, расположение материалов по шахте печи и прогнозируемую зону когезии. Пример распределения материалов по высоте шахты представлен на рис. 19.

С использованием пакета программ можно моделировать процесс формирования слоев шихтовых материалов при используемой на данный момент программы загрузки.

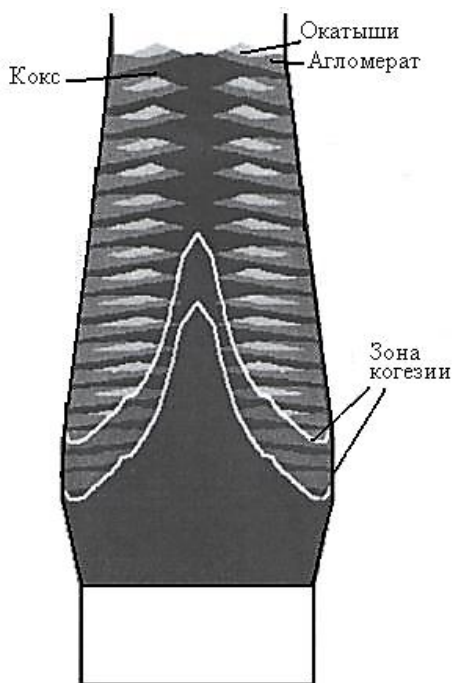


Рис. 19. Расположение материалов по высоте шахты и прогнозируемая зона когезии

Формирование слоев шихтовых материалов при определенной программе загрузки представлено на рис. 20.

Моделирование процесса загрузки производится на основе экспериментально полученного опыта и данных в процессе эксплуатации БЗУ с учетом данных похожих по размеру и профилю доменных печей с аналогичными загрузочными устройствами.

Создание и применение БЗУ, оснащенных автоматизированными средствами контроля и управления, обладающих широкими возможностями управления радиальным и окружным распределением шихты, высокой долговечностью и ремонтпригодностью, явилось новым этапом в развитии оборудования и технологии плавки. Установка БЗУ на всех вновь строящихся и реконструируемых печах стала одним из перспективных направлений повышения эффективности доменного производ-

ства. В настоящее время создан, успешно эксплуатируется и продолжает совершенствоваться ряд конструкций БЗУ, близких по основным тенденциям, но отличающихся компоновкой и конструктивными решениями основных узлов. Дальнейшее совершенствование их конструкций, режимов работы и выбор оптимальных параметров может осуществляться на основе результатов исследования и расчета механизмов, режимов их работы и движения шихты при ее загрузке. Высокая эффективность применения БЗУ может быть достигнута при квалифицированном технологическом сопровождении и применении современных средств автоматического контроля и управления.

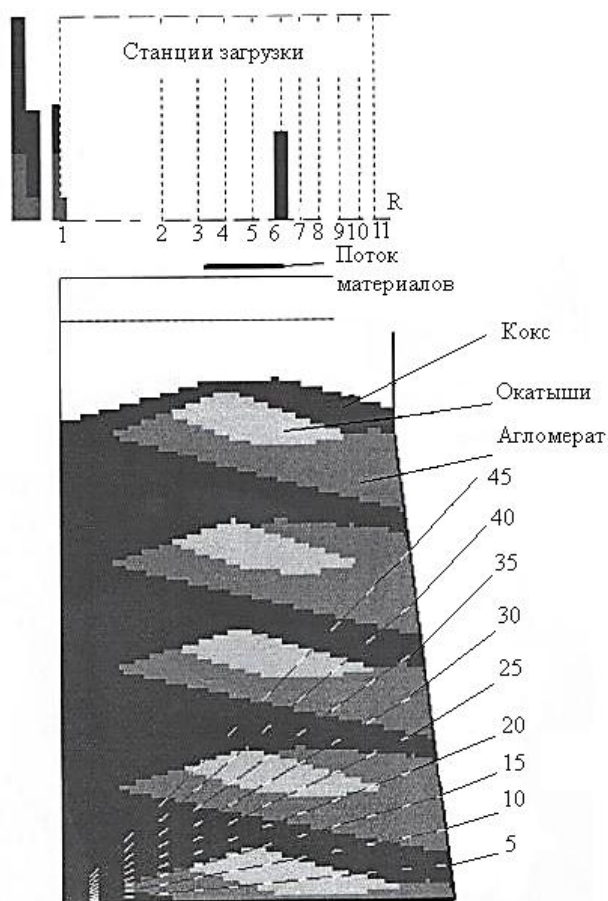


Рис. 20. Формирование слоя шихтовых материалов при данной программе загрузки

Необходимым условием эффективной работы БЗУ является более тщательная и качественная подготовка шихтовых материалов для ДП, особенно система чувствительна к наличию мелких фракций материалов.

Контрольные вопросы к разделу 4

1. Какая основная цель управления системой загрузки шихтовых материалов в ДП?
2. Перечислите элементы системы двухконусной загрузки шихты в ДП.
3. Опишите работу системы автоматического управления давлением в межконусном пространстве.
4. В чем заключаются преимущества БЗУ лоткового типа по сравнению с двухконусной загрузкой?
5. Какие элементы входят в конструкцию БЗУ лоткового типа?
6. Что такое матрица загрузки шихты в ДП?
7. Какие системы распределения материалов на колошнике можно реализовать при использовании БЗУ?

5. СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Доменный процесс является достаточно сложным и в значительной мере распределенным во времени и пространстве закрытым процессом. Многофакторность и многосвязность доменного процесса существенно осложняет анализ оперативной информации о текущем состоянии этого процесса.

Поэтому приоритетной и актуальной проблемой при автоматизации управления современными высокопроизводительными ДП является определение статических и динамических параметров, характеризующих количественные закономерности многообразных явлений, проходящих в рабочем пространстве доменной печи.

Выявление количественных закономерностей и необходимость их математического (формализованного) представления обуславливается непрерывно растущими масштабами выплавки чугуна и необходимостью снижения удельного расхода дорогостоящего и дефицитного кокса.

Эффективное управление высокопроизводительным современным доменным производством возможно при использовании двух взаимосвязанных автоматизированных систем управления (АСУ):

- АСУТП – технологическим процессом;
- АСУП – организационным производственным процессом.

Реализация этих двух основных АСУ практически не выполнима без учета реальных статических и динамических характеристик каждого индивидуального процесса выплавки чугуна в конкретной доменной печи.

5.1. Общие положения математического отражения статических и динамических характеристик технологических процессов металлургического производства

При математическом представлении зависимости изменения выходного контролируемого параметра технологического процесса от величины управляющего воздействия на этот процесс существует два вида зависимостей: функциональная и статистическая (вероятностная, случайная).

При функциональной зависимости $f(x)$ каждому конкретному значению аргумента x соответствует единственное значение функции y .

В реальных производственных условиях в результате воздействия на технологический процесс различных случайных возмущений каждому значению аргумента (обычно управляющего воздействия) соответствует множество (в идеале нормально распределенный ряд) значений функций.

Поэтому одной из приоритетных целей математического описания свойств технологического процесса является представление вероятностной связи между параметрами процесса в виде функциональной связи.

Любая случайная величина характеризуется следующими показателями.

Вероятность p_i появления y_i или частота появления события y_i определяется как

$$p_i = \frac{m}{n}, \quad (5.1)$$

где m – число значений, равных y_i ;

n – общее число значений случайной величины y_i , такое что

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (5.2)$$

Математическое ожидание или среднее значение случайной величины определяется по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{или} \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n p_i y_i. \quad (5.3)$$

Дисперсией случайной величины $D(y)$ называется сумма квадратов отклонений значений каждой переменной y_i от среднего значения \bar{y} :

$$D(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2. \quad (5.4)$$

Среднеквадратичным отклонением случайной величины (показатель степени разброса) является величина

$$\delta(y) = \sqrt{D(y)}. \quad (5.5)$$

Все закономерности, используемые при статистической обработке случайных величин, должны подчиняться нормальному закону распределения, определяемому формулой

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\delta^2}}, \quad (5.6)$$

где $m_x = \bar{x}$ – среднее значение;

δ – величина интервала оценки значений.

Подавляющее число технологических параметров, в том числе и случайные погрешности измерений подчиняются нормальному (гауссо-

ву) закону распределения величин параметров относительно среднего значения (симметрично).

Графическое изображение нормального распределения представлено на рис. 21.

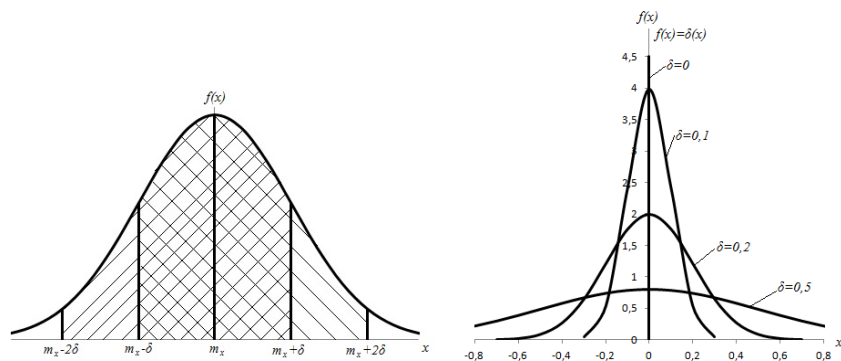


Рис. 21. Распределение плотностей вероятности появления случайной величины при нормальном законе

Вероятность появления случайной величины в диапазоне $\pm \delta$ составляет 68%, если считать всю площадь $f(x)$ за 100%. В полосе $\pm 2\delta$ и $\pm 3\delta$ вероятность составляет соответственно 95 и 99,7%. Чем меньше δ , тем более «острой» является функция плотности вероятностей $f(x)$.

Вероятность появления случайной величины в интервале значений от a до b определяется в соответствии с выражением

$$p(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx. \quad (5.7)$$

Для количественной характеристики тесноты связи между случайными величинами в инженерной практике используются следующие показатели:

1. Корреляционный момент

$$\mu_{x/y} = \sum_{i=1}^n [(x_i - m_x) \cdot (y_i - m_y)], \quad (5.8)$$

где m_x и m_y – средние значения переменных соответственно x и y .

Следует помнить, что корреляционный момент двух независимых случайных величин равен нулю.

2. Для характеристики линейной корреляционной связи используется коэффициент корреляции

$$r_{xy} = \frac{\mu_{x/y}}{\delta_x \cdot \delta_y}, \quad (5.9)$$

или

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{u=1}^n (x_{iu} - \bar{x}_i) \cdot (y_{ju} - \bar{y}_j)}{\delta_x \cdot \delta_y}, \quad (5.10)$$

где x_{iu}, y_{ju} – значения исследуемых параметров (факторов) по экспериментальным данным;

δ_x, δ_y – оценки среднеквадратичных отклонений соответственно факторов x_i, y_j ;

n – число опытов (объем выборки).

Выборочный коэффициент корреляции линейной зависимости между факторами x и y можно определить с использованием формулы

$$r_{x_i y_j} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{u=1}^n (x_{iu} \cdot y_{ju}) - (\bar{x}_i \cdot \bar{y}_j)}{\delta_{x_i} \cdot \delta_{y_j}}, \quad (5.11)$$

где $u=1, 2, 3, \dots, n$ – число опытов (объем выборки);

$i=1, 2, 3, \dots, n$;

$j=1, 2, 3, \dots, m$;

\bar{x}_i, \bar{y}_j – оценки математических ожиданий каждого фактора;

$\delta_{x_i}, \delta_{y_j}$ – оценки среднеквадратических отклонений каждого фактора.

Следует помнить, что r_{xy} изменяется в пределах $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ и величина его симметрична относительно исследуемых случайных величин $r_{xy} = r_{yx}$.

Основной целью обработки статистических данных двух случайных параметров является представление вероятностной стохастической связи между ними в виде функциональной зависимости вида $\bar{y} = f(x)$.

Эта функциональная зависимость называется уравнением регрессии

$$m_{x/y} = \bar{y} = f(x) = f(x, a, b, \dots), \quad (5.12)$$

где a и b – параметры уравнения.

В каждом конкретном случае вид и тип регрессионного уравнения выбирают с учетом характера поля корреляции, т.е. характера расположения точек в координатах X - Y .

Расчет параметров уравнения осуществляется с использованием, как правило, метода наименьших квадратов, суть которого заключается в требовании минимизации суммы квадратов отклонений для всех точек корреляционного поля от определяемой уравнением траектории (линии) регрессии:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - m_{y/x})^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a, b, \dots)]^2 \rightarrow \min. \quad (5.13)$$

Величины коэффициентов определяют из условия

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (5.14)$$

и т.д.

Если зависимость $\bar{y} = f(x, a, b, \dots)$ значительно отличается от линейной типа $\bar{y}(x) = a + bx$, то в этом случае степень тесноты связи между x и y оценивается по величине корреляционного отношения.

Полное изменение величины y можно представить в виде соотношения

$$\delta_y^2 = \delta_{y_1}^2 + \delta_{y_2}^2, \quad (5.15)$$

где δ_y^2 – полная дисперсия величины y , т.е. отклонения точек корреляционного поля от линии математического ожидания m_y ;

$\delta_{y_1}^2$ – дисперсия точек поля относительно линии регрессии

$m_{y/x} = f(x, a, b)$;

$\delta_{y_2}^2$ – дисперсия кривой регрессии относительно математического ожидания m_y .

Отсюда следует, что нелинейная зависимость характеризуется корреляционным отношением, определяемым по формуле

$$\eta_{xy} = \frac{\delta_{y_2}}{\delta_y}. \quad (5.16)$$

Корреляционное отношение η определяет долю изменчивости величины y , обусловленную изменением только величины x .

При $\eta_{yx}=0$ корреляционной (статистической) связи между y и x нет.

При $\eta_{yx}=1$ существует детерминированная функциональная зависимость между y и x .

Кроме парной корреляции, т.е. корреляции между двумя случайными факторами, при автоматизации технологических процессов необходимо решать задачи по определению взаимосвязей между несколькими технологическими параметрами, т.е. использовать множественную корреляцию, т.е. определить стохастическую связь между несколькими факторами.

Так, при трех случайных факторах уравнение множественной линейной регрессии будет иметь вид

$$m_{z/xy} = a + bx + cy. \quad (5.17)$$

В этом случае теснота связи фактора z с величинами x и y в совокупности определяется коэффициентом множественной корреляции:

$$R_{z/xy} = \sqrt{\frac{z_{xz}^2 - 2z_{xy} \cdot z_{xz} \cdot z_{yz} + z_{yz}^2}{1 - z_{xy}^2}}, \quad (5.18)$$

при $0 \leq R_{z/xy} \leq 1$.

5.2. Определение частоты съема информационных сигналов при дискретном контроле величин технологических параметров

Учитывая закрытость и значительную инерционность доменного процесса определение необходимой дискретности (частоты) измерений технологических параметров имеет актуальное значение.

Эта проблема возникает при использовании для обработки информации цифровых вычислительных средств централизованного контроля и управления.

Незначительная частота съема информационного сигнала приводит к уменьшению точности воспроизведения контролируемого параметра.

Повышенная частота приводит к неоправданному усложнению системы централизованного контроля (СЦК), затратам средств и т.д.

Решение задачи о дискретизации контроля параметров рассмотрим на примере случайного процесса, реализация которого $x(\tau)$ изображена на рис. 22.

Считаем, что измерения (съем информационного сигнала) осуществляется в момент времени τ_{i-1} , τ_i , τ_{i+1} и т.д. и выполняется ступенчатая аппроксимация на интервале времени от τ_i до τ_{i+1} в соответствии с условием

$$\psi(\tau_i) = X(\tau_i). \quad (5.19)$$

При определении частоты измерений потребуем соблюдение условия

$$M[\psi(\tau_i) - X(\tau_i)]^2 \leq \delta_{3x}^2, \quad (5.20)$$

которое требует, чтобы расхождение между истинным значением $X(\tau_i)$ и аппроксимирующей кусочно-линейной функцией $\psi(\tau_i)$, выраженное в виде дисперсии δ_x^2 , было не больше заданного значения δ_{3x}^2 .

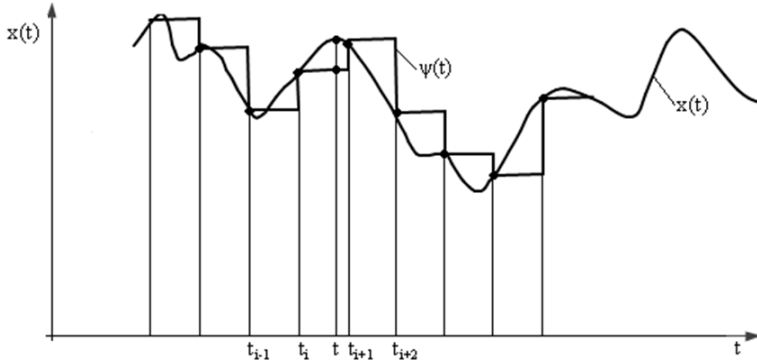


Рис. 22. Реализация случайного процесса и дискретное воспроизведение этого процесса

Математическое ожидание и дисперсия δ_x^2 не являются достаточными характеристиками случайных процессов.

Например, два случайных процесса, изображенных на рис. 23, а, б, имеют одинаковые математические ожидания и дисперсии, но они существенно отличаются друг от друга по изменчивости во времени [16].

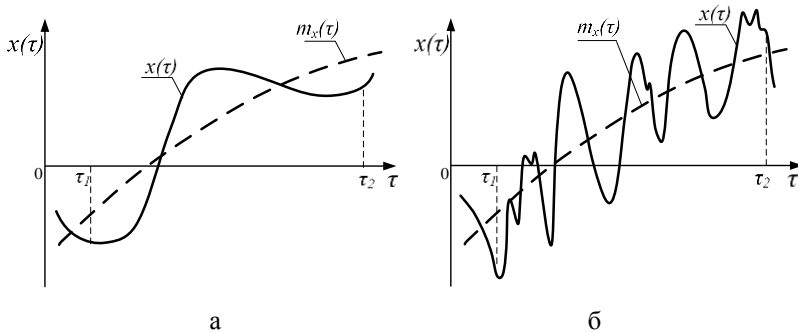


Рис. 23. Случайные процессы, отличающиеся изменчивостью при одинаковых математических ожиданиях и дисперсиях

Для характеристики степени связи между значениями случайного процесса во времени используется понятие корреляционной функции $K_x(\tau_1, \tau_2)$:

$$K_x(\tau_1, \tau_2) = M[X(\tau_1) \cdot X(\tau_2)]. \quad (5.21)$$

По мере увеличения интервала $\tau_2 - \tau_1$ величина корреляционной функции убывает.

Если преобразовать первую часть неравенства заданного условия, то получим

$$M[\psi(\tau)]^2 - 2M[\psi(\tau) \cdot X(\tau)] + M[X(\tau)]^2 \leq \delta_{3x}^2. \quad (5.22)$$

Поскольку рассматривается стационарный случайный процесс [16], то справедливо соотношение

$$M[X(\tau_i)]^2 = M[X(\tau)]^2 = K_{x(\tau=0)}. \quad (5.23)$$

Используя два высказанных условия, можно составить систему

$$\begin{cases} M[\psi(\tau)]^2 = M[X(\tau)]^2 = M[X(\tau)] = K_{x(\tau=0)}, \\ 2M[\psi(\tau) \cdot X(\tau)] = 2M[X(\tau_i) \cdot X(\tau)] = K_{x(\tau-\tau_i)}. \end{cases} \quad (5.24)$$

С учетом сказанного имеем

$$2[K_{x(\tau=0)} - K_{x(\tau-\tau_i)}] \leq \delta_{3x}^2. \quad (5.25)$$

Левая часть полученного выражения по мере увеличения интервала времени от τ_i до τ_{i+1} , постепенно изменяясь, должна увеличиваться и на границе интервала, предшествующего замеру, должна стать равной δ_{3x}^2 . Значит, при известных значениях корреляционной функции величина искомого интервала на дискретности съема информационного сигнала τ_0 может быть определена из условия (5.25): $2[K_{x(\tau=0)} - K_{x(\tau_{i+1}-\tau_i)}]$, при $\tau_0 = \tau_{i+1} - \tau_i$.

Численное значение интервала дискретизации τ_0 можно получить аналитически, если известно аналитическое выражение для определения K_x или графически, если известна траектория изменения K_x во времени.

Например, корреляционная функция контролируемого параметра $K_x(\tau_0) = Y(\tau)$ известна и представлена на рис. 24.

Требуется определить интервал между измерениями при условии, что допустимая среднеквадратичная погрешность аппроксимации δ_x^2 будет равна 10 единицам измерения величины параметра. При данной инерционности контролируемого параметра частота съема информационного сигнала для обеспечения заданной величины среднеквадратического отклонения должна быть равной 13 мин:

$$2[600 - K_x(\tau_0)] = 10^2, \quad K_x(\tau_0) = 550, \quad \tau_0 = 13 \text{ мин.}$$

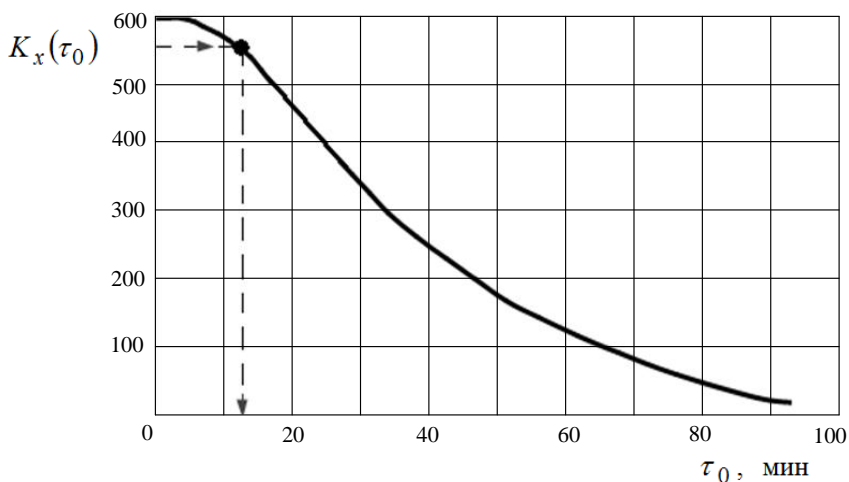


Рис. 24. Корреляционная функция контролируемого параметра

5.3. Динамические характеристики доменного процесса

Инерционность, закрытость и сложность физико-химических явлений, протекающих в рабочем пространстве доменных печей, значительно усложняют задачу автоматического управления и оптимизацию управления доменным процессом.

При выборе управляющих воздействий и методов оптимизации управления параметрами доменного процесса необходимо учитывать не только статические, но и динамические характеристики управляемого параметра.

Динамической характеристикой управляемого параметра называется реакция (отклик) этого параметра на стандартную форму управляющего (входного) воздействия.

По виду входного возмущающего воздействия динамические характеристики делятся на следующие типы:

1. «Кривые разгона» – реакция технологического параметра на однократное скачкообразное входное возмущающее воздействие. В теории управления используются понятия «временная характеристика» или «временная функция» – это реакция на однократное единичное возмущающее воздействие.

2. «Импульсная характеристика» – это реакция параметра на входное возмущающее воздействие импульсной формы. Эта характеристика используется в том случае, когда по технологическим условиям недопустимо длительное входное воздействие.

3. «Амплитудно-фазочастотная характеристика» (АФЧХ) – реакция параметра на гармонический сигнал постоянной амплитуды, но различный по частоте. Этот вид характеристики требует длительного процесса определения.

4. Передаточная функция параметра, по сути, представляет вид дифференциального уравнения, решение которого при входном возмущающем воздействии позволяет получить траекторию изменения во времени контролируемого параметра.

Поскольку динамические характеристики различных видов характеризуют одни и те же динамические свойства управляемого технологического параметра, они могут быть преобразованы из одного вида в другой в соответствии с методами, изложенными в [16, 17].

Экспериментальные динамические характеристики параметров доменного процесса представлены в табл. 3 [17].

Определение экспериментальных динамических характеристик проводили на ДП полезным объемом 1386 м³. Схема расположения точек измерения величин выходных параметров и регулирующих клапанов, при помощи которых вносились входные возмущающие воздействия, представлены на рис. 25 [17] и 26.

Температура купола воздухонагревателя в процессе эксперимента измерялась хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле из стали Х25 наружным диаметром 20 мм и внутренним 12 мм. Эксперимент проводился на воздухонагревателях высотой 46,9 м, диаметром 8,5 м с поверхностью нагрева 27140 м² при расходе газа на нагрев 35÷40 тыс. м³/ч с теплотворной способностью 850 ккал/м³. Температура купола равна 1150 °С. Возмущения вносились путем изменения коэффициента расхода воздуха в пределах от 1,05 до 1,9.

Таблица 3

Динамические характеристики параметров доменного процесса

Выходная величина x	Входная величина y	Переходная характеристика	АФЧХ	Динамические параметры			
				τ , с	T , с	τ/T	$K_{об}$
Температура купола воз-духонагревателя (термо-пара в сталь-ном чехле)	Коэффи-циент избытка воздуха			18	88	0,2	$2,3 \frac{^{\circ}C}{\% \text{ хода}}$
Температура горячего дутья (термо-пара в сталь-ном чехле)	Положе-ние смеси-тельного клапана			20	80	0,25	$6 \frac{^{\circ}C}{\% \text{ хода}}$
Влажность горячего дутья (пси-хрометриче-ский датчик)	Расход па-ра на увлажне-ние дутья			45	135	0,33	$0,32 \frac{\text{г/нм}^3}{\% \text{ хода}}$

Выходная величина x	Входная величина y	Переходная характеристика	АФЧХ	Динамические параметры			
				τ , с	T , с	τ/T	$K_{Об}$
Расход дутья через фурму (электropневматический малоинерционный датчик)	Положение регулирующего дросселя фурм		—	0,26	1,06	0,25	$0,6 \frac{\text{м}^3/\text{мин}}{\% \text{хода}}$
Нижний перепад давления по шахте ДП (дифманометр)	Расход дутья			2	39	0,05	$10^{-2} \frac{\text{кг}/\text{см}^2}{\% \text{хода}}$
Верхний перепад давления по шахте ДП (дифманометр)		<p>1 – нижний перепад, 2 – верхний перепад</p>		2	48	0,04	$0,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}/\text{см}^2}{\% \text{хода}}$

Выходная величина x	Входная величина y	Переходная характеристика	АФЧХ	Динамические параметры			
				τ , с	T , с	τ/T	$K_{Об}$
Нижний перепад давления по шахте ДП (дифманометр)	Давление на колошнике			1	20	0,05	$3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг/см}^2}{\% \text{хода}}$
Верхний перепад давления по шахте ДП (дифманометр)			<p>1 – нижний перепад, 2 – верхний перепад</p>		1	18	0,06
Давление газа на колошнике (манометр)	Положение регулирующего дросселя			3	32	0,09	$36 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг/см}^2}{\% \text{хода}}$

Влажность горячего дутья определялась по методу психрометрической разности температур сухого и влажного термометров сопротивления в защитных латунных чехлах, установленных в специальном датчике влажности, куда по линии диаметром 19 мм и длиной 35 м непрерывно поступала проба горячего дутья. Влажность измерялась автоматически электронным мостом по разности температур. Расход дутья на печь составлял $2600 \div 2700 \text{ м}^3/\text{мин}$, абсолютная влажность дутья составляла $20 \div 25 \text{ г}/\text{м}^3$. Возмущение вносили путем изменения расхода пара на увлажнение дутья, поступающего в воздухопровод на расстоянии 75 м от места измерения.

Давление газа на колошнике ДП измерялась за печью на большом пылеуловителе с помощью манометра компенсационного типа. Длина импульсной линии от места отбора давления до манометра 70 м, диаметр линии 19 мм. Давление доменного газа в пределах $0,7 \div 0,8 \text{ атм}$. Возмущения вносились изменением положения регулирующего дросселя в общей дроссельной группе ДП.

Частные перепады давления по высоте шахты ДП измерялись дифференциальными манометрами компенсационного типа между кольцевым воздухопроводом горячего дутья и средней точкой шахты (нижний перепад) и между средней точкой и колошником печи (верхний перепад). Средняя точка измерения давления в шахте печи на 8 м ниже уровня засыпи, при общей высоте столба материалов в шахте 21 м. Установка отбора давления в средней части шахты доменной печи показана на рис. 4.

Расход дутья при измерении частных перепадов составлял $2400 \div 2500 \text{ м}^3/\text{мин}$. Давление горячего дутья 1,9 атм, давление газа на колошнике 0,7 атм, температура дутья 950°C . При нормальном ходе ДП нижний перепад давлений $\Delta P_{\text{н}} = 0,75 \text{ атм}$, а верхний перепад давлений $\Delta P_{\text{в}} = 0,45 \text{ атм}$. Возмущения вносили путем изменения расхода дутья (на воздуходувной машине) и изменением давления на колошнике печи.

Расход дутья через фурму измеряется электропневматическим малоинерционным датчиком. Возмущение вносилось изменением положения регулирующего дросселя на фурме печи.

Учитывая значительную инерционность технологических параметров, характеризующих тепловое состояние доменной печи и неизбежное влияние технологических возмущений и случайных помех, определение динамических характеристик ДП в реальных условиях целесообразно осуществлять по усредненным реализациям.

Система автоматического контроля основных технологических параметров при снятии динамических характеристик доменного процесса представлена на рис. 26.

На рис. 27 приведены реальные кривые разгона, полученные [3] для печи объемом 2000 м^3 .

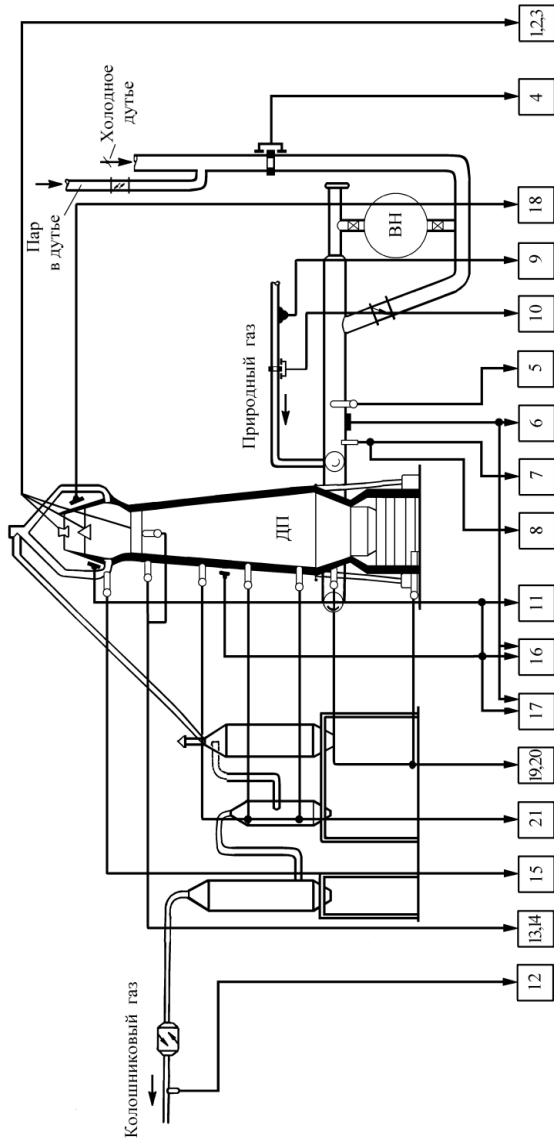


Рис. 26. Схема системы автоматического контроля работы доменной печи (основные измерения):

- 1 – уровень засыпи; 2 – скорость схода шихты; 3 – работа конусов, ВРШ, счет подач шихты; 4 – расход дутья; 5 – температура горячего дутья; 6 – давление горячего дутья; 7 – влажность горячего дутья; 8 – содержание кислорода в дутье; 9 – давление природного газа; 10 – расход природного газа; 11 – давление на колошнике; 12 – анализ колошникового газа; 13 – температура газового потока по периферии; 14 – то же по радиусу; 15 – температура в газоотводах; 16 – верхний перепад по шахте; 17 – нижний перепад по шахте; 18 – давление в межконусном пространстве; 19 – температура фундамента; 20 – температура перепада; 21 – температура I, II, III горизонтов

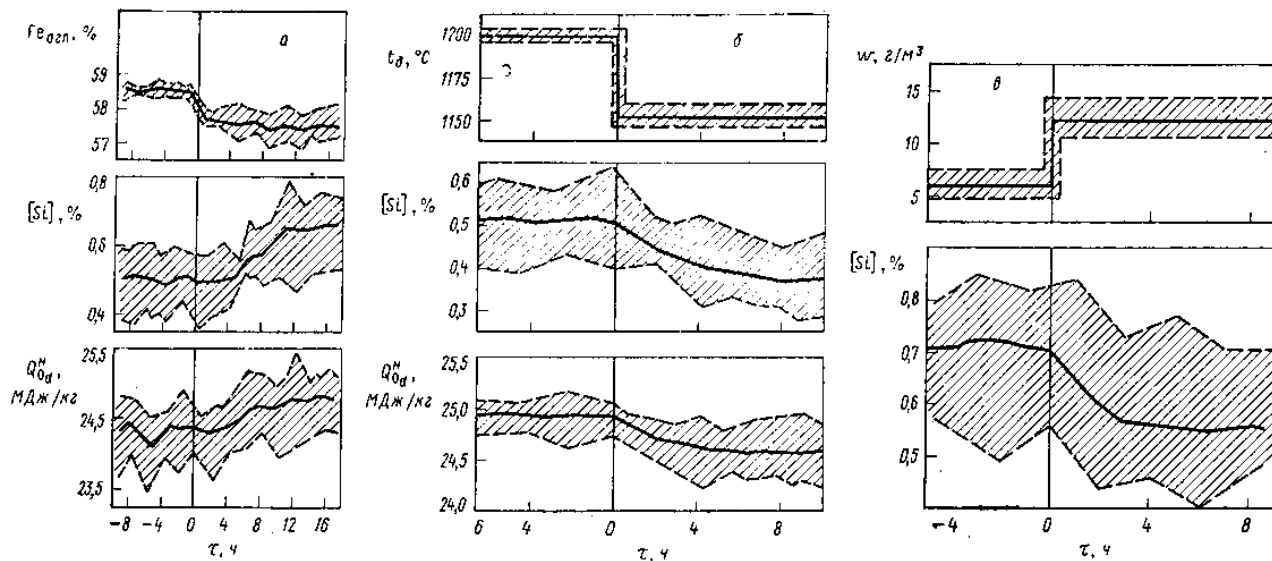


Рис. 27. Переходные процессы при изменении:
 а – содержание железа в агломерате $Fe_{aggl.}$; б – температуры дутья t_d ;
 в – влажности дутья ω ; заштрихованная область – изменение $Fe_{aggl.}$, t_d , ω и соответствующие им кривые разгона содержания кремния в чугуне $[Si]$ и показателя $Q_{O_d}^H$ в отдельных опытах;
 кривые – усредненные изменения этих величин

При исследовании динамики процесса по каналу «содержание Fe в агломерате – Fe_{агл}%» вследствие дискретности отбора проб и наличия емкостей по тракту движения агломерата получить чисто ступенчатое изменение входного сигнала практически невозможно в реальных условиях.

Всего было выбрано пять вариантов изменения содержания Fe в агломерате в диапазоне изменения 0,2÷1,4 %, пять вариантов изменения температуры горячего дутья в диапазоне 45÷50 °С и семь вариантов изменения влажности дутья в диапазоне 4÷8 г/м³.

При определении динамических характеристик следует учитывать, что в реальных условиях осуществить изменение какого-либо входного воздействия без влияния других факторов невозможно.

В качестве выходных параметров (см. рис. 27) использованы содержание кремния в чугуна [Si] % и обобщенный показатель $Q_{O_a}^H$, характеризующий эффективность использования тепловой энергии в нижней части ДП.

Следует отметить значительную от 4 до 6 ч инерционность процессов влияния возмущающих воздействий на выходные параметры ДП, характеризующие тепловое состояние низа. Особенно заметно негативное изменение влажности горячего дутья и снижение температуры горячего дутья.

По сути, представленные характеристики отражают влияние возмущений как «сверху» так и «снизу» на тепловое состояние доменного процесса.

Кривые разгона по каналам изменения рудной нагрузки руда/кокс [т/т] и расхода природного газа [тыс. м³/ч] представлены на рис. 28.

В общем случае используемые процессы характеризуются значительной инерционностью и наличием большого запаздывания, особенно на показатели [Si], $Q_{O_a}^H$, зависящие от движения материалов по высоте шахты.

Наблюдается контролируемая связь между [Si] и $Q_{O_a}^H$, характеризующими общее тепловое состояние доменного процесса.

Появление электронных вычислительных машин позволило синтезировать динамические модели доменного процесса путем совокупности дифференциальных уравнений в частных производных, связывающих расходы потоков газа и твердой фазы с их составом в пространстве и времени. Это позволяет расчетным путем получать динамические характеристики.

Результаты расчета динамических характеристик на основе предложенной математической модели доменного процесса представлены на рис. 29.

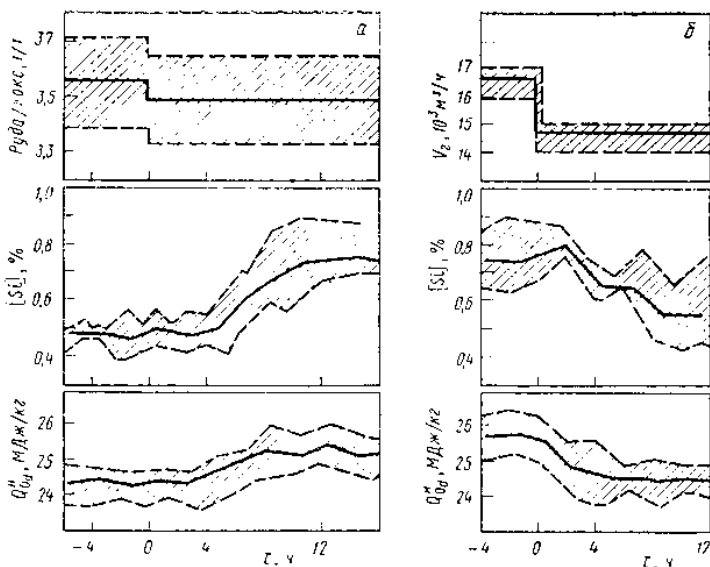


Рис. 28. Кривые разгона доменного процесса по каналам возмущения «рудная нагрузка», «расход природного газа», «содержание [Si] в чугуне», «обобщенный показатель эффективности использования тепловой энергии $Q_{O_d}^H$ » для ДП объемом 2000 м^3

Анализ полученных расчетных динамических характеристик показывает, что переходная характеристика содержания кремния [Si] при изменении температуры дутья (рис. 29, а) и рудной нагрузки физически достоверно отражают динамические свойства процесса, характеризуют динамику изменения температуры чугуна на выпуске $t_{\text{ч}}$ (τ).

Возмущения по входным параметрам $t_{\text{д}}$ (τ), рудной нагрузки, т/т, и расходу мазута m , кг/(т/ч), оказывают определенное влияние и на содержание CO , CO_2 в техническом газе. В данном случае мазут использован как альтернативный коксу источник тепловой энергии [17, 18].

При составлении дифференциальных уравнений для получения динамической модели доменного процесса рабочее пространство разбивается на определенное число зон. И для каждой зоны усредняют количество, состав и температуру газа и твердой фазы. В наиболее ответственной части рабочее пространство от верхней границы зоны плавления до фурм делится на три зоны: зона плавления; слой кокса; фурменная зона. Следует помнить, что выводы, сделанные по результатам на основе расчета по модели, верны только в пределах принятых при синтезе модели допущениях. Поэтому при переходе к реальному процессу необходимы дополнительные исследования для подтверждения адекватности модели.

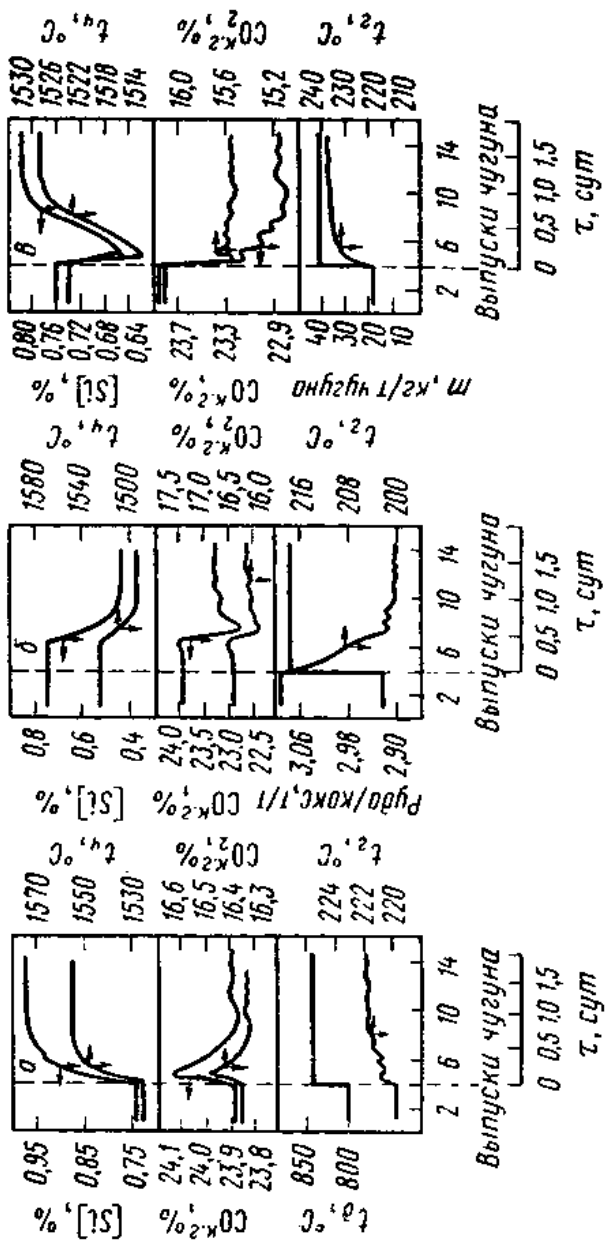


Рис. 29. Переходные процессы при однократном скачкообразном изменении:
 а — температуры дутья t_1 ; б — рудной нагрузки (руда/коке); в — расхода мазута

5.4. Статические характеристики доменного процесса

Учитывая стохастический характер доменного процесса, экспериментальные общие статические характеристики, т.е. зависимости между входными и выходными параметрами процесса, в установившемся режиме до сих пор пока еще не определены и достоверно не обоснованы.

Многочисленные различные авторы рекомендуют расчетные зависимости между этими величинами, а также эмпирические зависимости между входными управляющими величинами для верха и низа ДП, которые могут быть измерены и вычислены по ходу процесса в качестве показателей прямого и косвенного восстановления.

Появление микропроцессорных технических средств контроля и управления параметрами доменного процесса позволяет реализовать различные математические модели доменного процесса и получить расчетные зависимости между параметрами процесса, адекватные реальным условиям, характерным для конкретного типа печей.

Непрерывное (за 30 лет на 200÷240 °С) повышение температуры горячего дутья, использование комбинированного дутья (добавление природного газа, мазута и др.), обогащение дутья кислородом делает проблему получения статических характеристик практически трудно разрешимой.

Тем не менее, благодаря непрерывному исследовательскому процессу удалось определить некоторые общие закономерности, характерные для большинства доменных печей.

Расчетные траектории распределения по высоте шахты температуры газов, средней по массе температуры агломерата, средней по массе температуры кокса при различных величинах расходов природного газа в дутье представлены на рис. 30.

При увеличении расхода природного газа количество образовавшихся газов, приходящихся на единицу шихты, увеличивается и области перегиба температурных кривых, характеризующих условия теплообмена, смещаются в направлении достижения более высоких температур. Одновременно разность температур шихты и газа несколько уменьшается (с 21 до 16 °С).

Влияние интенсивности горения кокса на параметры доменного процесса по результату расчета по моделям представлено на рис. 31. Расчетные зависимости влияния температуры горячего дутья при постоянной интенсивности горения кокса на основные выходные параметры доменной печи представлены на рис. 32 [3].

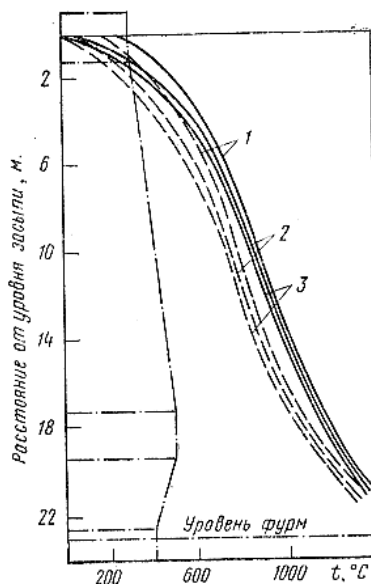


Рис. 30. Расчетное распределение температуры:
 1 – газа; 2 – средней для массы агломерата; 3 – средней для массы
 кокса по высоте печи при постоянном расходе природного газа:
 - - - - 50 м³/т чугуна; ——— 100 м³/т чугуна

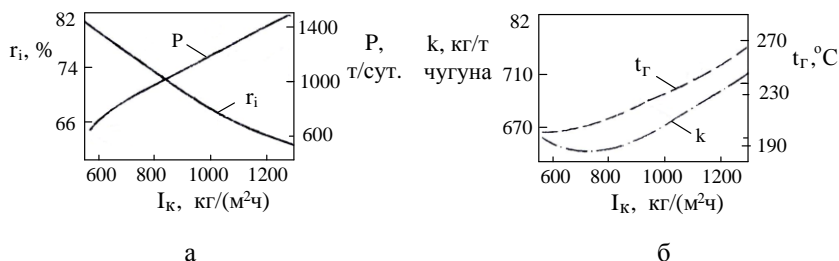


Рис. 31. Влияние интенсивности горения кокса I_k на показатели:
 а – степень косвенного восстановления r_i и производительность печи P ;
 б – температуру колошникового газа t_g и расход кокса k

С использованием математической модели доменного процесса получим следующий результат: повышение давления колошникового газа до $0,3 \div 0,4$ МПа при постоянном расходе дутья позволяет получить экономию кокса $1 \div 3,5$ кг/ т чугуна и прирост производительности $0,3 \div 0,7$ % на каждую $0,01$ МПа избыточного давления.

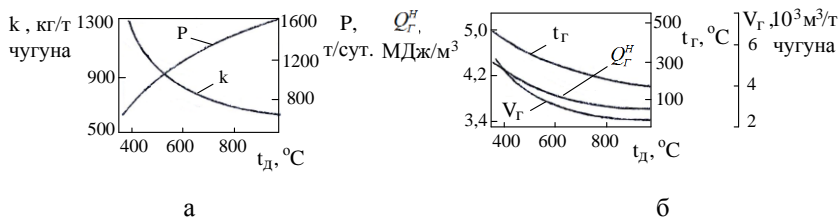


Рис. 32. Влияние температуры дутья при постоянной интенсивности горения кокса на: а – производительность P , расход кокса k ; б – теплоту сгорания Q_g^H и температуру t_g колошникового газа, выход газа V_g

Расчетные зависимости, определяющие влияние давления колошникового газа на производительность доменной печи P и расход углерода кокса C_k при постоянном расходе дутья, представлены на рис. 33 для двух различных величин расходов дутья.

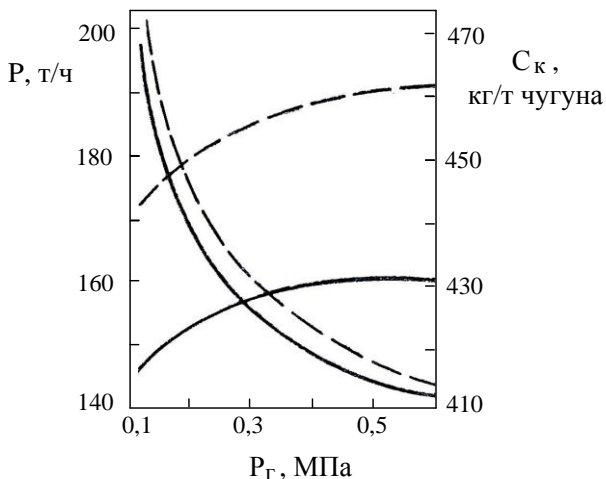


Рис. 33. Влияние давления колошникового газа на производительность доменной печи P и расход углерода кокса C_k при различных величинах расхода дутья, $m^3/мин$

С увеличением давления эффективность мероприятий снижается. Очевидно, это связано с принятой концепцией значительного влияния на скорость непрямого (косвенного) восстановления.

Математическое моделирование доменного процесса с использованием ЭВМ позволяет осуществить определение наиболее эффективного варианта комбинированного дутья.

Так, при вдувании холодного природного газа и обогащения дутья кислородом минимальная себестоимость чугуна получается при концентрации кислорода в дутье 32% и удельном расходе природного газа $122 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна.

Вдувание мазута (100 кг/т чугуна) при обогащении дутья кислородом до 25% позволяет получить более низкую себестоимость при уменьшении производительности ДП на 7,3%.

При вдувании антрацитового штыба (130 кг/т чугуна) при атмосферном дутье достигается самая низкая себестоимость чугуна при уменьшении производительности печи на 13%.

Следует отметить, что выбор в качестве критерия оптимизации параметра «себестоимость чугуна» не включает в себя все компоненты различных технологических мероприятий. Поэтому более приемлемым критерием экономической эффективности доменного процесса следует считать «приведенные затраты на выплавку чугуна».

Для выявления влияния расхода природного газа на показатели доменной плавки при работе ДП на атмосферном воздухе и постоянном расходе кокса (600 кг/т) проведено моделирование изменения параметров процесса при изменении расхода природного газа. Расчетные траектории изменения относительной производительности доменной печи P , %, эквивалент замены углерода кокса природным газом l_c , $\text{кг}/\text{м}^3$, градиент снижения степени прямого восстановления q , $\%/\text{м}^3$, при увеличении расхода природного газа для различных величин температуры горячего дутья представлено на рис. 34.

Относительная производительность печи в зависимости от удельного расхода газа изменяется в соответствии с унимодального (одноэкстремального) вида характеристикой. Это свидетельствует о том, что для каждой печи и для каждого значения температуры горячего дутья существует оптимальное значение удельного расхода природного газа в дутье, при котором производительность достигает максимально возможного значения. Это обстоятельство является убедительным доказательством возможности и необходимости использования системы автоматической оптимизации управления подачей природного газа в ДП [22, 24]. Остальные показатели доменного процесса с увеличением удельного расхода природного газа снижаются.

Следует добавить, что изменение расхода природного газа оказывает неоднозначное влияние на удельный расход кокса. Этот вопрос будет рассмотрен далее более подробно при разработке системы оптимального управления расходом природного газа с целью минимизации удельного расхода кокса.

Для современного высокопроизводительного доменного производства характерно использование в шихте окатышей в сочетании с агломератом.

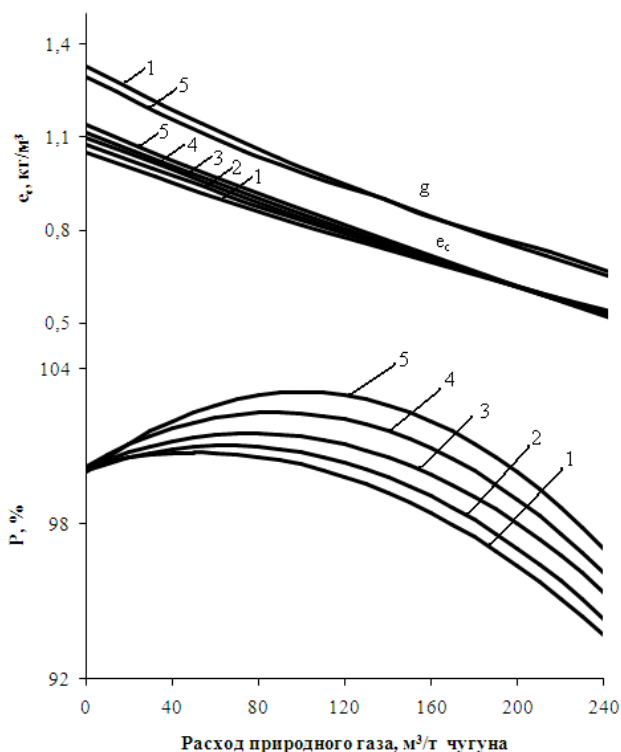


Рис. 34. Изменение относительной производительности ДП P , эквивалента замены углерода кокса природным газом e_c и градиента снижения степени прямого восстановления g при повышении расхода природного газа в условиях разного исходного расхода кокса k_0 , кг/т чугуна, и температуры дутья t_d :
 1 – 1200 °C; 2 – 1100 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 900 °C; 5 – 800 °C

При изучении влияния доли окатышей в шихте на показатели плавки в начальный период их использования (1968-1970) получили статические характеристики, приведенные на рис. 35.

Практически все представленные статические характеристики (для условий доменного цеха ПАО «ММК»), кроме общего перепада давления, имеют явно выращенный экстремальный вид и могут быть использованы в системе оптимизации управления соотношением «окатыши – агломерат» в шахте с целью достижения наилучших показателей доменного процесса. Следует заметить, что максимум производительности доменной печи и минимальное значение удельного расхода кокса достигаются при различном соотношении массы окатышей и агломерата в шихте.

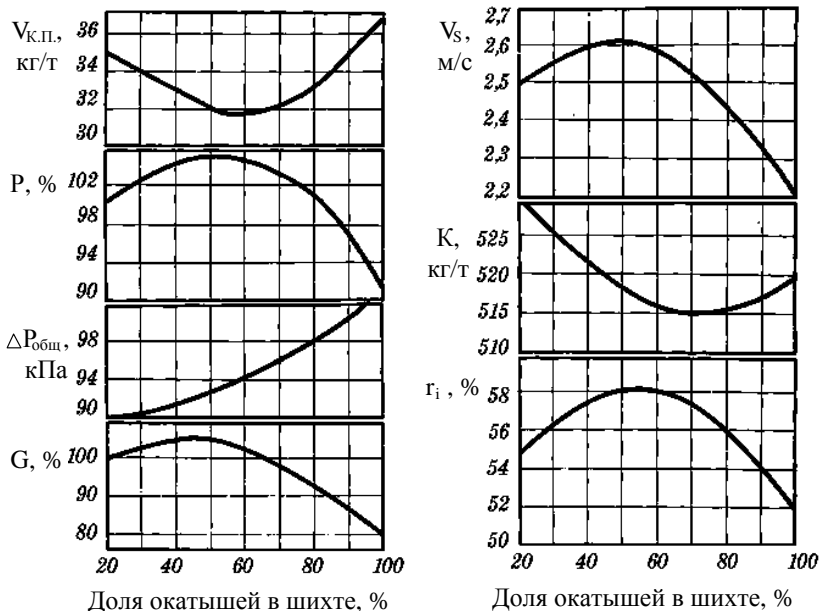


Рис. 35. Влияние доли окатышей в шихте, вводимых взамен агломерата на показатели плавки ДП №7 ПАО «ММК»:

$V_{к.п.}$ – вынос колошниковой пыли; P – производительность печи;
 $\Delta P_{общ.}$ – общий перепад давления; G – газопроницаемость;
 V_s – скорость газов; K – расход кокса; r_i – косвенное восстановление

Установлено, что распределение окатышей на колошнике ДП отличается от распределения агломерата.

При большей насыпной массе и меньшем коэффициенте внутреннего трения окатыши при сыпани в печь на поверхность ранее загруженных материалов могут «внедряться» в слой шахты на периферии, отесняя кокс к центру.

Будучи более «подвижными», окатыши способны, при попадании на крутой откос загруженной шихты, легче перемещаться к центру печи.

При совместном использовании этих двух видов рудных материалов сечение ДП оказывается более равномерно загруженным.

Поэтому эти железорудные материалы целесообразно распределять равномерно между печами или чтобы доля окатышей в шихте отдельных печей не превышала 60 %.

Заметное влияние на показатели эффективности доменного процесса оказывает обогащение дутья кислородом. Влияние обогащения дутья кислородом на удельный расход кокса зависит от уровня нагрева

температуры дутья и концентрации кислорода в дутье. Расчеты показывают, что обогащение дутья кислородом в зависимости от температуры нагрева дутья оказывает неоднозначное влияние на расход кокса [3].

Расчетные характеристики зависимостей влияния обогащения дутья кислородом и повышения температуры дутья на показатели доменного процесса представлены на рис. 36. Расчетные характеристики получены при постоянном удельном расходе кокса и постоянной степени прямого восстановления. Цифры у траекторий соответствуют величинам температуры горячего дутья.

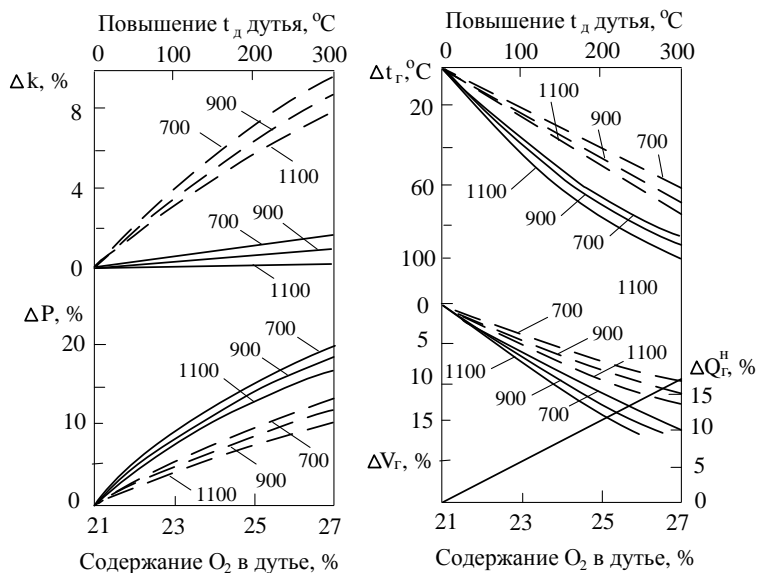


Рис. 36. Влияние обогащения дутья кислородом (сплошные линии) и повышения температуры дутья t_d (пунктирные линии) на экономию кокса Δk , %, повышение производительности печи ΔP , %; изменение температуры колошникового газа Δt_g , °С, количество ΔV_g , %, и теплотворную способность колошникового газа ΔQ_g^H , %

Контрольные вопросы к разделу 5

1. Чем отличаются статические и динамические характеристики параметров доменного процесса?
2. Есть ли общие равные значения параметров в статических и динамических характеристиках доменного процесса?
3. Почему излишне большое удельное количество природного газа в дутье нежелательно?

6. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА КОКСА

6.1. Общие положения

Дальнейшее развитие технологии доменного производства направлено на уменьшение удельного расхода дефицитного и дорогостоящего кокса, повышение производительности печи и сокращение простоев.

Основным видом дополнительного топлива, подаваемого через фурмы, является природный газ. Эффективность использования природного газа, как и любого другого дополнительного топлива (мазута, каменного угля и др.), определяется величиной коэффициента эквивалента замены кокса $\mathcal{E}_{\text{зк}}$ и приростом производительности ДП.

Использование природного газа с экономической точки зрения не вызывает сомнений в целесообразности. Один килограмм кокса стоит в 2÷3 раза больше, чем 1 м³ природного газа. При такой разнице цен, даже $\mathcal{E}_{\text{зк}} = 0,4$ считается экономически эффективной величиной.

Так, за 2001 год расход кокса на ПАО «ММК» составил 451,1 кг/т, в то время как за рубежом аналогичный показатель составляет 390÷400 кг/т чугуна, достигнутый в то же время.

Исследования Сеничкина Б.К. подтвердили наличие экстремально-го вида зависимости удельного расхода кокса от удельного расхода природного газа. Эти зависимости для различных величин удельного расхода кислорода представлены на рис. 37 (для печей ММК [24]).

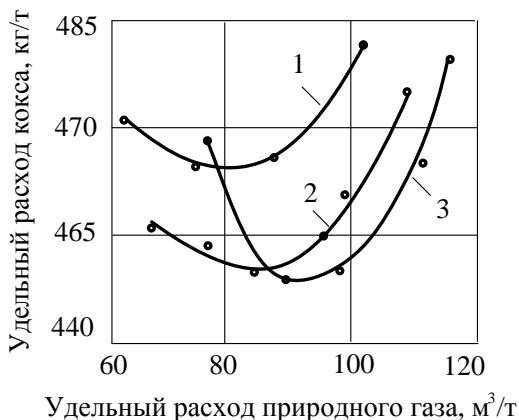


Рис. 37. Зависимости удельного расхода кокса от удельного расхода природного газа при различных удельных расходах кислорода в дутье: 1 – 60÷78 м³/т; 2 – 80÷99 м³/т; 3 – 100÷119 м³/т

С увеличением удельного расхода кислорода в дутье минимально возможный расход кокса уменьшается по сложной зависимости, т.е. статические экстремальные характеристики, определяющие зависимость удельного расхода кокса от удельного расхода природного газа и зависимости от удельного расхода кислорода, подвержены дрейфу (смещению). Поэтому при оптимизации управления подачи природного газа необходимо использовать динамические поисковые системы автоматической оптимизации управления (САОУ).

Увеличение удельного расхода кокса при значительных (более $80 \text{ м}^3/\text{т}$) удельных расходах природного газа вызвано большими затратами тепла на разложение (конверсию) природного газа и неэффективным использованием образовавшегося сажистого углерода в восстановительных процессах доменной плавки.

Производительность доменной печи при всех прочих равных условиях зависит от соотношения удельных расходов природного газа $V_{\text{пр}}$ и удельного расхода технического кислорода $V_{\text{тк}}$, т.е. от величины $V_{\text{пр}}/V_{\text{тк}}$.

Экспериментальные (для условий доменного цеха ПАО «ММК») статистические зависимости величины часовой производительности доменной печи от отношения удельных расходов $V_{\text{пр}}/V_{\text{тк}}$ для различных значений удельного расхода технического кислорода представлены на рис. 38.

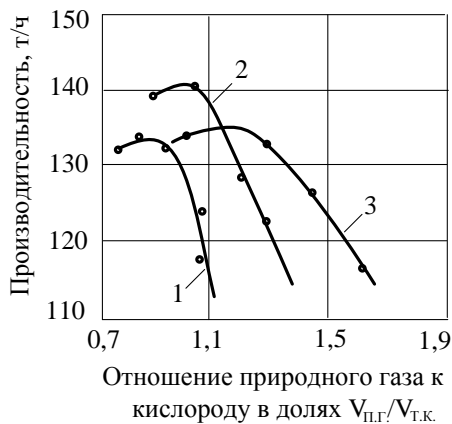


Рис. 38. Зависимости производительности доменной печи от соотношения удельных расходов природного газа и технического кислорода $V_{\text{пр}}/V_{\text{тк}}$: 1 – при $V_{\text{тк}}=80\div99 \text{ м}^3/\text{т}$; 2 – при $V_{\text{тк}}=100\div119 \text{ м}^3/\text{т}$; 3 – при $V_{\text{тк}}=120\div140 \text{ м}^3/\text{т}$

При статистической обработке экспериментальных данных и при проведении опытных плавки в реальных условиях приходится за сравнительный период принимать показатели работы ДП не без природного

газа, а работу печей с меньшим или большим расходом в сравнении с опытным периодом. В этом случае учитывается влияние не всего количества подаваемого газа, а только его добавки. Это приводит к значительным колебаниям коэффициента эквивалента замены кокса $\mathcal{E}_{\text{зк}}$.

Даже при незначительном улучшении использования природного газа величина $\mathcal{E}_{\text{зк}}$ может быть более $1,0 \text{ кг/м}^3$, а при снижении эффективности использования – менее $0,5 \text{ кг/м}^3$.

Более надежными и аргументированными являются теоретические способы определения эквивалента замены кокса природным газом. Но предложенные ранее методы были получены без учета перехода углерода, кокса и природного газа в чугуна и выноса из печи с колошниковой пылью и шлаком. Не принимался во внимание пиролиз природного газа в фурменной зоне, не учитывалось участие углерода природного газа и кокса в прямом восстановлении оксидов железа, не принималось то физическое тепло горячего дутья, которое вносится в доменную печь при снижении кокса и природного газа и участвует в формировании эквивалента замены.

Кроме того, при вдувании природного газа в горн доменной печи его углерод не вносит в нижнюю зону печи того тепла, которое бы внес углерод кокса при опускании от колошника до фурменной зоны, а при горении природного газа до CO и H_2O в области фурм его углерод выделяет меньше тепла по сравнению с углеродом кокса из-за затрат тепла на разложение содержащихся в природном газе углеводородов. Меньший приход тепла от горения природного газа должен компенсироваться в нижней зоне доменной печи теплом за счет горения кокса. Поэтому при определении эквивалента замены кокса природным газом без учета отмеченных положений искусственно занижается тепловая ценность природного газа.

С учетом высказанных замечаний эквивалент замены кокса K_3 природным газом определяется отношением выделяющегося в доменной печи тепла от использования 1 м^3 природного газа к теплу, которое выделится от использования в печи 1 кг кокса (кг/м^3), с учетом степеней использования оксида углерода и водорода при восстановлении оксидов железа и других элементов чугуна, участия углерода кокса и природного газа в науглероживании чугуна и прямом восстановлении, потерь углерода кокса и природного газа с колошниковой пылью, шлаком и выносом их в процессе выпусков чугуна, тепла горячего дутья, необходимого для сжигания единицы природного газа и кокса в фурменной зоне доменной печи, и тепла, вносимого доходящим до фурм углеродом кокса, т.е. $K_3 = Q_{\text{г}}/Q_{\text{к}}$, где $Q_{\text{г}}$ – тепло от использования в доменной печи 1 м^3 природного газа, кДж/м^3 ; $Q_{\text{к}}$ – тепло от использования в доменной печи 1 кг кокса, кДж/кг . Учитывая важность этого показателя для обеспечения энергосберегающего режима работы ДП, величину K_3 можно определить по методике, предложенной Воскобойниковым В.Г., как пример детерминированной модели этого важного теплового процесса [19].

В системе оптимизации расхода природного газа количество кокса, замененного природным газом E_k [кг/ч], определяется по выражению

$$E_k = V_{\text{пр}} \cdot K_3, \quad (6.1)$$

где $V_{\text{пр}}$ – расход природного газа, кг/ч.

Система автоматической оптимизации управления (CAOU) расходом природного газа в доменную печь включает микропроцессорный контроллер типа Simatic S7-400, технические средства контроля, преобразования и ввода в контроллер информации: о содержании в колошниковом газе CO , CO_2 , H_2 ; расходов дутья, природного газа, кислорода, кокса; влажности и температуры дутья. Программно реализованный контур управления расходом природного газа обеспечивает целенаправленное изменение текущего расхода природного газа с целью минимизации текущего расхода кокса.

CAOU расходом природного газа функционирует следующим образом. С периодичностью, определяемой динамическими параметрами оптимизируемого процесса (через $6 \div 10$ ч), осуществляется изменение удельного расхода природного газа в направлении увеличения на $500 \div 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ при текущем значении удельного расхода кокса и заданном удельном расходе кислорода для обогащения дутья.

Удельный расход природного газа определяется как общее количество поданного в печь природного газа между очередными выпусками чугуна, деленное на количество тонн чугуна, полученное на очередном выпуске.

Определяющим фактором эффективности увеличения удельного расхода природного газа является изменение теплового состояния печи, оцениваемое через $6 \div 10$ ч при установленных текущих удельных расходах природного газа и кокса.

Увеличение температур чугуна и шлака на выпуске, повышение содержания кремния и марганца при одновременном уменьшении содержания серы в чугуне свидетельствует о разогреве доменной печи. Для поддержания ровного хода печи в этом случае целесообразно уменьшить величину удельного расхода кокса и увеличить удельный расход природного газа.

Уменьшение температуры чугуна и шлака на выпусках, снижение содержания кремния и марганца с одновременным увеличением содержания серы в чугуне указывает на похолодание доменной печи при текущих расходах кокса и природного газа. Поэтому для обеспечения нормального ровного хода доменной печи необходимо вначале уменьшить расход природного газа при текущем удельном расходе кокса, а затем при сохранении похолодания печи увеличить удельный расход кокса.

Тепло от использования в доменной печи 1 м³ природного газа [10] рассчитывается по выражению

$$Q_r = q_r \cdot \alpha \cdot \zeta + 23609 \cdot \eta_{co} \cdot C'_r + \frac{0,9333 \cdot C_r \cdot \alpha \cdot i_d}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} \cdot \zeta + \left(H_r + \frac{0,9333 \cdot C_r \cdot \alpha \cdot \varphi}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} \right) \cdot 10800 \cdot \eta_{H_2} \cdot \zeta, \quad (6.2)$$

где Q_r – теплота от использования природного газа, кДж/м³;
 q_r – теплота горения природного газа до СО и Н₂, кДж/м³;
 α – коэффициент учета пиролиза природного газа, ед.;
 C'_r – углерод природного газа за вычетом потерь и перехода его в чугун, кг/м³;
 C_r – углерод природного газа, кг/м³;
 i_d – энтальпия горячего дутья, кДж/м³;
 φ – влажность дутья, м³/м³;
 ω_0 – содержание кислорода в сухом дутье, м³/м³;
 H_r – содержание водорода в природном газе, м³/м³;
 0,9333 – расход кислорода на сжигание 1 кг углерода до СО, м³.

Теплота горения природного газа до оксидов углерода и водорода рассчитывается по выражению q_r , кДж/м³:

$$q_r = 15,9 \cdot C_{H_4} + 60,9 \cdot C_{C_2H_6} + 101,68 \cdot C_{C_3H_8} + 132,28 \cdot C_{C_4H_{10}} + 168,44 \cdot C_{C_5H_{12}} - 126,4 \cdot C_{CO_2}, \quad (6.3)$$

где C_{H_4} , $C_{C_2H_6}$, $C_{C_3H_8}$, $C_{C_4H_{10}}$, $C_{C_5H_{12}}$, C_{CO_2} – содержание соответствующих компонентов в природном газе, %.

Содержание углерода в природном газе определяется по выражению C_r , кг/м³:

$$C_r = \frac{(C_{H_4} + 2 \cdot C_{C_2H_6} + 3 \cdot C_{C_3H_8} + 4 \cdot C_{C_4H_{10}} + 5 \cdot C_{C_5H_{12}} + C_{CO_2} + C_{CO}) \cdot 12}{100 \cdot 22,4}, \quad (6.4)$$

где C_{CO} – содержание монооксида углерода в природном газе, %.

Углерод природного газа C'_r , кг/м³, за вычетом перешедшего в чугун и потерь со шлаком можно рассчитать так:

$$C'_r = \frac{\Gamma \cdot C_r \cdot \zeta \cdot \beta - C_c \cdot N_r \cdot 0,5}{\Gamma}, \quad (6.5)$$

где Γ – расход природного газа, м³/т чугуна;
 β – коэффициент, учитывающий потери углерода со шлаком;
 C_c – содержание углерода в чугуне, кг/т чугуна;

N_r – доля углерода, вносимого в доменную печь природным газом:

$$N_r = \frac{\Gamma \cdot C_r \cdot \zeta}{K_6 \cdot \frac{C_k}{K_2} + \Gamma \cdot C_r \cdot \zeta}, \quad (6.6)$$

где K_6 – расход кокса на выплавку чугуна, кг/т;

C_k – содержание углерода в коксе, кг/кг;

K_2 – коэффициент, учитывающий потери углерода кокса из ДП.

Содержание водорода в природном газе H_r , м³/м³ можно определить по следующему выражению:

$$H_r = \frac{2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10} + 6 \cdot C_5H_{12}}{100}. \quad (6.7)$$

Тепло от использования 1 кг кокса в доменной печи Q_k определяется по выражению

$$Q_k = (9795 + 23609 \cdot \eta_{CO}) \cdot C'_k + \frac{0,9333 \cdot C_k'' \cdot i_d}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} + \\ + \left(11,2 \cdot H_k + \frac{0,9333 \cdot C_k'' \cdot \varphi}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} \right) \cdot 108000 \cdot \eta_{H_2} + i_c \cdot C_k'', \quad (6.8)$$

где C'_k – углерод кокса, участвующий в горении и восстановлении элементов чугуна, кг/кг;

H_k – содержание водорода в коксе, кг/кг;

i_c – энтальпия углерода кокса при температуре продуктов плавки, кДж/кг;

C_k'' – углерод кокса, доходящий до фурм, кг/кг.

Углерод кокса, участвующий в горении и восстановлении элементов чугуна, рассчитывается по выражению C'_k , кг/кг:

$$C'_k = \frac{\frac{K_6 \cdot C_k}{K_2} - C_{к.п} - C_d \cdot (1 - 0,5 \cdot N_r)}{K_6}, \quad (6.9)$$

где $C_{к.п}$ – содержание углерода в колошниковой пыли, кг/т чугуна.

Углерод кокса, сгорающий за счет кислорода дутья, C_k'' , кг/кг, определяется следующим образом:

$$C_k'' = \frac{K_6 \cdot C'_k - C_d \cdot (1 - 0,5 \cdot N_r)}{K_6}, \quad (6.10)$$

где C_d – углерод на прямое восстановление элементов чугуна из их оксидов и на перевод серы в шлак, кг/т чугуна.

Углерод на прямое восстановление и перевод серы в шлак C_d , кг/т чугуна, определяется с достаточной точностью по выражению вида:

$$C_d = \left(\frac{Fe'_q \cdot rd \cdot 12}{56} + \frac{24Si}{28} + \frac{12Mn}{55} + \frac{48S}{32} \right) \cdot 10 + \left(\frac{60P}{62} + \frac{24Ti}{47,9} + \frac{60V}{101,9} \right) \cdot 10 + \frac{S_{ш} \cdot 12}{32}, \quad (6.11)$$

где Fe'_q – содержание железа в чугуне без металлодобавок, %;
 Si, Mn, S, P, Ti, V – содержание соответствующих элементов в чугуне, %;

rd – степень прямого восстановления железа FeO;

$S_{ш}$ – содержание серы в шлаке, кг/т чугуна.

Степень прямого восстановления железа из FeO можно с достаточной точностью определить по эмпирическому выражению:

$$r_0 = \frac{r_{d_0} (0,684 + 0,01 \cdot \sqrt{t_d})}{10^{\lambda s} \cdot (0,96 + 4\varphi)}, \quad (6.12)$$

где r_{d_0} – степень прямого восстановления железа из FeO при работе доменной печи на атмосферном дутье без использования природного газа;

t_d – температура горячего дутья, °C;

s – расход природного газа, м³/кг чугуна;

λ – характеристика химического состава ($\lambda = 0,373 \cdot C_r + 0,9 \cdot H_r$).

Степень использования оксида углерода в доменной печи при наличии сырого известняка в шихте можно рассчитать по выражению:

$$\eta_{CO} = \frac{V_{к.г} \cdot CO_2 - 0,224 \cdot Из \cdot (1 - r_d) \cdot \chi}{V_{к.г} \cdot (CO_2 + CO) - 0,224 \cdot Из \cdot (1 - r_d) \cdot \chi}, \quad (6.13)$$

где CO_2 – содержание диоксида углерода в колошниковом газе, м³/м³;

$V_{к.г}$ – выход колошникового газа, м³/т чугуна;

χ – содержание CaCO₃ в известняке, кг/кг;

CO – содержание монооксида углерода в колошниковом газе, м³/м³;

Из – расход известняка, кг/т чугуна.

Выход колошникового газа $V_{к.г}$, м³/т чугуна:

$$V_{к.г} = \frac{V_d (1 - \omega_0) + \frac{K_6 \cdot 0,8 \cdot N'_k}{K_2} + \zeta \cdot \Gamma \cdot N'_r}{N_2}, \quad (6.14)$$

где V_d – расход дутья, м³/т чугуна,

$$V_d = \frac{0,9333 \cdot (K_6 \cdot C'_k + \alpha \cdot \Gamma \cdot C_r \cdot \zeta - C_d)}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi}, \quad (6.15)$$

где N'_k – содержание азота в коксе, кг/кг;
 N'_r – содержание азота в природном газе, м³/м³;
 N_2 – содержание азота в колошниковом газе, м³/м³;
 K_6 – коэффициент, учитывающий долю кокса, затраченного при горении;
 α – коэффициент учета пиролиза природного газа;
 Γ – удельный расход природного газа, м³/т;
 C_r – углерод, вносимый в ДП природным газом;
 C_d – углерод прямого восстановления (удельный), кг/т;
 ζ – коэффициент потерь углерода с чугуном;
 ω_0 – содержание O₂ в сухом дутье, м³/м³;
 φ – влажность дутья, м³/м³.

В случае отсутствия сырого известняка в шихте степень использования оксида углерода η_{CO} определяется по выражению

$$\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO_2 + CO}. \quad (6.16)$$

Для достоверности определения степени использования оксидов углерода состав колошникового газа следует проверить на сумму CO₂ и CO по эмпирическому выражению, полученному посредством обработки показателей доменной плавки с использованием природного газа на обогащенном кислородом дутье, %:

$$\sum(CO_2 + CO) = 20,303 + 1,1066(O_2) - 0,00761(O_2)^2, \quad (6.17)$$

где (O₂) – содержание кислорода в дутье, %.

Если расчетная сумма превышает ее значение по анализу, то необходимо принимать рассчитанную величину, поправляя содержание оксидов углерода, а если наоборот, то принимаются данные анализа.

Определяется по выражению, в котором расходы дутья, природного газа и кокса приняты в расчете на 1 т чугуна:

$$\eta_{H_2} = 1 - \frac{H_2 \cdot (1 - \omega_0) \cdot (1 - \varphi) \cdot V_d}{N_2 \cdot \left(H_{r.об} + \varphi \cdot V_d + \frac{11,2 \cdot H_k \cdot K_6}{K_2} \right)}, \quad (6.18)$$

где H_2 – содержание водорода в колошниковом газе, м³/м³;
 $H_{r.об} = H_r \cdot \Gamma \cdot \zeta$ – приход H₂ от природного газа, м³/т чугуна.

Энтальпию углерода кокса, доходящего до фурм, можно рассчитать по выражению i_c , кДж/кг:

$$i_c = 1,6577 \cdot t_c, \quad (6.19)$$

где t_c – температура углерода кокса.

После определения всех величин выражение для эквивалента замены кокса природным газом K_3 можно записать в виде:

$$K_3 = K_1 / K_2, \quad (6.20)$$

$$K_1 = q_r \cdot \alpha \cdot \zeta + 23609 \cdot \eta_{CO} \cdot C'_r + \frac{0,9333 \cdot C_r \cdot \alpha \cdot i_d}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} \cdot \zeta + \left(H_r + \frac{0,9333 \cdot C_r \cdot \alpha \cdot \varphi}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} \right) \cdot 10800 \cdot \eta_{H_2} \cdot \zeta;$$

$$K_2 = (9795 + 23609 \cdot \eta_{CO}) \cdot C'_r + \frac{0,9333 \cdot C''_k \cdot i_d}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} + \left(11,2 \cdot H_k + \frac{0,9333 \cdot C''_k \cdot \varphi}{\omega_0 + 0,5 \cdot \varphi} \right) \cdot 10800 \cdot \eta_{H_2} + i_c \cdot C''_k.$$

Определение K_3 по приведенной формуле дает возможность учитывать условия каждого предприятия, различный состав природного газа, и по этой причине он будет различным в каждом цехе и на отдельной доменной печи. Приведенное выражение позволяет определять K_3 теоретически по параметрам доменной плавки за любой период работы печи с использованием природного газа [19].

В качестве примера определим эквивалент замены кокса природным газом на ММК по показателям работы доменного цеха за 2001 г. Исходные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные

Наименование величины	Обозначение	Численное значение	Размерность величин
Коэффициент учета пиролиза природного газа	α	0,85 (15)	ед. (%)
Коэффициент учета потерь природного газа	ξ	0,998 (0,2)	ед. (%)
Энтальпия горячего дутья	i_d	1555,5	кДж/кг
Влажность дутья	φ	0,006	м ³ /м ³
Содержание кислорода в дутье	ω	0,244	м ³ /м ³

Наименование величины	Обозначение	Численное значение	Размерность величин
Состав природного газа	CH ₄	96	%
	C ₂ H ₆	3	%
	C ₃ H ₈	1,8	%
	C ₄ H ₁₀	0,5	%
Расход природного газа	Г	98,4	м ³ /т
Удельный расход кокса	K _б	435,7	кг/т
Коэффициент, учитывающий потери углерода кокса из печи	K ₂	0,98 (2)	ед. (%)
Содержание водорода в коксе	H _к	0,00395	кг/кг
Содержание углерода в коксе	C _к	0,85	кг/кг
Содержание углерода в колошниковой пыли	C _{к.п}	20	кг/т
Содержание углерода в чугуне	C _ч	47,06	кг/т
Состав чугуна	Fe _ч	94,3	%
	Si	0,635	%
	Mn	0,192	%
	S	0,015	%
	P	0,045	%
	Ti	0,083	%
Содержание серы в шлаке	S _ш	3,05 (0,93)	кг/т ч (% в шлаке)
Степень прямого восстановления железа из FeO при работе на атмосферном дутье без природного газа	Rdo	0,35	ед.
Температура горячего дутья	t _д	1198	°C
Расход природного газа	s	0,0984	м ³ /кг ч
Состав колошникового газа	CO ₂	18,6	%
	CO	23,8	%
	H ₂	0,064	м ³ /м ³
	N ₂	0,512	м ³ /м ³
Расход дутья	V _д	2350	м ³ /мин
Температура углерода кокса	t _с	1450	°C

Получено следующее значение коэффициента замены кокса природным газом: 0,75 кг/м³. Такой результат говорит о том, что природный газ на доменных печах ММК усваивался достаточно эффективно, и это делает актуальной необходимость внедрения системы оптимизации расхода природного газа.

Количество кокса E_k , которое заменяется природным газом по методу, предложенному Воскобойниковым В.Г., вычисляется по формуле

$$E_k = V_{\text{ПГ}} \cdot K_3. \quad (6.21)$$

Одновременно в микропроцессорном контролере вычисляется теоретическая температура горения t_T по формуле

$$t_T = 2405 + 0,75(T_d - 1200) - 5,4W + 43([O_2] - 21) - 52Q_{ПГ}, \quad (6.22)$$

где T_d – температура дутья, °С;

$$W = Y_0 + \frac{1000 \cdot G}{Q_d} - \text{влажность дутья, г/м}^3;$$

Y_0 – естественная сезонная влажность дутья, г/м³;

G – массовый расход пара на увлажнение дутья, кг/мин;

Q_d – объёмный расход дутья, м³/мин;

$[O_2]$ – содержание кислорода в дутье, %;

$Q_{ПГ}$ – объёмный расход природного газа, %.

Значение естественной влажности дутья Y_0 берётся из табл. 5 для соответствующего месяца.

Таблица 5

Изменение среднемесячной влажности воздуха в г. Магнитогорске

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Влажность, г/м ³	1,5	2	3-4	6-8	10-12	6-8	5-6	3	2			

Теоретическая температура горения сравнивается с установленными пределами оптимальных значений (1900-2050°С). Если $t_T > 2500$ °С, то определяется $\Delta t_T = t_T - 2000$. Если $t_T < 1900$ °С, то определяется $\Delta t_T = t_T - 1950$. По значению Δt вычисляются рекомендации на изменение расхода кислорода ΔV_{O_2} , м³/ч:

$$\Delta V_{O_2} = -0,0164 \cdot \Delta t \cdot V_d, \quad (6.23)$$

где V_d – расход дутья, м³/мин.

Контролируется также колебание количества замененного кокса природным газом E_k и выдаются рекомендации на изменение массы коксовой колоши. В обычных условиях применения природного газа рудную нагрузку на кокс корректируют за 3-4 ч до запланированного изменения природного газа. В условиях эксплуатации системы неизвестно, в какую сторону будет изменяться расход природного газа, и заранее изменить рудную нагрузку невозможно. Поэтому система определяет рекомендации на изменение массы коксовой колоши по следующей методике. В течение первого шага функционирования системы вычисляются значения коэффициента замены кокса, количества замененного кокса. В зависимо-

сти от теплового состояния, ЭВМ выдает управляющее воздействие на увеличение или уменьшение расхода природного газа и одновременно вычисляет требуемое изменение массы кокса за один шаг Δm , кг/ч:

$$\Delta m = -\Delta V_{\text{ПГ}} \cdot K_{3n-1}, \quad (6.24)$$

где ΔV – принятое изменение расхода природного газа, м³/ч;

K_{3n-1} – значение коэффициента замены кокса природным газом, вычисленное по информации за предыдущий шаг.

После второго шага определяется фактическое изменение количества замененного кокса природным газом по сравнению с предыдущим $E_{K_{n-1}}$:

$$\Delta E_K = E_K - E_{K_{n-1}} \quad (6.25)$$

и поправка на выполненное изменение массы коксовой колоши за предыдущий шаг:

$$P = -\Delta E_K - \Delta K_{n-1}, \quad (6.26)$$

где ΔK_{n-1} – выданная и выполненная рекомендация на изменение массы кокса в предыдущем шаге.

Требуемое изменение массы коксовой колоши Δm , кг/ч, в конце второго и начале третьего шага после выдачи нового управляющего воздействия на изменение количества природного газа $\Delta V_{\text{ПГ}}$ вычисляется:

$$\Delta m = \Delta V_{\text{ПГ}} \cdot K_{3n-1} + \Delta E_K - \Delta K_{n-1}. \quad (6.27)$$

После третьего шага и всех последующих требуемое изменение массы коксовой колоши Δm , кг/ч, определяется как

$$\Delta m = -\Delta V_{\text{ПГ}} \cdot K_{3n-1} + (-\Delta E_K \cdot \Delta K_{n-1} + P_{n-1}). \quad (6.28)$$

Эта формула учитывает ожидаемое изменение количества замененного кокса природным газом ($-\Delta V_{\text{ПГ}} \cdot K_{3n-1}$) и разность между его фактическим изменением ($-\Delta E_K$) и выполненной рекомендацией на изменение массы коксовой колоши в прошлый шаг (P_{n-1}). После третьего шага и последующих значение P , кг/ч, определяют по формуле

$$P = -\Delta E_K - \Delta K_{n-1} + P_{n-1}. \quad (6.29)$$

Система работает в режиме автоматического управления расходом природного газа с выдачей рекомендаций на изменение расхода кислорода и массы коксовой колоши. При нарушениях хода печи (тихий ход, частые остановки, неполноты) систему переводят в информационно-советующий режим. Рекомендации на изменение расхода кислорода, массы коксовой колоши и управляющие воздействия на изменение расхода природного газа высвечиваются на световом табло, которое расположено в помещении КИП печи у пульта мастера и выводятся на печать. На печать выводятся также значения коэффициента замены кокса природным газом, количество замененного кокса, экономия денежных средств и степень использования водорода и окиси углерода [1].

Пример определения рекомендаций на изменение массы коксовой колоши рассмотрен в табл. 6, где M – масса коксовой колоши.

Таблица 6

Пример определения рекомендаций
на изменение массы коксовой подачи

Номер шага	$V_{\text{ПГ}} \times 10^3$ м ³ /ч	$\Delta V_{\text{ПГ}} \times 10^3$ м ³ /ч	K_3 , кг/м ³	$\Delta V_{\text{ПГ}} \times K_{3n-1}$	E_k , кг/ч	ΔE_k , кг/ч	Δm , кг/ч	Δk , кг/ч	M , кг	P , кг/ч
1	11,0	0,5	0,77	-283	8419	0	-283	0	70000	0
2	11,5	0,5	0,82	-383	9417	998	-1381	-1000	69000	-998
3	12,0	0,5	0,90	-409	10381	964	-1371	-1000	68000	-962
4	12,5	0,5	0,90	-433	11300	919	-1212	-1000	67000	-881
5	13,0	0,5	0,94	-452	12163	863	-1195	-1000	66000	-743
6	13,5	0,5	0,96	-468	12959	796	-1007	-1000	65000	-539
7	14,0	0,5	0,98	-480	13677	718	-737	0	65000	-257
8	14,5	0,5	0,99	-488	14306	629	-1375	-1000	64000	-886
9	15,0	0,5	0,99	-493	14835	592	-909	-1000	63000	-416
10	15,0	-0,5	0,98	492	15254	419	660	0	63000	166
11	15,0	0,5	0,99	-492	14835	-419	92	0	63000	584
12	15,0	-0,5	0,98	492	15254	419	660	0	63000	166
13	15,0	0,5	0,99	-492	14835	419	92	0	63000	584

Рассмотренная система управления подачей природного газа с использованием детерминированной модели громоздка, сложна и требует использования большого количества экспериментальных данных и различных эмпирических коэффициентов.

Эффективно работающей системы управления расходом природного газа по технологическим параметрам и математическим моделям до сих пор создать не удалось. Поэтому рассмотрим новый интеллектуальный способ решения указанной проблемы.

6.2. Принцип работы системы автоматической оптимизации управления подачей природного газа дискретного (шагового) действия

Учитывая значительную инерционность доменного процесса по каналу «расход природного газа – расход кокса» и неоднозначность влияния расхода природного газа на расход кокса, для оптимизации управления подачей природного газа в ДП целесообразно использовать САОУ шагового (дискретного) принципа действия (ШСАОУ), функционирующую по запоминанию экстремума приращений выходного параметра (расхода кокса) оптимизируемого процесса.

Поскольку вид и текущее положение статической характеристики оптимизируемого процесса (см. рис. 37) в реальных условиях заранее не определены и неизвестны, то в ШСАОУ использован поисковый принцип работы.

На вход оптимизируемого технологического процесса (объекта управления) подается дискретное ступенчатое управляющее воздействие (расход природного газа) и через интервал времени, величина которого определяется параметрами инерционности и запаздывания, определяется реакция (отклик) оптимизируемого процесса на внесенное управляющее воздействие.

После реакции объекта управления на первоначальное управляющее входное воздействие определяется направление и величина последующего управляющего воздействия в соответствии с основным принципом оптимизации.

Если изменение выходного параметра соответствует приближению к цели управления (в нашем случае уменьшается), то принятое направление изменения управляющего воздействия считается правильным и должно быть сохранено на последующем шаге управления.

Если изменение выходного параметра не соответствует принятой цели управления (в нашем случае увеличивается), то принятое направление изменения управляющего входного воздействия следует считать ложным и на последующем шаге должно быть изменено на противоположное.

Структурная схема САОУ шагового типа представлена на рис. 39.

Объект управления (ОУ) аппроксимируется последовательным соединением статического звена с характеристикой $Y=f(x)$ и двух инерционных звеньев с постоянными времени T_0 , характеризующими инерционные свойства процесса, и τ_3 – определяющей время запаздывания.

Правомерность замены передаточной функции звена запаздывания инерционным звеном определяется соблюдением условия $T_0 \gg \tau_3$ [20].

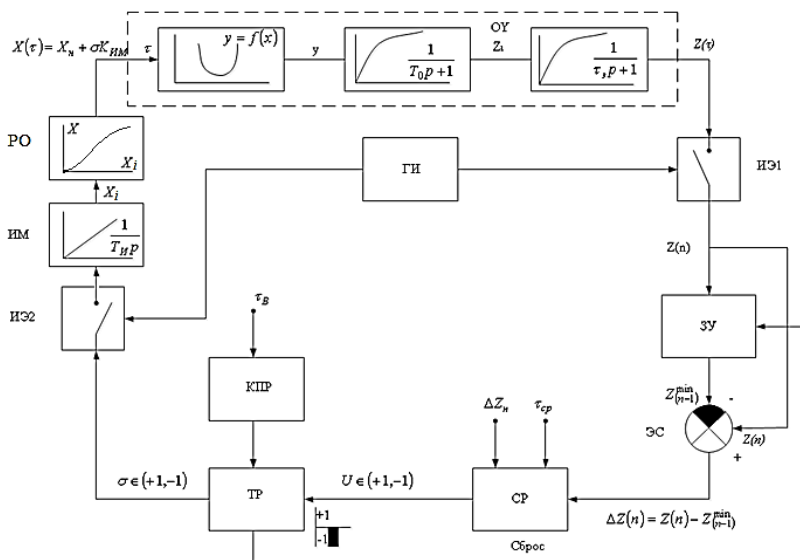


Рис. 39. Структурная схема САОУ расходом природного газа дискретного (шагового) типа

Дискретный режим работы САОУ обеспечивается генератором импульсов ГИ, который синхронно управляет импульсными элементами (ключами) ИЭ₁ и ИЭ₂, формируя импульсный режим воздействия входного параметра

$$X(\tau) = X_n + \sigma \cdot K_{им} \cdot \Delta\tau_u,$$

где $X(\tau)$, X_n – текущее и начальное значение управляющего входного воздействия (расхода природного газа);

$\sigma(\tau) \in (+1;-1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление изменения управляющего воздействия;

$\Delta\tau_u$ – продолжительность управляющего воздействия в пределах одного шага изменения $X(\tau)$, время работы ИМ, перемещающего регулирующий орган;

$K_{им}$ – скорость изменения управляющего входного воздействия.

Непрерывный (аналоговый) выходной сигнал $Z(\tau)$ преобразуется импульсным элементом ИЭ₁ в последовательность импульсов амплитудой $Z(n)$ продолжительностью $\Delta\tau_n$ и паузой между ними $\Delta\tau_n \geq (T_0 + \tau_3) = T_3$, где T_3 – эквивалентная постоянная времени.

Импульсы $Z(n)$ одновременно поступают на запоминающее устройство ЗУ и элемент сравнения ЭС.

Программно реализованное ЗУ выполнено таким образом, что оно способно запомнить только минимальное значение $Z_{(n-1)}^{\min}$, достигнутое в прошедший момент времени, в соответствии с условиями:

$$\begin{aligned} \text{если } Z(n) < Z_{(n-1)}^{\min}, \text{ то } Z_{(n-1)}^{\min} &= Z(n); \\ \text{если } Z(n) > Z_{(n-1)}^{\min}, \text{ то } Z_{(n-1)}^{\min} &= Z_{(n-1)}^{\min}, \end{aligned} \quad (6.30)$$

где n – номер текущего шага управления.

На выходе элемента сравнения ЭС формируется текущее значение сигнала приращения оптимизируемого параметра $\Delta Z(n)$ в соответствии с выражением $\Delta Z(n) = Z(n) - Z_{(n-1)}^{\min}$.

Сигнал $\Delta Z(n)$ подается на вход логического устройства сигнум-реле (СР), на выходе которого формируется управляющая функция $U(\tau)$ в соответствии с условиями:

$$\begin{aligned} \text{если } Z(n) - Z_{(n-1)}^{\min} - \Delta Z_n \leq 0, \text{ то } U(\tau) &= +1, \\ \text{если } Z(n) - Z_{(n-1)}^{\min} - \Delta Z_n > 0, \text{ то } U(\tau) &= -1, \end{aligned} \quad (6.31)$$

где ΔZ_n – заданная зона нечувствительности сигнум-реле.

Импульсный сигнал $U(\tau) = -1$ перебрасывает триггер-реверс (ТР) из одного устойчивого состояния в другое. На выходе ТР формируется переключающая функция $\sigma(\tau) \in (+1, -1)$, определяющая текущее направление изменения входного управляющего воздействия $X(\tau)$ при работе исполнительного механизма ИМ.

Связь между управляющей $U(\tau)$ и переключающей функцией $\sigma(\tau)$ определяется условиями:

$$\begin{aligned} \text{если } U(\tau) = +1, \text{ то } \sigma(\tau + 1) &= \sigma(\tau), \\ \text{если } U(\tau) = -1, \text{ то } \sigma(\tau + 1) &= -\sigma(\tau), \end{aligned} \quad (6.32)$$

где $\tau, \tau+1$ – текущий и последующий моменты времени.

Основное правило работы САОУ шагового типа формируется следующим образом.

Изменение направления (знака) управляющего воздействия необходимо производить в том случае, когда текущее значение оптимизируе-

мого параметра увеличиться по сравнению с минимальной величиной, достигнутой в прошедший $\tau-1$ период времени, на величину большую, чем принятая зона нечувствительности ΔZ_n .

При срабатывании ТР, т.е. при изменении направления управляющего воздействия (смене знака $\sigma_{(\tau)}$), запомненное в ЗУ значение $Z_{(n-1)}^{\min}$ срабатывается и запоминается текущее значение $Z(n)$.

Для прерывания монотонного направления управляющего воздействия при наличии технологических возмущений в САОУ предусмотрен коммутатор поворочных реверсов (КПР), который осуществляет принудительную переброску ТР (изменение знака $\sigma_{(\tau)}$) через заданный интервал времени $\tau_B = 2,5 \div 3(T_0 + \tau_3)$ с момента очередного реверса, формируемого СР.

Для исключения повторного ложного реверса, вызванного значительной инерционностью и запаздыванием оптимизируемого процесса в СР предусмотрен запрет на повторный реверс в течение времени выдержки сигнум-реле $\tau_{\text{СР}}$. Отсчет времени начинается с момента формирования $U(\sigma) = -1$ при условии $\tau_{\text{СР}} = 0,6 \div 0,9(T_0 + \tau_3)$.

Величина скорости изменения входного параметра $K_{\text{им}}$ определяется значением T_u – времени движения ИМ от одного крайнего положения регулирующего клапана расхода природного газа до другого. Это техническая характеристика используемого исполнительного механизма (вторая цифра в обозначении ИМ, например, МЭО-100/63-0,25). Это означает, что величина изменения управляющего воздействия за один шаг Δx будет определяться выражением $\Delta x = \sigma \cdot K_{\text{им}} \cdot \Delta \tau_{\text{и}}$.

Статистическая характеристика инерционного с запаздыванием процесса определяется функцией $\bar{Y} = f(x)$, о которой известно, что она унимодальная (одноэкстремальная) и имеет минимум.

Поскольку в САОУ шагового типа ИМ изменяет величину входного управляющего воздействия (удельный расход природного газа) скачкообразно, то правая часть дифференциального уравнения, определяющего динамику изменения выходного оптимизируемого параметра (удельного расхода кокса) $Z(\tau)$, будет иметь вид ступенчатой функции [21, 22]:

$$T_3 \cdot \frac{dZ(\tau)}{d\tau} + Z(\tau) = f(x_{\text{кон}}) - f(x_{\text{нач}}), \quad (6.33)$$

где $T_3 = T_0 + \tau_3$ – эквивалентная величина постоянной времени, принятая для упрощения расчета;

$f(x_{\text{нач}})$ – начальное установившееся значение выходного параметра в соответствии с $\bar{Y} = f(x)$ перед очередным шаговым изменением управляющего воздействия;

$f(x_{\text{кон}}) = \bar{Y}_{\text{кон}}$ – конечное установившееся значение выходного параметра в результате очередного перемещения ИМ, изменяющего величину входного управляющего воздействия (параметра) на $\Delta x = \sigma \cdot K_{\text{ИМ}} \cdot \Delta \tau_{\text{и}}$ или $x_{\text{кон}} = x_{\text{нач}} + \Delta x$.

Здесь $\sigma(\tau)$ – функция, определяющая направление изменения входного параметра $\sigma(\tau) \in (+1; -1)$; $K_{\text{ИМ}}$ – скорость исполнительного механизма (ИМ) в соответствии с технической характеристикой; $\Delta \tau_{\text{и}}$ – продолжительность включения ИМ – величина постоянная, определяемая настройкой генератора импульсов (ГИ).

Импульсный (шаговый) режим работы ИМ по командам ГИ реализуется в соответствии с условием $\Delta \tau = (\Delta \tau_{\text{и}} + \Delta \tau_{\text{п}}) \geq T_{\text{с}} = (T_0 + \tau_{\text{с}})$, где $\Delta \tau_{\text{п}} \gg \tau_{\text{п}}$ – продолжительность паузы между $n-1$ и n шагами ИМ, есть величина постоянная.

Допустим, что начальное состояние оптимизируемого процесса в момент времени $\tau = 0$ (при включении САОУ в работу) характеризуется состоянием $x_{(\tau=0)} = x_0$; $Z_{(\tau=0)} = Z_0 = f(x_0)$, т. е. процесс находится в установившемся состоянии (рис. 40, а).

Рассмотрим отклонение текущего значения $Z(\tau)$ от его начального установившегося значения $Z_0 = f(x_0)$. С этой целью введем новую переменную $Z_1(\tau) = Z(\tau) - Z(\tau_0)$. Это означает, что при $\tau = 0$ $Z_1(\tau = 0) = 0$.

После первого шага ИМ величина входного параметра будет $x_1 = x_0 + \Delta x$ и в оптимизируемом процессе начнется переходный процесс в соответствии с уравнением

$$T_{\text{с}} \cdot \frac{dZ_1}{d\tau} + Z_1(\tau) = f(x_1) - f(x_0). \quad (6.34)$$

Решение уравнения (6.34) имеет вид экспоненты (рис. 40, б):

$$Z_1(\tau) = [f(x_1) - f(x_0)] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_{\text{с}}}} \right). \quad (6.35)$$

В общем случае изменение выходного параметра ΔZ_1 при изменении входного на величину Δx включает в себя в соответствии с дискретным (шаговым) движением ИМ две составляющие:

$$\Delta Z_1 = \Delta Z_1^{\text{И}} + \Delta Z_1^{\text{П}}, \quad (6.36)$$

где $\Delta Z_1^{\text{И}}$ – изменение выходного параметра при движении ИМ за время управляющего импульса $\Delta \tau_{\text{и}}$;

$\Delta Z_1^{\text{П}}$ – изменение выходного параметра за время остановки ИМ на время паузы $\Delta \tau_{\text{п}}$, когда выходной параметр $Z_1(\tau)$ изменяется по экспоненте.

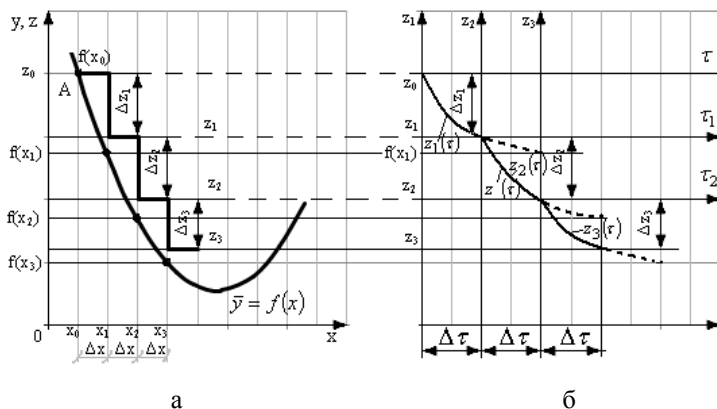


Рис. 40. Траектории поискового процесса в САОУ шагового типа:

а – траектория в плоскости « $Y(x)$, $Z(x) - x$ »;

б – траектория изменения выходного параметра во времени при дискретном изменении величины входного параметра

Если скорость ИМ достаточно велика, то при большой величине постоянной времени T_3 ($10 \div 12$ ч) изменение значения выходного параметра ΔZ_1 за время $\Delta \tau_{\text{и}}$ ($1,5 \div 3$ с) будет пренебрежимо мало.

За время одного шага управления продолжительностью $\Delta \tau$ (между двумя последовательными шагами ИМ) выходная величина $Z_1(\tau)$ в основном по экспоненциальной траектории изменится на величину ΔZ_1 (см. рис. 40, б);

$$\Delta Z_1 = [f(x_1) - f(x_0)] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta \tau}{T_3}}\right). \quad (6.37)$$

Следовательно, перед вторым шагом ИМ (при $\tau = \Delta \tau$) выходной параметр оптимизируемого процесса в общем случае примет значение $Z(\Delta \tau) = Z_0 + \Delta Z_1$. В рассматриваемом случае $\Delta Z_1 < 0$.

Для определения значения выходного параметра в процессе второго шага введем новые переменные $Z_2(\tau)$ и τ_1 в соответствии с выражениями:

$$\tau_1 = \tau + \Delta \tau;$$

$$Z_2 = Z(\tau) - (Z_0 + \Delta Z_1), \text{ т. е. при } \tau_1 = 0 \text{ и } Z_2(\tau_1) = 0.$$

После второго шага ИМ величина входного параметра будет равна $x_2 = x_1 + \Delta x = x_0 + 2\Delta x$.

Текущее значение выходного параметра оптимизируемого процесса в течение второго шага может быть определено из решения уравнения

$$T_3 \cdot \frac{dZ_2(\tau)}{d\tau} + Z_2(\tau) = f(x_2) - [f(x_0) + \Delta Z_1]. \quad (6.38)$$

Если принять $f(x_0) = Z_0$, то решение уравнения (6.38) будет иметь вид

$$Z_2(\tau_1) = \{f(x_2) - [Z_0 + \Delta Z_1]\} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta \tau}{T_3}}\right). \quad (6.39)$$

В общем виде для n -го шага ИМ при изменении управляющего параметра в выбранном направлении будем иметь:

$$x_n = x_0 + n\Delta x,$$

$$\tau_{n+1} = \tau_n + \Delta \tau,$$

$$Z_n = Z(\tau_{n-1}) - \left[Z_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i \right]. \quad (6.40)$$

Это означает, что при $\Delta Z_i < 0$ (см. рис. 40) $\tau_{n-1} = 0$ и $Z_n = 0$. Значит, на каждом интервале времени $\Delta \tau$ изменение Z_n начинается с нового значения.

Изменение выходного значения Z_n на n -м шаге определяется в соответствии с выражением

$$Z_n = \left[f(x_n) - \left(Z_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i \right) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau_{n-1}}{T_s}} \right). \quad (6.41)$$

Приращение выходного параметра оптимизируемого процесса в результате n -шага в выбранном направлении изменения входного параметра будет равно

$$\Delta Z_n = \left[f(x_n) - \left(Z_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i \right) \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta \tau}{T_s}} \right), \quad (6.42)$$

где $Z_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i = Z_{n-1}$.

Следует учитывать, что в рассматриваемом случае значение $\sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i < 0$, т.е. величина $Z(\tau)$ уменьшается при увеличении $x(\tau)$ на первых шагах управления.

После соблюдения условия реверса при $U(\tau) = -1$, когда $Z(n) - Z(n-1) - \Delta Z_n > 0$, т.е. значение выходного параметра начнет увеличиваться, произойдет реверс ИМ и величина входного параметра начнет изменяться в противоположном направлении.

Использованный метод поиска по запоминанию экстремума величины оптимизируемого параметра легко реализуется и обладает достаточно высокой помехозащищенностью. Одновременно ему присущи и серьезные недостатки [22]:

- экстремумы выходного параметра при выбранном направлении изменения управляющего воздействия достигаются при величинах установившихся значений на противоположных ветвях статической характеристики оптимизируемого процесса;

- реверсы в САОУ шагового типа происходят при величинах управляющего воздействия x_p (рис. 41), значительно отличающихся от оптимального значения $x_{\text{опт}}$;

- предельный режим работы САОУ характеризуется периодическими значительными колебаниями управляющего входного параметра в виде петлеобразной траектории относительно $x_{\text{опт}}$, характерной для всех систем по запоминанию экстремума.

Характерный поисковый режим функционирования САΟΥ по запоминанию экстремума (минимума) оптимизируемого параметра показан на рис. 41 в системе координат $Y, Z - X$.

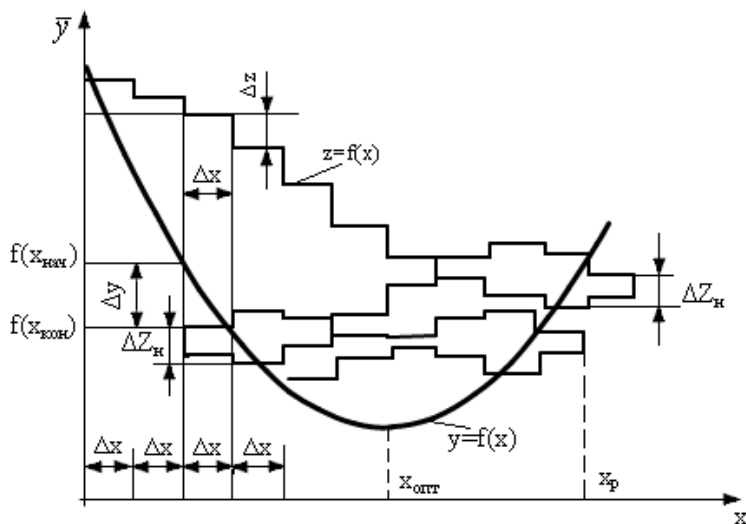


Рис. 41. Траектория поискового процесса в САΟΥ шагового типа при использовании метода поиска экстремума по запоминанию величин оптимизируемого параметра

При оптимизации инерционных процессов в таких САΟΥ выход на предельный режим происходит очень медленно.

Приращение выходного параметра ΔZ на каждом шаге изменения входного параметра Δx прямо пропорционально разности $\Delta Y = f(x_{\text{кон}}) - f(x_{\text{нач}})$ и обратно пропорционально величине T_s или инерционным и запаздывающим характеристикам оптимизируемого процесса.

Величина ΔZ в процессе оптимизирующего поиска также имеет экстремум, практически совпадающий с экстремумом статической характеристики (см. рис. 41).

Значит, если запоминать экстремум приращений оптимизируемого параметра после каждого шага изменения входного управляющего параметра, можно практически полностью компенсировать негативное влияние инерционности и запаздывания на поисковый режим работы САΟΥ.

Структурная схема САΟΥ расходом природного газа шагового типа по запоминанию экстремума приращений ΔZ выходного параметра представлена на рис. 42.

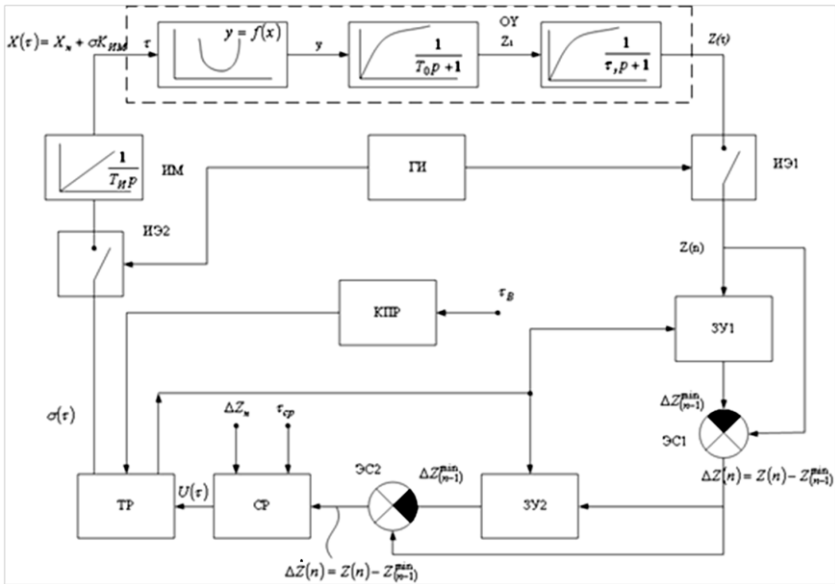


Рис. 42. Структурная схема САОУ расходом природного газа в доменную печь при использовании метода запоминания максимума приращений оптимизируемого параметра в результате очередного шагового изменения управляющего входного параметра

В схему для формирования сигнала $\Delta \dot{Z}$ на входе СР дополнительно включены два элемента ЗУ2 и ЭС2, принципы работы которых аналогичны принципам работы ЗУ1 и ЭС1, рассмотренных ранее.

На выходе СР в данном случае формируется управляющий сигнал $U(\tau)$ в соответствии с условием

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{при } \Delta \dot{Z}_n - \Delta \dot{Z}_{(n-1)}^{\min} + \Delta \dot{Z}_H \leq 0, \\ -1, & \text{при } \Delta \dot{Z}_n - \Delta \dot{Z}_{(n-1)}^{\min} + \Delta \dot{Z}_H > 0. \end{cases} \quad (6.43)$$

При $U(\tau) = -1$, как и в предыдущем варианте САОУ, срабатывает триггер реверса ТР, который изменяет знак переключающей функции $\sigma(\tau)$ на противоположный, осуществляя реверс ИМ, и сбрасывает в ЗУ1 и ЗУ2 запомненные минимальные значения соответственно Z_{n-1}^{\min} и

ΔZ_{n-1}^{\min} ; запоминания текущих величин этих параметров (при противоположном изменении величины управляющего воздействия).

Работа остальных блоков САОУ остается прежней.

Следует отметить, что величина удельного расхода природного газа оказывает влияние не только на величину удельного расхода кокса, но и на производительность доменной печи (см. рис. 38). При различных величинах отношений удельных расходов природного газа и технического кислорода (содержание O_2 99%) зависимость производительности ДП для условий ПАО «ММК» от соотношения расходов природного газа и кислорода при $V_{TK} = 130 \text{ м}^3/\text{т}$ представлена на рис. 43.

Для определения влияния величины расхода природного газа на производительность доменной печи и, как следствие, на величину удельного расхода кокса необходимо перейти от отношения $V_{ПГ}/V_{TK}$ к физической величине расхода природного газа.

Зная величину удельного расхода кислорода, мы можем определить расход природного газа:

$$V_{ПГ} = \frac{V_{TK}}{(V_{ПГ}/V_{TK})} \cdot P_{дп}, \quad (6.44)$$

где $P_{дп}$ – производительность доменной печи, т/ч;

V_{TK} – удельный расход технического кислорода, $\text{м}^3/\text{т}$.

Так, для $V_{ПГ}/V_{TK} = 1,3$ при производительности печи (в соответствии с рис. 43) равной 131,1 т/ч по формуле (6.44)

$$V_{ПГ} = \frac{130}{1,3} \cdot 131,1 = 13110 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Используя экспериментальные данные (см. рис. 38, 43), можно определить зависимость производительности доменной печи от расхода природного газа для фиксированного удельного расхода технического кислорода, представленную на рис. 44.

Анализ рассмотренных зависимостей позволяет сделать обоснованный вывод, что статическая характеристика, определяющая зависимость величины удельного расхода кокса от величины удельного расхода природного газа, в реальных условиях смещается (дрейфует) по сложной траектории, определить которую практически невозможно.

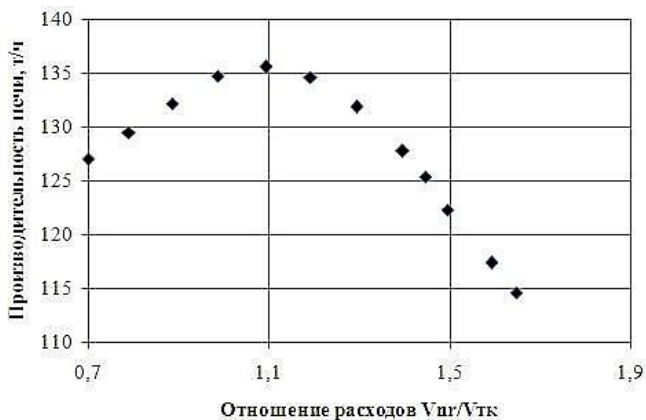


Рис. 43. Зависимость производительности печи от соотношения расходов природного газа и технического кислорода ($V_{ПГ}/V_{ТК}$) при $V_{ТК} = 130 \text{ м}^3/\text{т}$

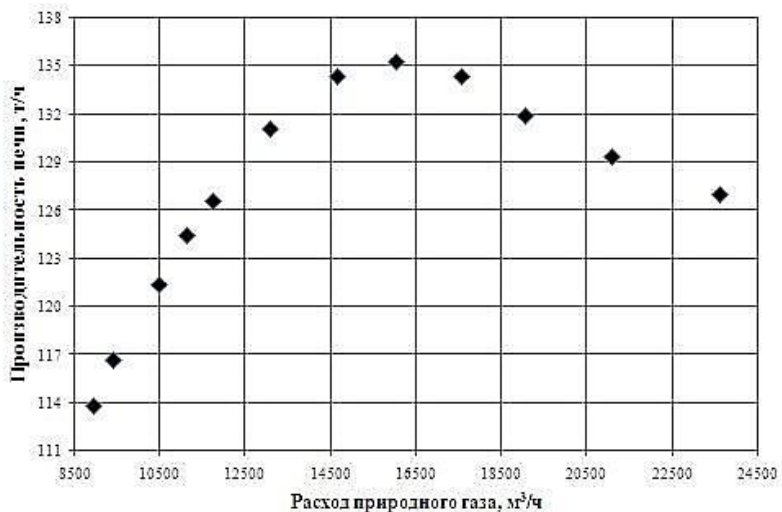


Рис. 44. Зависимость производительности печи от расхода природного газа при $V_{ТК} = 130 \text{ м}^3/\text{т}$

Обычно траектория смещения статической характеристики оптимизируемого процесса содержит вертикальную β и горизонтальную α составляющие скоростей дрейфа.

В общем случае текущее положение статической характеристики оптимизируемого процесса в координатах «управляющее воздействие x » – «значение оптимизируемого параметра y » при сложной траектории дрейфа с постоянными по горизонтали α и вертикали β составляющими скорости определяется уравнением

$$\bar{Y}(x, \tau) = [a_0 + a_1(x \pm \alpha\tau) + a_2(x \pm \alpha\tau)^2 + \dots + a_n(x \pm \alpha\tau)^n] \pm \beta\tau. \quad (6.45)$$

Здесь знаки перед α и β определяют направление текущего смещения статической характеристики оптимизируемого процесса.

В общем случае горизонтальная и вертикальная составляющие скоростей дрейфа могут быть заданными любыми, соответствующими реальным условиям функциями времени.

Наличие практически неконтролируемого смещения статической характеристики оптимизируемого процесса является убедительным и обоснованным доказательством необходимости использования САОУ расходом природного газа с целью минимизации удельного расхода кокса или максимальной производительности ДП при всех существующих реальных условиях доменного процесса.

Для теоретического обоснования возможности эффективной работы САОУ расходом природного газа и получения предварительных величин настроечных параметров САОУ разработана рабочая программа управления, обеспечивающая возможность математического моделирования работы системы и реализацию оптимизации управления процессом в реальных условиях (прил. А).

6.3. Исследование влияния параметров настройки САОУ удельным расходом природного газа на изменение величины удельного расхода кокса

Для математического моделирования работы САОУ расходом природного газа с целью определения и поддержания минимального удельного расхода кокса при заданном удельном расходе кислорода на обогащение дутья была создана программа поиска оптимального расхода природного газа, приведенная в прил. А.

В качестве показателей эффективности работы САОУ удельным расходом природного газа использованы следующие параметры:

- потеря на поиск $\Delta Z_{\text{П}}$, кг/т;
- величина поисковых колебаний удельного расхода природного газа в предельном периодическом режиме ΔA_x , м³/т;

– величина поисковых колебаний удельного расхода кокса в предельном периодическом режиме ΔA_Z , кг/т;

– время выхода на предельный оптимальный режим или время выхода на оптимум $T_{\text{вых}}$, ч.

В качестве настраиваемых основных параметров САΟΥ удельным расходом природного газа при постоянной производительности доменной печи использованы:

– время паузы между последовательными шагами управляющих воздействий $T_{\text{п}}$, ч;

– величина шага изменения управляющего воздействия Δx , м³/т.

При математическом моделировании работы САΟΥ удельным расходом природного газа приняты следующие условия.

Статическая характеристика оптимизируемого процесса при удельном расходе кислорода в дутье $60 \div 79$ м³/т определяется уравнением

$$\bar{Y} = -0,0000191x^4 + 0,006603x^3 - 0,817x^2 + 42x - 338,002,$$

где \bar{Y} – установившееся значение удельного расхода кокса, кг/т;
 x – величина удельного расхода природного газа, м³/т, при изменении от 60 с до 105 м³/т.

Постоянная времени $T_0 = 6$ ч; время запаздывания $\tau_3 = 1$ ч.

Продолжительность цикла от 2 до 10 ч.

Величина шагового изменения входного параметра от 2 до 5 м³/т.

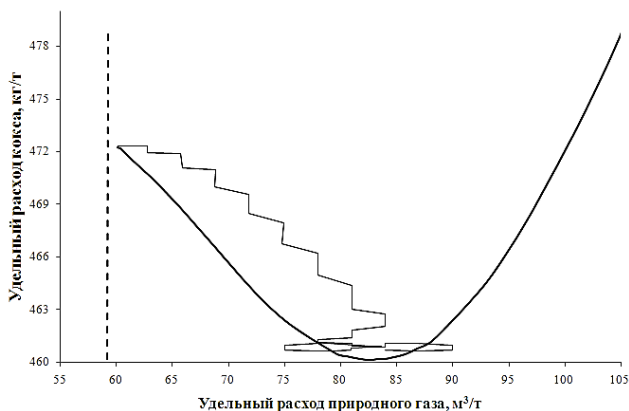
Дискретизация расчета 0,1 ч. Зона нечувствительности $\Delta Z_n = 0,5$ кг/т. Начальное значение удельного расхода природного газа 60 м³/т.

Поскольку смещение статической характеристики осуществляется только при изменении удельного расхода кислорода (см. рис. 37), то при моделировании процесса поискового режима при постоянном удельном расходе кислорода смещение отсутствует, но в рабочей программе смещение характеристики в горизонтальном и вертикальном направлениях предусмотрено.

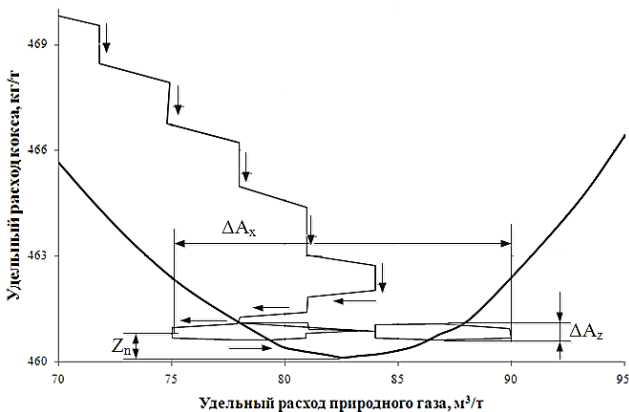
Расчетные траектории поискового режима в САΟΥ удельным расходом природного газа при $T = 2$ ч и величине шагового изменения $dx = 3$ м³/т в обычном и увеличенном масштабе приведены на рис. 45.

На рис. 45, б показаны величины параметров поискового процесса $Z_{\text{п}}; \Delta A_Z; \Delta A_x$.

Анализ полученных результатов показывает, что недостаточная продолжительность паузы между управляющими импульсами увеличивает все параметры эффективности поискового режима и это требует корректировки параметра САΟΥ в направлении увеличения $T_{\text{п}}$.



а



б

Рис. 45. Расчетные траектории поискового режима в CAOУ расходом природного газа, при $T_{II} = 2$ ч, $dx = 3$ м³/т:
а – в принятом масштабе; б – в увеличенном масштабе при $x_n = 60$ м³/т

Траектория изменения удельного расхода природного газа во времени в процессе оптимизирующего поиска при функционировании CAOУ с настройкой $T_{II} = 2$ ч, $dx = 3$ м³/т приведена на рис. 46.

В соответствии с принятым методом поиска экстремума основной поиск осуществлен по эффективной траектории и первый реверс в CAOУ произошел на ~ 20-м часе практически в окрестности оптимального значения расхода природного газа. Что доказывает высокую эффективность используемого метода.

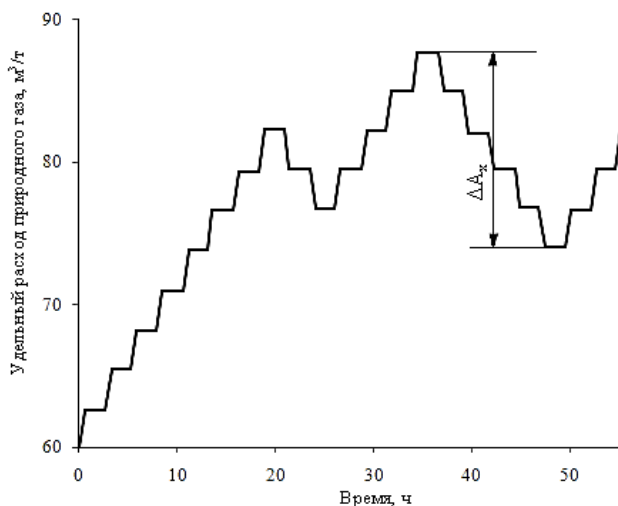


Рис. 46. Расчетная траектория изменения во времени удельного расхода природного газа при работе САОУ с параметрами $T_{II} = 2$ ч, $dx = 3$ м³/т

Расчетная траектория изменения удельного расхода природного газа во времени при функционировании САОУ с параметрами настройки $T_{II} = 2$ ч, $dx = 3$ м³/т представлена на рис. 47.

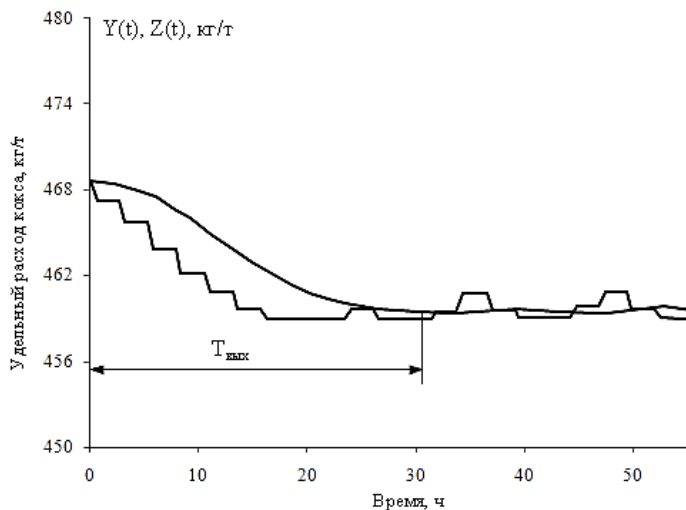


Рис. 47. Расчетная траектория изменения во времени величины удельного расхода кокса при функционировании САОУ с параметрами настройки $T_{II} = 2$ ч, $dx = 3$ м³/т

На рис. 47 отмечена величина времени вывода величины удельного расхода кокса на минимальное значение и дальнейшее поддержание этого значения за счет поискового режима работы САОУ удельным расходом природного газа.

Для исследования влияния величины T_{II} на показатели качества функционирования САОУ были исследованы поисковые режимы при длительностях пауз между управляющими импульсом 6 и 10 ч.

Зависимости величин Z_{II} , ΔA_z , ΔA_x от величины времени паузы T_{II} при $dx = const = 3 \text{ м}^3/\text{т}$ полученные в результате моделирования работы САОУ, представлены на рис. 48. Анализ представленных на рис. 48 зависимостей показывает, что увеличение продолжительности паузы между управляющими импульсами больше величины эквивалентной постоянной времени нецелесообразно и не приводит к заметному улучшению показателей качества работы САОУ, но одновременно приводит к значительному увеличению времени выхода на экстремум.

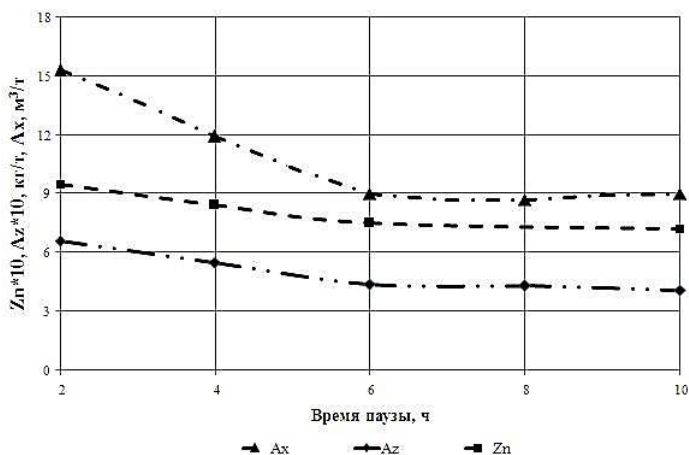


Рис. 48. Зависимости величин параметров поискового режима Z_{II} , ΔA_z , ΔA_x от величины времени паузы T_{II} между управляющими импульсами при функционировании САОУ удельным расходом природного газа в доменную печь

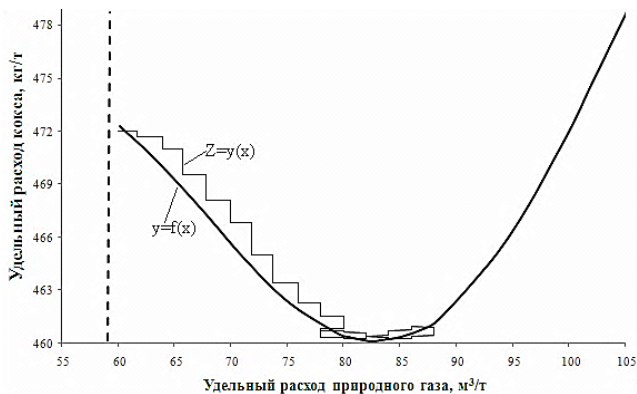
Так, при $T_{II} = 6 \text{ ч}$, $dx = 3 \text{ м}^3/\text{т}$ время выхода на минимальное значение удельного расхода кокса составляет 50,7 ч, а при $T_{II} = 10 \text{ ч}$, $dx = 3 \text{ м}^3/\text{т}$ аналогичный показатель составляет более 100 ч.

Важное значение имеет правильный выбор величины управляющего шагового изменения входного параметра $\Delta x = dx$.

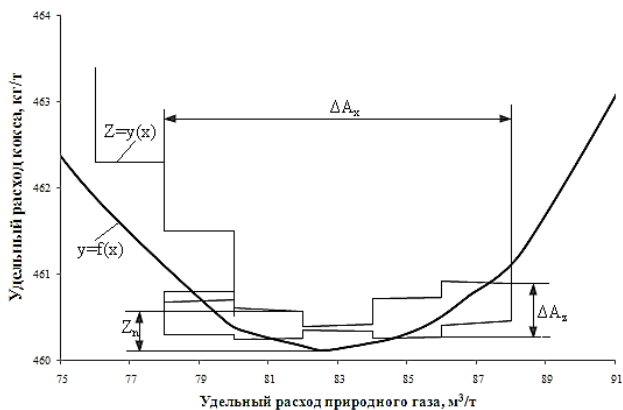
Изменение шага в диапазоне $\Delta x = dx$ от 2 до 5 $\text{м}^3/\text{т}$ практически не оказывает влияния на величины ΔA_x , ΔA_z и Z_{II} , но приводит к измене-

нию времени выхода на экстремум $T_{\text{ВЫХ}}$ при $dx = 2 \text{ м}^3/\text{т}$ и составляет 78 ч; $T_{\text{ВЫХ}}$ при $dx = 3 \text{ м}^3/\text{т}$ составляет 50 ч; $T_{\text{ВЫХ}}$ при $dx = 5 \text{ м}^3/\text{т}$ составляет 26 ч при $T_{\text{П}} = 6 \text{ ч}$.

Для доказательства полученных результатов на рис. 49 приведены траектории поискового режима в САΟΥ с параметрами настройки $T_{\text{П}} = 6 \text{ ч}$, $dx = 2 \text{ м}^3/\text{т}$. Изменение во времени управляющего параметра в процессе работы САΟΥ при параметрах $T_{\text{П}} = 6 \text{ ч}$, $dx = 2 \text{ м}^3/\text{т}$ представлено на рис. 50.



а



б

Рис. 49. Траектории поискового режима в САΟΥ удельным расходом природного газа при $T_{\text{П}} = 6 \text{ ч}$ и $dx = 2 \text{ м}^3/\text{т}$: а – при принятом масштабе; б – при увеличенном масштабе для определения показателей качества поискового режима

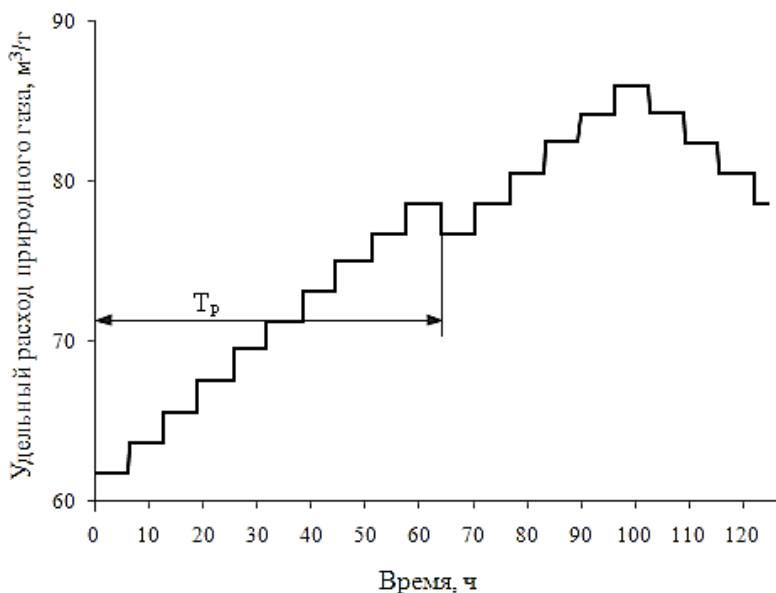


Рис. 50. Изменение во времени управляющего параметра при работе САОУ удельным расходом природного газа в доменную печь при параметрах настройки $T_{\Pi} = 6$ ч, $dx = 2$ м³/т

Первое время реверса T_p произошло через 60 ч после начала поискового режима от величины удельного расхода природного газа 60 м³/т.

Изменение во времени величины удельного расхода кокса в процессе поискового режима работы САОУ удельным расходом природного газа при параметрах $T_{\Pi} = 6$ ч, $dx = 2$ м³/т приведено на рис. 51.

В результате малых значений управляющих воздействий и достаточно больших интервалов времени между смежными шагами управляющих воздействий поисковый процесс идет практически по статической характеристике (см. рис. 49), что привело к существенному увеличению значения времени вывода процесса $T_{\text{вых}}$ на минимальный расход кокса.

Для уменьшения времени выхода САОУ на оптимальный режим при сохранении принятой продолжительности интервалов времени между шагами $T_{\Pi} = 6$ ч исследуем параметры поискового режима при $dx = 5$ м³/т.

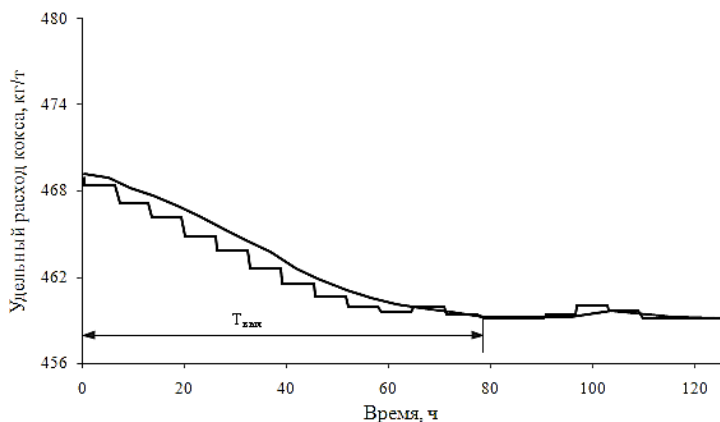


Рис. 51. Изменение во времени величины удельного расхода кокса при поисковом режиме работы САΟΥ и настройках $T_{\Pi} = 6$ ч, $dx = 2$ м³/т

Траектория изменения выходного оптимизируемого параметра $Z = Y(x)$ в процессе поискового режима работы шаговой САΟΥ удельным расходом природного газа с целью минимизации удельного расхода кокса в координатах «удельный расход природного газа» – «удельный расход кокса» при $T_{\Pi} = 6$ ч, $dx = 5$ м³/т представлена на рис. 52.

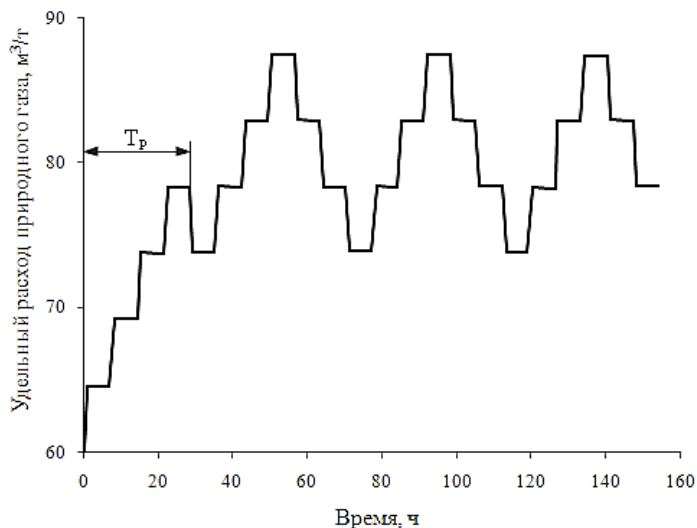


Рис. 52. Изменение во времени удельного расхода природного газа при функционировании САΟΥ с параметрами $T_{\Pi} = 6$ ч, $dx = 5$ м³/т

Увеличение изменения управляющего воздействия в процессе одного шага до $5 \text{ м}^3/\text{т}$ позволяет с учетом первого реверса за 5 итераций вывести процесс на оптимальный режим при незначительном увеличении размаха ΔA_x колебаний входного параметра.

Изменение величины управляющего параметра во времени в процессе оптимизирующего поискового режима работы САΟΥ приведено на рис. 52. Время первого реверса T_p произошло на 24÷26-й минутах практически в окрестности оптимального значения управляющего параметра и практически через четыре шага после первого реверса установлен периодический режим работы.

Изменение во времени величины удельного расхода кокса в процессе поискового режима САΟΥ удельным расходом природного газа в доменную печь с целью достижения минимального удельного расхода при параметрах САΟΥ $T_{II} = 6 \text{ ч}$, $dx = 5 \text{ м}^3/\text{т}$ представлено на рис. 53. Время выхода на минимальное значение удельного расхода кокса составило 36÷42 ч. Анализ полученных результатов показывает, что увеличение значения dx до $5 \text{ м}^3/\text{т}$ приводит к возникновению периодических колебаний значений входного и особенно нежелательных колебаний оптимизируемого параметра. Поэтому следует принять величину управляющего входного воздействия dx в пределах от 3 до $4 \text{ м}^3/\text{т}$.

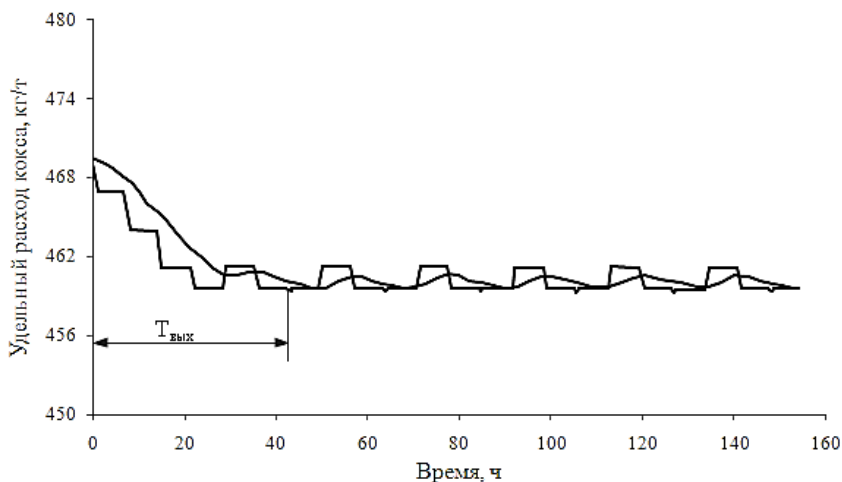


Рис. 53. Изменение во времени удельного расхода кокса при функционировании САΟΥ удельным расходом природного газа с целью минимизации удельного расхода кокса при параметрах настройки САΟΥ $T_{II} = 6 \text{ ч}$, $dx = 5 \text{ м}^3/\text{т}$

По результатам математического моделирования работы САОУ удельным расходом природного газа с целью минимизации удельного расхода кокса можно сделать выводы:

– время паузы между смежными управляющими воздействия T_{Π} следует выбирать из условия $T_{\Pi} \geq T_0 + \tau_3$;

– не следует значительно увеличивать шаг управляющего воздействия $\Delta x = dx$, поскольку это может привести к ухудшению показателей качества поискового режима;

– для уменьшения размаха периодических входных колебаний ΔA_x следует сделать величину изменения управляющего входного воздействия $\Delta x = dx$ пропорциональной величине приращения выходного оптимизируемого параметра, т.е. реализовать условие

$$\Delta x_i = dx_i = k \cdot \Delta Z_i, \quad (6.46)$$

Для повышения эффективности работы САОУ целесообразно с целью ликвидации периодического переходного предельного режима не реверсировать изменение направления управляющего воздействия, а останавливать процесс поиска на время, которое необходимо для накопления заданного отклонения оптимизируемого параметра от найденного экстремума или на заданный интервал времени в УПП $\tau_B = (2-2,5) \cdot T_3$ в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [24]. Это существенно повысит надежность функционирования САУ расходом природного газа в ДП.

По аналогичному принципу целесообразно реализовать управление подачей соотношения «природный газ – кислород» в дутье ДП с целью определения и поддержания максимальной производительности печи в каждый текущий момент времени.

Контрольные вопросы к разделу 7

1. В чем преимущество динамической модели управления расходом природного газа в ДП перед детерминированной моделью?

2. Достоинства и недостатки САОУ расходом природного газа по методу запоминания экстремума оптимизируемого параметра.

3. Почему при создании САОУ расходом природного газа в ДП использован дискретный (шаговый) принцип управления?

4. В чем заключается преимущество САОУ по запоминанию экстремума приращений по сравнению с САОУ по запоминанию экстремума параметра?

5. Поясните значения терминов «потеря на поиск» и «время выхода САОУ на оптимальный режим».

7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ (АСУ ТП) ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Появление многофункциональных микропроцессорных контроллеров, мощных по вычислительной способности и уникальных по быстродействию вычислительных в промышленном исполнении управляющих машин, позволяет создавать эффективные АСУ ТП доменной печи.

В доменном процессе достаточно четко можно выделить четыре подпроцесса, управление которыми можно осуществлять индивидуально с учетом возможного взаимовлияния друг на друга. Эта технологическая особенность доменного процесса учитывается при создании АСУ ТП, общая схема которой представлена на рис. 54 [8].

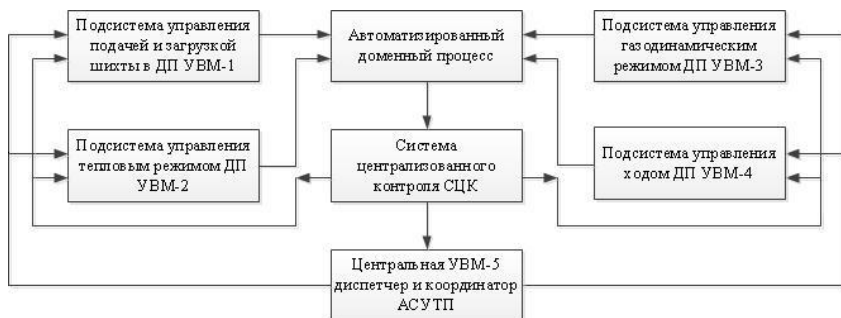


Рис. 54. Общая схема АСУ ТП доменного процесса

Система централизованного контроля (СЦК) представляет собой сложный информационный комплекс для получения объективной и достоверной информации за счет использования комплектов датчиков, преобразователей информационных сигналов и измерительных устройств. В современных условиях количество текущей информации о состоянии параметров процесса непрерывно растет. Информация становится труднообозримой, и технологический персонал, обслуживающий ДП, обычно не в состоянии полностью ее использовать для оперативного и эффективного управления доменным процессом. Поэтому главной задачей СЦК является: проверка информации на достоверность; обобщение текущей информации; вывод основной технологической информации на мнемосхемы мониторов; оперативная передача необходимой информации в подсистемы управления технологическим процессом [4].

Структурно-функциональная схема АСУ ТП доменным процессом представлена на рис. 55 [8].

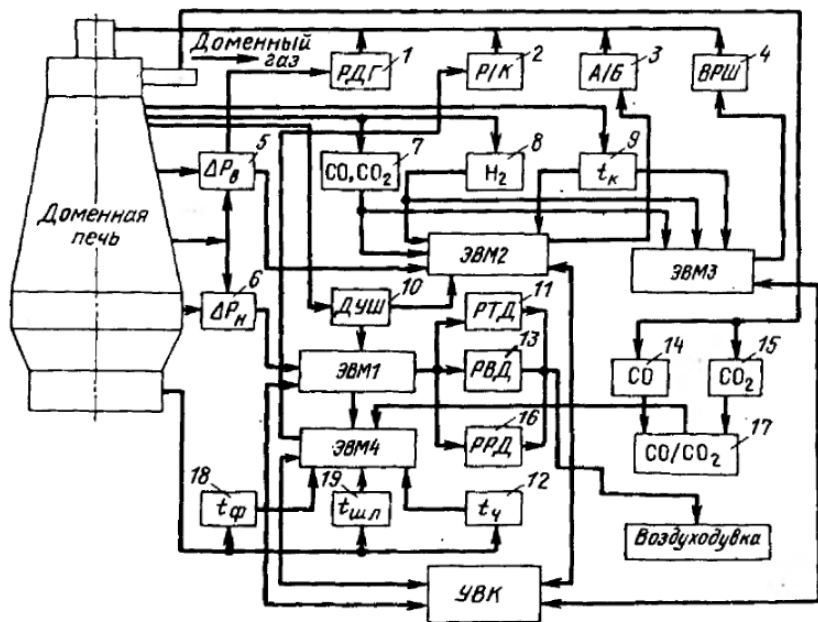


Рис. 55. Структурно-функциональная схема САУ ТП доменным процессом

Для функционирования подсистемы управления шихтоподачей и загрузкой шихты в АСУ ТП осуществляется расчет масс шихтовых материалов в каждой подаче, управление набором и взвешиванием шихтовых материалов, управление механизмами тракта шихтоподачи и загрузки шихты в ДП по заданной программе.

Для всего доменного процесса АСУ ТП реализует управление шихтовой плавки (УВМ-1), тепловым состоянием доменной печи (УВМ-2), распределением газового потока по сечению шахты (УВМ-3), ходом доменной печи (УВМ-4).

Современные АСУ ТП являются распределенными системами, у которых управление отдельными подсистемами осуществляется с использованием современных микропроцессорных свободно программируемых технических средств, объединенных в единую сеть с использованием центральной УВМ.

Подсистема управления шихтоподачей и загрузкой материалов в ДП осуществляет управление исполнительными устройствами 2÷4, которые осуществляют воздействие на доменный процесс «сверху» путем изменения рудной нагрузки на кокс Р/К, соотношения систем загрузки по

программам А и Б и управления работой вращающего распределителя шихты ВРШ при двухконусной системе загрузки шихты.

Датчики автоматического контроля верхнего 5 и нижнего 6 перепадов давлений газов по высоте шахты ДП (см. рис. 55) формируют информацию о газопроницаемости столба шихты и режиме схода шихты для выработки регулирующих управляющих воздействий «сверху» и «снизу» путем изменения давления газа под колошником 1, рудных нагрузок на кокс 2, температуры дутья 11, влажности дутья 13 и количества горячего дутья 16.

Расположение устройств для отбора импульсов температуры горячего дутья, давления горячего дутья и влажности горячего дутья на трубопроводе горячего дутья были представлены ранее (см. рис. 25).

Установка термопары для измерения температуры по периферии ДП представлена на рис. 56. Способ установки термопары для измерения температуры горячего дутья представлен на рис. 57.

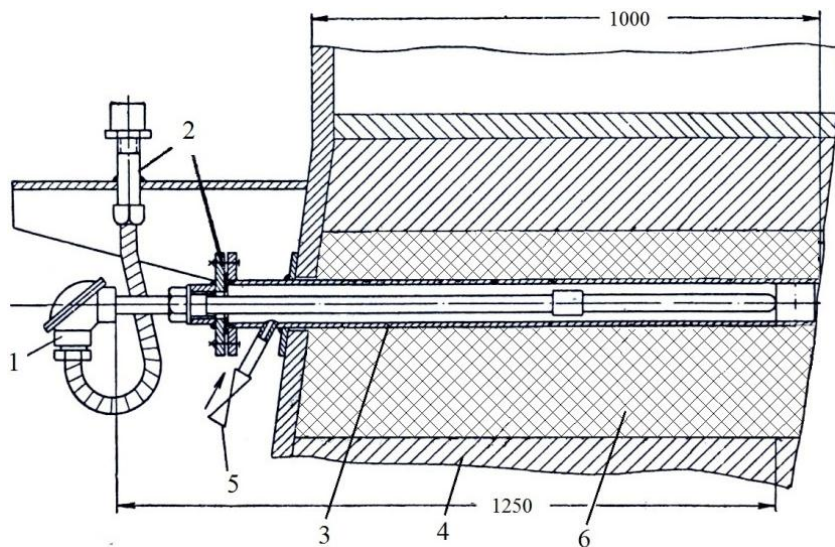


Рис. 56. Установка термопары для измерения температуры по периферии печи: 1 – термопара; 2 – крепление термопары; 3 – защитная труба; 4 – кладка шахты печи; 5 – подвод сжатого воздуха для отдува газа; 6 – огнеупорная масса набивки

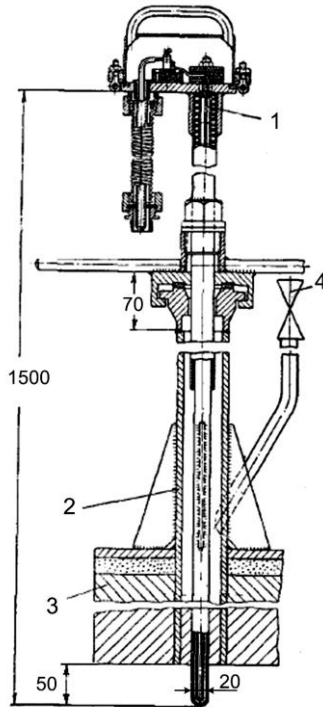


Рис. 57. Быстросъемная термопара для измерения температуры горячего дутья: 1 – термопара с герметичной головкой; 2 – защитная труба; 3 – воздухопровод; 4 – подача сжатого воздуха для защиты персонала при замене термопары

В УВМ подсистем управления процессом доменной плавки поступает информация о составе 7, 8 и температуре 9 по окружности и радиусу колошника (см. рис. 55).

Устройство для измерения температуры и отбора пробы колошникового газа на анализ по радиусу сечения колошника представлено на рис. 58. Для оценки теплового состояния горна измеряется температура в фурменной зоне 18 и температурах чугуна датчик 12 и шлака 19 на каждом выпуске.

Общий вид установки для измерения температуры фурменной зоны доменной печи представлен на рис. 59, а. Измерение t_{ϕ} осуществляется оптическим узкоугольным пирометром, установленным на фурме. Установка оптического пирометра на фурме доменной печи для измерения температуры в фурменной зоне показана на рис. 59, б.

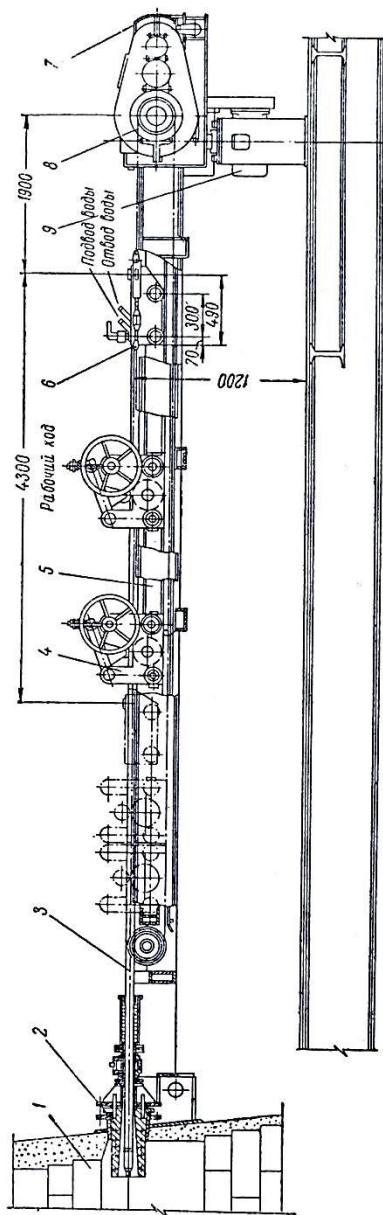


Рис. 58. Установка для измерения температуры и отбора проб газа на анализ по радиусу сечения колошника. 1 – стенка шахты; 2 – амбразура; 3 – водоохлаждаемая труба-зонд для отбора газа и установки термометра; 4 – каретка; 5 – рама; 6 – трос; 7 – двигатель; 8 – редуктор; 9 – командноаппарат передвижения зонда на восемь позиций по радиусу

Для защиты оптической системы от воздействия высоких температур предусмотрен водоохлаждаемый экран и отдув продуктов плавки сжатым воздухом. При съеме телескопа пирометра предусмотрена герметичная заглушка с механическим ручным приводом для поворота заглушки на 90° (см. рис. 59, б).

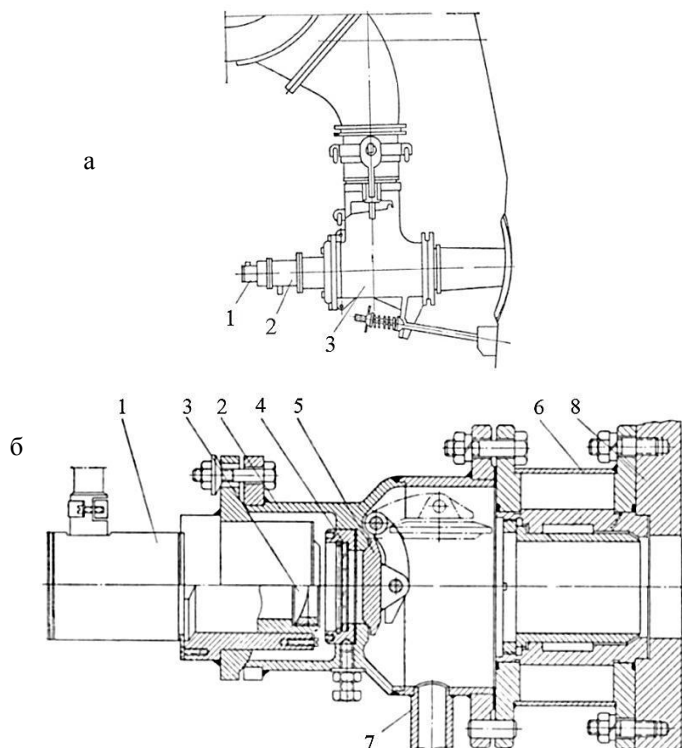


Рис. 59. Общий вид установки для измерения температуры фурменной зоны (а): 1 – пирометр; 2 – арматура; 3 – фурма; установка пирометра для измерения температуры фурменной зоны (б): 1 – узкоугольный пирометр; 2 – телескоп; 3 – линза телескопа; 4 – защитное стекло; 5 – заглушка (при съеме телескопа); 6 – водоохлаждаемый экран; 7 – штуцер для воздуха на отдув; 8 – крышка к фурменному прибору

Контроль уровня шихты на колошнике осуществляется с использованием шомпольного датчика 10 (см. рис. 55).

Основное назначение центральной УВМ заключается в согласовании работы контуров управления верха и низа ДП путем принятия целе-

сообразно обоснованных управляющих воздействий для стабилизации теплового состояния ДП и обеспечения равномерного хода печи.

Тепловое состояние доменной печи определяется разностью между количеством тепла, поступающего в печь, и количеством тепла, необходимого для получения чугуна заданного состава, нагретого до заданной температуры из загруженного в печь исходного шихтового материала.

Главной причиной нарушения шаткого равновесия теплового состояния является, как правило, изменение тепловой и восстановительной работы газового потока за счет изменения прямого и косвенного восстановления железа.

При сжигании углерода топлива в дутье, подаваемого через фурмы, образуется газ, содержащий при температуре 1600 ± 2000 °С до 35 % СО и 65 % N₂.

Дутье современных доменных печей увлажняют, обогащают кислородом и в дутье добавляют природный газ. Поэтому состав горнового газа определяется составом комбинированного увлажненного дутья:

- увеличение содержания O₂ в дутье увеличивает содержание СО и уменьшает содержание N₂;

- при добавлении природного газа в дутье возрастает содержание H₂ в горновых газах.

Наличие в горновых газах заметных количеств H₂ приводит к увеличению содержания СО в зоне прямого восстановления [4].

Выше этой зоны проходят реакции косвенного восстановления, где восстанавливаются высшие оксиды железа и марганца.

В результате реакций косвенного восстановления происходит образование СО₂. Состав доменного газа в области косвенного восстановления зависит от следующих факторов:

- от степени окисления железорудной части шихты;
- от степени использования восстановительной способности доменного газа;
- от количества газа, приходящего на единицу массы рудной части шихты, которое определяется относительным расходом топлива.

Это означает, что по составу доменного газа по высоте шахты ДП можно объективно судить о ходе процесса восстановления железа по высоте шахты.

Так, зная, например, состав колошникового газа и некоторые другие параметры доменного процесса, можно определить необходимое количество дутья и количество образовавшегося в ДП газа.

При правильном, технологически обоснованном для каждой ДП соотношении процессов прямого и косвенного восстановления железа, при условии стабилизации параметров шихтовых материалов обеспечивается ровный ход печи, стабильное тепловое состояние ДП, высокая производительность и минимально возможный удельный расход кокса на тонну произведенного чугуна.

Тепловое текущее состояние печи оценивают по содержанию кремния, марганца и серы в чугуна; составу и физическим свойствам шлака на выпусках; по яркости свечения (температуре) фурменной зоны. Тепловая работа ДП в принципе может быть оценена при наличии адекватной математической модели и путем вычисления теплового КПД доменной печи и коэффициента использования углерода в печи.

При расчете указанных показателей используется тепловой баланс доменной плавки, составленный в центральной УВМ.

Задачей управления тепловым состоянием ДП является обеспечение условий, при которых приход тепла соответствует необходимому расходу и достигается рациональное (близкое к оптимальному) соотношение процессов прямого и косвенного восстановления железа.

Только при таких условиях обеспечивается достижение минимального расхода кокса, максимальной производительности печи при безусловном выполнении требований по составу выплавляемого чугуна.

Управление тепловым состоянием ДП должно предупреждать нарушение теплового равновесия. Управляющими воздействиями на процесс являются:

- изменение рудной нагрузки;
- изменение параметров дутья (расхода, температуры, влажности и добавок природного газа и кислорода).

Эффективное управление тепловым состоянием требует непрерывного контроля текущей восстановительной и тепловой работы доменного газа, расшифровки (по результату химического состава газа) тенденций изменения восстановительной и тепловой функции газа и формирования технологически обоснованных управляющих воздействий для своевременной коррекции возникающих отклонений от технологически обоснованных показателей работы ДП.

Поскольку, как отмечалось ранее, ДП как объект управления представляется высокоинерционным с запаздыванием технологическим агрегатом, информация о текущей реакции объекта на управляющие воздействия поступают в АСУТП с запаздыванием. Одновременно выходные контролируемые параметры теплового состояния ДП, такие как температуры чугуна и шлака на выпусках, содержание кремния, марганца и серы в чугуна и т.д., характеризуют тепловую работу ДП за прошедший длительный (несколько часов) период и не дают объективной информации о тепловом состоянии в текущий момент времени.

Это затрудняет прогнозирование теплового состояния на последующие моменты времени. Такое состояние является убедительным и побудительным фактором для синтеза разработки и использования математических моделей теплового состояния доменного процесса.

Разработанные известные алгоритмы автоматического управления тепловым состоянием ДП главным образом основаны на детерминиро-

ванных моделях, имеющих в своей основе материальные и тепловые балансы, которые учитывают с определенной степенью точности и полноты, к сожалению, только отдельные параметры тепловых и технологических процессов, происходящих при доменной плавке.

Балансовые детерминированные модели теплового состояния ДП, основанные на фундаментальных законах, обладают универсальностью, однако очень слабо отражают индивидуальные специфические особенности процесса, происходящего в конкретной доменной печи.

Более перспективными являются экспериментально статистические и логические модели теплового состояния, основанные на современных принципах нечеткой логики и искусственных нейронных сетях. Такие модели характеризуются более высокой индивидуальностью и полнее отражают специфические особенности процесса в каждой ДП, хотя и требуют индивидуального подхода при их составлении. Такие модели находятся еще в стадии разработки и экспериментальной проверки.

В качестве конкретного примера рассмотрим алгоритм управления тепловым состоянием ДП, основанный на определении тенденции к изменению восстановительной и тепловой работы по анализу колошниково-го газа и температуре в различных точках по высоте шахты печи [4].

В предложенном алгоритме принцип анализа процессов восстановления и теплообмена по высоте шахты ДП по составу колошниково-го газа сводится к следующему:

1. Если усиливается косвенное восстановление железа, то в колошниковом газе увеличивается содержание CO_2 и настолько же уменьшается содержание CO . Причем сумма ($\text{CO}_2 + \text{CO}$) остается неизменной.

2. Если усиливается прямое восстановление, то в газе возрастает содержание CO при незначительном уменьшении содержания CO_2 . Причем сумма ($\text{CO}_2 + \text{CO}$) также увеличивается. Контроль содержания в колошниковом газе CO и CO_2 дополняется контролем содержания H_2 .

3. Если содержание H_2 уменьшилось, то, соответственно, увеличилось косвенное восстановление и наоборот. Однако следует при этом учитывать, что содержание H_2 в колошниковом газе может изменяться по причинам, не связанным с процессом восстановления, например при изменении (особенно при увеличении) расхода природного газа или при изменении расхода пара на увлажнение дутья.

Входными параметрами рассматриваемого алгоритма являются тенденции (приращения) изменения за фиксированный заданный интервал времени усредненных значений содержания CO , CO_2 , H_2 в колошниковом газе, а также температуры $\Delta t_{\text{ф}}$ в фурменных зонах.

Увеличение или уменьшение каждого параметра фиксируется знаками «плюс» или «минус». В случае если величина какого-либо из контрольных параметров в течение интервала времени не изменяется, то его значение обозначается символом «0» или «ноль».

Основным определяющим признаком, свидетельствующим об изменении характера восстановительных процессов, является направление изменения приращений содержания компонентов колошникового газа. Направление изменения температуры фурменной зоны $\Delta t_{\text{ф}}$ является вспомогательным и как бы сопутствующим признаком, подтверждающим факт изменения теплового состояния в нижней части печи вследствие изменения восстановительных процессов.

Знак приращений алгебраической суммы ($\text{CO} + \text{CO}_2$) в колошниковом газе позволяет судить о преобладающем изменении величины того или иного компонента, определяющего характер восстановительных процессов.

Выходными величинами рассматриваемого алгоритма (управляющими воздействиями) являются:

- изменение количества кокса ΔK в подаче;
- изменение температуры горячего дутья $\Delta t_{\text{д}}$.

Изменение количества кокса в подаче ΔK производится сразу же после формирования требуемой рекомендации.

Изменение температуры горячего дутья $\Delta t_{\text{д}}$ рекомендуется производить через 2-3 ч после зафиксированного изменения состава колошникового газа, причем при условии если изменение температуры в фурменных очагах подтверждает соответствие теплового состояния горна выданной рекомендации. Если соответствие нарушается, то налагается запрет. Рекомендуемые количественные изменения параметров управляющих воздействий следующие:

- для изменения расхода кокса $\Delta K = 3 \div 5 \%$;
- для изменения температуры горячего дутья $\Delta t_{\text{д}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ на 1 % изменения содержания CO и CO_2 в колошниковом газе. Алгоритм управления тепловым состоянием ДП представлен на рис. 60 [4]. Логическую обработку реальной технологической ситуации при различной комбинации входных параметров можно прокомментировать следующим образом.

1 строка: увеличивается косвенное восстановление ($\Delta \text{CO}_2 \rightarrow \langle + \rangle$ и $\Delta \text{CO} \rightarrow \langle - \rangle$), в результате необходимо уменьшить количество кокса в подаче.

5 строка: увеличилось косвенное восстановление ($\langle + \rangle \Delta \text{CO}_2$ и $\langle - \rangle \Delta \text{CO}$) и одновременно уменьшилось прямое ($\Delta \text{CO} + \Delta \text{CO}_2 - \langle + \rangle$). Знак $\langle + \rangle$ изменения температуры фурменной зоны $\Delta t_{\text{ф}}$ подтверждает уменьшение прямого восстановления, значит, необходимо уменьшить количество кокса в подаче и понизить температуру горячего дутья.

Ход доменной печи характеризуется опусканием шихтовых материалов за счет плавления рудно-флюсовых материалов и горением кокса в нижней части шахты. Производительность доменной печи зависит от скорости схода шихты, т.е. от опускания материалов, которое происходит под действием силы тяжести, которая уравновешивается силами трения и подъемной силой (до 50 %) потока встречных газов.

Срок	Входные параметры				Выходные параметры								
	ΔCO ₂	ΔCO	ΔCO+ ΔCO ₂	Δt _ф	Резерв увеличения температуры дутья есть				Резерв увеличения температуры дутья нет				
					Качественная рекомендация		Количественная рекомендация		Качественная рекомендация		Количественная рекомендация		
					t _д	К	Δt _д	ΔK	t _д	К	Δt _д	ΔK	
1	+	-	0	-	0	-	5ΔCO ₂	0	-	0	-	5ΔCO ₂	ΔK
2	+	-	-	-	0	-	5ΔCO ₂	0	-	0	-	5ΔCO ₂	5ΔCO ₂
3	-	+	0	-	0	+	5ΔCO ₂	0	+	0	+	5ΔCO ₂	5ΔCO ₂
4	-	+	-	-	0	+	5ΔCO ₂	0	+	0	+	5ΔCO ₂	5ΔCO ₂
5	+	-	+	+	-	-	80(ΔCO+ ΔCO ₂)	5ΔCO ₂	-	-	-	80(ΔCO+ ΔCO ₂)	5ΔCO ₂
6	+	-	+	≈+	Запрет	-	5ΔCO ₂	Запрет	-	-	-	5ΔCO ₂	5ΔCO ₂
7	-	+	+	-	+	+	80(ΔCO+ ΔCO ₂)	5ΔCO ₂	0	+	+	5ΔCO ₂	5ΔCO ₂
8	-	+	+	≈	Запрет	+	5ΔCO ₂	0	+	+	+	5ΔCO ₂	5ΔCO ₂
17	0	+	-	+	-	0	80ΔCO	0	0	+	+	0	5ΔCO ₂
18	0	+	-	≈	-	-	Запрет	-	0	+	+	0	5ΔCO ₂

Примечание. Знак « ≈ » указывает, что параметр может принять значение «минус» или «0», т.е. не увеличивается; знак « ≈+ » указывает, что параметр может принять значение «плюс» или «0», т.е. не уменьшается.

Рис. 60. Алгоритм управления тепловым состоянием доменной печи (фрагмент)

Подъемная сила потока зависит от расхода дутья, распределения материалов по сечению и высоте шахты печи, гранулометрического состава материалов и других факторов.

Для каждой конкретной технологической ситуации существует такое критическое значение расхода дутья, при котором сила, противодействующая сходу шихты, полностью компенсирует гравитационную силу. В этом случае материалы прекращают движение, т.е. шихта зависает в печи.

С одной стороны, производительность печи зависит от величины расхода дутья в прямо пропорциональной зависимости, а с другой – увеличение расхода дутья приводит к зависанию шихты и снижению производительности печи.

Поэтому одной из основных задач подсистемы управления сходом шихты является поддержание максимально возможной и равномерной по сечению печи скорости опускания материалов.

Решение этой задачи достигается соответствующим изменением расхода и количества дутья. Превышение этих параметров нарушает ровный ход печи, а уменьшение приводит к снижению производительности.

Измерение уровня засыпи шомполами или радиолокаторами является по существу единственным методом прямого контроля хода ДП.

Косвенными параметрами, определяющими условия движения газового встречного потока по высоте шахты, а значит, и его подъемную силу, препятствующую сходу материалов, является распределение частых перепадов и распределение CO и CO_2 по горизонтам шахты и на колошнике.

Основными управляющими воздействиями на ход печи «сверху» является:

- изменение состава загружаемых в ДП материалов;
- изменение распределения шихтовых материалов на колошнике.

Эти управляющие воздействия имеют значительное и долгосрочное влияние на ход печи, определяя как бы стратегию управления.

Более эффективными являются управляющие воздействия «снизу»:

- изменение расхода дутья;
- изменение температуры дутья;
- изменение влажности дутья.

В случае использования комбинированного дутья важным фактором для управления ходом печи и газодинамическим режимом распределения дутья по сечению столба шихты является изменение состава дутья и особенно распределения дутья по фурмам.

Для каждой ДП благодаря индивидуальному отложению гарнисажа характерным является профиль шахты, определяющий распределение дутья по фурмам.

Расположение измерительного устройства (сопла) и регулирующего поворотного клапана в фурменном воздухопроводе представлено на рис. 61.

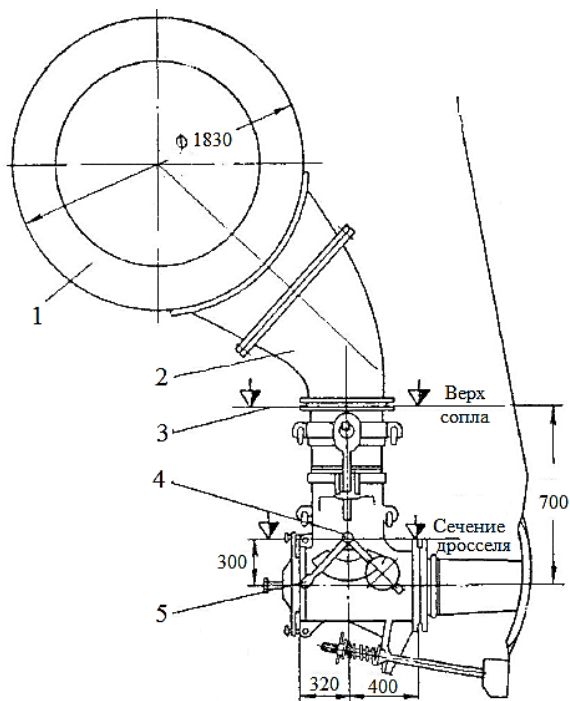


Рис. 61. Расположение измерительного сопла и регулирующего дросселя в фурменном воздухопроводе: 1 – кольцевой воздухопровод; 2 – фурменный рукав; 3 – место установки измерительного сопла; 4 – ось регулирующего дросселя; 5 – рычаг ручного управления дросселем

Регулирование распределением дутья по фурмам ДП представляет собой очень сложную техническую проблему, заключающуюся в высокой температуре дутья и наличии абразивных частиц в этом дутье.

Вариант устройства измерительного сопла и регулирующего клапана представлен на рис. 62.

Управление распределением дутья по фурмам ДП используется очень редко в связи с огромными затратами технических средств и низкой эксплуатационной стойкостью измерительных и регулирующих устройств.

На современных ДП основными параметрами для управления ходом печи являются нижний, верхний и общий перепад давления по высоте шахты.

Каждый из этих перепадов характеризует «гидравлическое» сопротивление столба шахты на соответствующем участке.

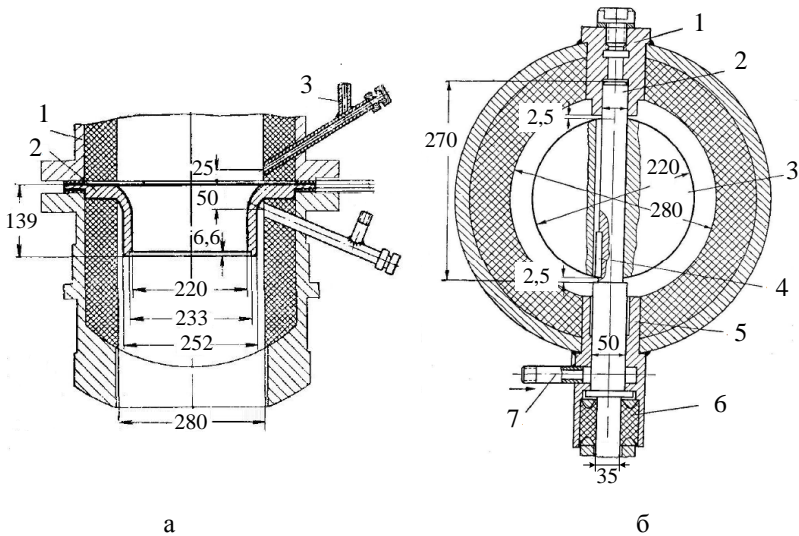


Рис. 62. Устройство регулирующего дросселя и измерительного сопла:
 а – измерительное сопло: 1 – фурменный рукав; 2 – сопло;
 3 – импульсные линии измерения расхода дутья на фурму,
 б – регулирующий дроссель: 1 – опора; 2 – ось дросселя; 3 – поворотный
 регулирующий дроссель (заслонка); 4 – шпонка; 5 – втулка;
 6 – уплотнение; 7 – подвод сжатого воздуха

Общий перепад характеризует общее аэродинамическое сопротивление всего столба шихты от кольцевого воздухопровода до колошника.

Верхний перепад характеризует сопротивление шихты от середины шахты до колошника.

Нижний перепад характеризует аэродинамическое сопротивление столба шихты от кольцевого воздухопровода до середины шахты.

Управление ходом доменной печи по формируемым входным воздействиям практически совпадает с управляющими воздействиями по обеспечению равномерного распределения газов по сечению столба шихтовых материалов или газодинамическим режимом печи.

Различают следующие виды распределения газового потока по сечению столба шихты:

- нормальный, обеспечивающий равный ход печи и максимальную производительность;

- центральный ход, когда в центре шахты печи образуется сильно разрыхленный участок, по которому доменный газ преимущественно проходит на колошник, ухудшая условия восстановительных процессов в остальной части рабочего пространства печи;

– периферийный ход, когда на участках, примыкающих к огнеупорной защитной кладке рабочего пространства ДП, образуется разрыхленный слой и горновые газы в основном через этот слой прорываются на колошник, ухудшая условия восстановительных процессов в остальной части столба шихтовых материалов;

– канальный ход, когда по высоте слоя шихты образуется открытый канал (продув) и горновые газы, не встречая сопротивления, прорываются через слой шихты на колошник, практически не участвуя в косвенном восстановлении. Это самый неблагоприятный случай.

О характере изменения условий хода печи и газопроницаемости столба шихтовых материалов оперативно можно судить по изменению всех трех частных перепадов. Изменение величин частных перепадов позволяет определить участок шахты, на котором произошло изменение условий нормальной работы.

Если верхний перепад увеличился, а нижний уменьшился, в то время как общий тоже увеличился, то это свидетельствует об ухудшении газопроницаемости в верхней части шахты при сохранении прежней в нижней части. Поэтому для сохранения нормального ровного хода печи следует принять меры к увеличению газопроницаемости в верхней части путем соответствующего изменения системы и количества загружаемых материалов.

Считается, что кокс разрыхляет слой шихтовых материалов, а рудно-флюсовая часть подачи уплотняет столб шихтовых материалов в печи.

После определения места нарушения нормального хода процесса необходимо обоснованно выбрать управляющее воздействие для ликвидации этого нежелательного нарушения.

Применительно к рассмотренному ранее случаю увеличение газопроницаемости верхнего участка можно обеспечить, увеличив неравномерность распределения агломерата по радиусу шахты, т.е. уменьшив его количество в центре и на периферии, а увеличив в середине радиуса (на гребне шихты при завалке).

Такое управляющее воздействие можно назвать активным.

Но можно изменить газопроницаемость, используя пассивное управляющее воздействие путем повышения давления газов на колошнике или уменьшением количества дутья.

Эти способы оперативно ликвидируют опасность зависания шихты, но причина, вызвавшая уменьшение газопроницаемости, не устраняется и остается.

Поэтому при управлении ходом печи и газопроницаемостью по сечению шахты следует в первую очередь использовать активные меры:

– «сверху» – изменение распределения материалов при загрузке их в печь;

– «снизу» – изменение температуры и влажности дутья.

Используя пассивные меры, следует применять осторожно и вынужденно пути реализации управления:

- «сверху» – изменением давления газа на колошнике доменной печи;
- «снизу» – изменением расходов дутья, кислорода и природного газа.

Рассмотренный способ управления ходом печи и газопроницаемостью является весьма приближенным, поскольку учитывает величины только трех перепадов, в определенном секторе рабочего пространства печи.

Известен способ контроля газопроницаемости столба шихты в каждом из определяемых числом фурм локальных секторов рабочего пространства. Суть способа заключается в одновременном измерении давления и расхода дутья через каждую из фурм, определении перепадов давления дутья на каждой фурме (или группе фурм) и давлений в середине шахты, измеряемых в нескольких точках, и в колошниковом пространстве. По полученной информации вычисляются величины газодинамических сопротивлений в каждом локальном секторе рабочего пространства. Это позволяет существенно увеличить достоверность информации о газодинамическом режиме работы доменной печи.

Учитывая сложность решаемых задач в АСУТП доменным процессом, можно рекомендовать следующую последовательность действий по управлению доменным процессом:

1. Необходимо принять все возможные меры к стабилизации физико-химических параметров всех шихтовых материалов, загруженных в ДП.

2. Если произошло отклонение параметров газопроницаемости в верхней части шахты печи, то целенаправленным изменением системы подачи материалов принять оперативные меры по ликвидации возникшего отклонения.

3. Если произошло отклонение параметров газопроницаемости от нормальных значений в нижней части печи, то необходимо оперативно принять целенаправленные меры к изменению температуры и влажности дутья.

4. Если принятые меры не устраняют опасности зависания и неравномерного хода печи, то необходимо уменьшить расход дутья, что тоже приведет к снижению производительности ДП.

5. По мере ликвидации отклонений за счет принятых управляющих воздействий необходимо постепенно восстановить прежний, как правило, максимальный расход дутья для повышения производительности доменной печи.

6. При возникновении отклонений одновременно в верхней и нижней частях печи управляющие воздействия необходимо оказывать на обе части печи.

Параметры, характеризующие состояния доменного процесса при возникновении отклонений от нормального хода и рекомендации по устранению этих отклонений [5] представлены в прил. Б.

Содержащиеся в прил. Б технологические особенности изменения параметров доменного процесса и методы ликвидации возникших отклонений этих параметров от параметров, характеризующих нормальный ход печи, используются для формирования базы знаний в экспертной системе управления доменным процессом, которая является по сути дела интеллектуальной системой управления, т.е. дальнейшим развитием АСУ ТП доменного процесса.

Очевидно, что приведенные в прил. Б сведения не являются всеобъемлющими и полными. Но они могут быть приняты для начального этапа при синтезе АСУ ТП, т.к. основаны на практическом опыте, полученном при управлении процессом на ДП, в основном для доменного цеха ПАО «ММК».

В заключение хочется отметить, что приведенные сведения особенно полезны начинающим свою трудовую жизнь бакалаврам и магистрам, т.к. отражают все многообразие, неоднозначность и сложность при формировании управляющих воздействий, вырабатываемых АСУ ТП доменного процесса.

Контрольные вопросы к разделу 7

1. Какие элементы и почему присутствуют на структурной схеме АСУ ТП доменного производства?

2. В чем назначение подсистемы шихтоподачи и какие задачи решаются этой системой?

3. Опишите состав подсистемы управления тепловым режимом ДП и способы стабилизации теплового состояния доменного процесса.

4. Какие существуют методы контроля хода ДП и управления газораспределением по сечению шахты?

5. Назовите основные способы управления «сверху» ходом ДП.

6. Назовите основные способы управления «снизу» ходом ДП.

7. Какие существуют способы ликвидации канального хода ДП?

8. Охарактеризуйте нормальный ход ДП.

8. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

8.1. Общие сведения, состояние вопроса

Доменный процесс изучен еще недостаточно, несмотря на многовековую историю [5].

Проблемой всех существующих детерминированных количественных математических моделей является недостаточно высокая точность значений, входящих в них параметров. Это относится, в частности, к факторам, определяющим газопроницаемость (порозность) столба шихты, распределения газового потока, параметры, характеризующие скорость восстановления железорудных материалов и т.п.

Процесс выплавки чугуна в доменной печи подвержен влиянию многих переменных контролируемых и неконтролируемых факторов, которые вызывают нарушение хода печи и ее теплового состояния и требуют высокой квалификации технологического персонала при управлении доменной плавкой.

Вместе с тем ведущими специалистами-металлургами накоплен значительный запас знаний и опыта ведения процесса, диагностики агрегата, что позволяет им осуществлять управление технологическим процессом при отсутствии части объективной информации и неполной оценке некоторых аспектов состояния оборудования и технологии.

Для решения этих проблем с целью диагностики и управления ходом доменной печи создаются экспертные системы (ЭС), построенные в концепции принципов нечеткой логики искусственного интеллекта и включающие в себя опыт специалистов-доменщиков.

Системы с применением искусственного интеллекта (ИИ) создаются с целью стабилизации хода печи и повышения качества чугуна. ЭС способны использовать детерминированные знания о процессе и обобщать практический опыт специалистов. Процесс накопления знаний и опыта в ЭС продолжается после ввода ее в действие, учитывая последующие изменения технологии. ЭС повышают уровень знаний среднего специалиста до уровня квалифицированного, обеспечивают единообразие решений и оперативную адаптацию в изменяющихся условиях массового, интенсивного производства.

Наибольшее распространение ЭС для управления ходом доменной печи получили в Японии. Первая ЭС, разработанная компанией Nirron Still, была установлена для опытной эксплуатации на доменной печи №4 в Кимицу (1984) и введена в промышленную эксплуатацию в 1986 г.

ЭС выполняет две функции:

- диагностику аномальных состояний технологического процесса;
- управление тепловым режимом печи.

Система ИИ с развитой логикой «ALIS», примененная на доменных печах №3 и 4 в Кимицу, осуществляет контроль хода печи, состоя-

ния горна, движения шихты, контроль состояния оборудования. Система «ALIS» содержит два комплекта баз знаний, что позволяет проводить ее корректировку в реальном масштабе времени. Коэффициент использования рекомендаций регулирующих воздействий, называемых системой, достигает 95%.

Система управления «BASYS» разработана и применена на доменной печи №5 завода Фукуяма фирмы «NKK» в 1986 г. Система построена по иерархическому принципу с использованием баз знаний и порождающих правил и выполняет те же функции, что и «ALIS». В этой системе реализованы законы нечеткой логики с использованием коэффициентов достоверности информации, что облегчает формирование баз знаний. Математическое обеспечение обработки информации построено на использовании трехмерных функций принадлежности для нечетких множеств, что позволяет сократить количество порождающих правил. Система характеризуется высокой надежностью в эксплуатации, коэффициент использования, т.е. отношение числа реализованных команд к их общему числу, составляет 0,97 или 97%. В настоящее время стала использоваться и для автоматизированного управления распределением шихтовых материалов по сечению колошника.

Опыт использования ЭС для управления доменной печью имеет также фирма «Кавасаки Сэйтецу» на доменной печи №4 в Мидзисима. Она ввела в эксплуатацию усовершенствованную систему управления ходом доменной печи, построенную в концепции ЭС. Технические средства системы включают ЭВМ управления доменной печью (сбор, предварительная обработка и передача данных) и ЭВМ искусственного интеллекта (обработка полученных данных, обработка знаний по интеллектуальным правилам для диагностики состояния печи, выработка регулирующих воздействий).

ЭС «BASYS» применяется также на ДП №1 завода Кейхин фирмы «Кобе Стил» для управления тепловым состоянием печи. При использовании ЭС среднеквадратичное отклонение температуры чугуна на выпусках составило 9°C, без нее – 13°C при колебаниях температуры на выпусках 1480÷1520°C.

С 1990 г. ходом доменной плавки на ДП №2 завода Кокура управляет ЭС, состоящая из двух подсистем: собственно управления плавкой и принятия решений. Внедрение системы позволило уменьшить дисперсию температуры выпускаемого чугуна.

Для управления работой на доменной печи №2 на заводе СИТА внедрена и успешно эксплуатируется система «SAFAIA», реализующая системный подход к анализу состояния печи с применением ИИ. Для оценки формы и положения зоны когезии в системе используют данные о температуре холодильников, индекс газопроницаемости, гранулометрический состав шихты, сход шихты и др.

При эксплуатации этой системы в 1989 г. общее число удачных рекомендаций и оценок состояния печи, выполненных системой, составило, спустя два месяца после начала работы системы, 95÷98 %.

В Южной Корее с 1990 г. работает ЭС реального времени. Система выполняет следующие функции:

- диагностику образования неактивной зоны в нижней части шахты;
- нарушения равномерности газового потока в печи;
- выработку управляющих воздействий для предотвращения нестабильной работы печи.

На доменных печах Европы и Северной Америки ЭС с ИИ еще не получили широкого распространения и находятся на стадии опытных разработок. Например, в Бельгии в Центре металлургических исследований (С.Р.М.) разработана ЭС «ACCES». Система позволяет выявить на ранней стадии нарушение в работе печи, например сползание гарнисажа, определить их причины и предложить управляющие воздействия для их ликвидации. При прогнозировании похолоданий горна система обеспечивает на 100% прогноз тяжелых похолоданий и на 75% легких похолоданий.

В России разработкой научных основ создания ЭС доменной плавки активно занимаются ученые ряда организаций: НПО «Черметавтоматика», МИСиС, Российский институт искусственного интеллекта, Институт системного анализа РАН, Институт проблем управления, УГТУ УПИ, Уральское отделение РАН и др.

Однако наилучшего результата достигли в этой области сотрудники Научно-инженерного центра ассоциации содействия Всемирной лаборатории (г. Москва).

Рассмотрим опыт разработки и внедрения в доменном цехе ПАО «ММК» первой отечественной промышленной ЭС реального времени «интеллект доменщика», разработанной сотрудниками этого центра совместно с учеными УГТУ УПИ.

8.2. Технологические основы экспертных систем доменной плавки

Хорошие технико-экономические показатели доменной плавки – высокую производительность и низкий удельный расход кокса – можно получить только при «нормальной работе» печи. Понятие о нормальной работе связывается с «ровным ходом печи».

Ровный ход печи характеризуется следующими признаками:

1. Плавным и устойчивым сходом шихтовых материалов, с постоянной скоростью опускания кусков шихты в поперечном сечении печи. Здесь важно отметить, что скорость опускания материалов в отдельных точках сечения печи может быть различной, но при ровном ходе печи эта скорость должна быть постоянной.

2. Устойчивым характером распределения шихтовых материалов и газового потока по сечению доменной печи, при котором достигается

максимальная степень использования химической и тепловой энергии газа и минимальный для данных условий плавки удельный расход кокса.

3. Постоянными параметрами дутьевого режима, т.е. условиями стабильности расхода дутья, его температуры и влажности, а также постоянными расходами природного газа (пылеугольного топлива или мазута) и технологического кислорода.

4. Устойчивым тепловым состоянием плавки, когда обеспечивается получение чугуна и шлака заданного состава с соответствующими физико-химическими свойствами.

5. Наличием устойчивого гарнисажа, что обеспечивает постоянство рабочего профиля печи и его сохранность в процессе эксплуатации печи.

Ровный ход достигается строгим соблюдением всех технологических инструкций, начиная от приемки и складирования шихтовых материалов, загрузки их в печь, выполнения технологии плавки и заканчивая выпуском продуктов доменной плавки.

При ведении доменной плавки, несмотря на сравнительно большую тепловую инерцию современных доменных печей, возможно значительное отклонение режимных параметров плавки от заданных. Причины таких отклонений от ровного хода печи могут быть разнообразными:

- изменение химического и гранулометрического состава шихтовых материалов и несвоевременная реакция технологического персонала на произошедшее изменение;
- выход из строя основного и вспомогательного технологического оборудования;
- ошибки технологического персонала, осуществляющего управление доменной плавкой и др.

Наблюдение и корректировка режима доменной плавки осуществляется как визуально наблюдением, так и с помощью системы отображения информации.

При распознавании того или иного отклонения хода печи от нормального режима плавки недопустимо делать вывод по 1-2 признакам. Полученная информация должна оцениваться по совокупности признаков и сопоставляться. В противном случае не исключается возможность принятия ошибочных решений, которые могут еще в большей степени усугубить наступившее нарушение режима плавки.

Визуальное наблюдение за ходом доменной плавки технологическим персоналом предусматривает, прежде всего, оценку светимости воздушных фурм. Светлые яркие фурмы с раскаленными до белого каления кусками кокса указывают на высокий нагрев печи. Переход от белого накала кусков кокса к розовому характеризует заметное уменьшение нагрева. Появление на фурмах красных кусков кокса и темных кусков железорудного материала свидетельствует о значительном снижении теплового состояния доменной плавки.

Следующий визуальный параметр, который может быть использован для суждения о ходе плавки – это характер циркуляции кусков кокса в фурменном очаге. При нормальном технологическом режиме плавки в глазке фурмы можно наблюдать интенсивную циркуляцию кусков кокса.

При замедлении доменного процесса наблюдается вялая циркуляция кусков твердого топлива. Это может быть одним из признаков нарушения хода плавки.

При нижнем подвешивании шихты, а также при работе печи в режиме тихого хода возможно полное отсутствие циркуляции кокса в зоне горения.

Создание систем искусственного интеллекта на основе традиционных языков программирования (C++ и др.) требует огромной работы программистов, поскольку они ориентированы на численные алгоритмы и слабо подходят для работы с символьными и логическими данными.

При создании систем искусственного интеллекта и экспертных систем рекомендуется использовать языки Пролог или Лисп. Универсальность этих языков по сравнению с традиционными языками довольно низкая, но потерю универсальности языки искусственного интеллекта компенсируют уникальными возможностями по работе с символьными и логическими данными.

Пролог и Лисп относятся к языкам, в основу которых положены идеи логического программирования. Основное отличие логического программирования от традиционного состоит в том, что программа является не четко определенной последовательностью операторов, а представляет собой формальное описание предметной области.

Пользователь не предписывает компьютеру, каким образом должна решаться поставленная задача, он только дает формальное описание поставленной задачи. При программировании ЭС используются «Оболочки», под которыми понимаются «пустые» версии существующих ЭС, т. е. пустые экспертные системы с пустой базой данных.

Достоинство оболочек в том, что они вообще не требуют работы программистов для создания готовой экспертной системы. Требуются только специалисты в предметной области – технологи-эксперты и инженеры по знаниям для заполнения базы знаний.

Однако, если предметная область плохо соответствует модели, используемой в данной оболочке, заполнить базу знаний весьма сложно. Для получения прикладной ЭС пользователь должен создать свою собственную базу знаний, используя представленный оболочкой язык представления знаний. Манипуляция знаниями, генерацию объяснений, а также сервис разработки и отладки базы знаний обеспечивают встроенные средства оболочки. Недостатком применения оболочек является возможное несоответствие конкретной оболочки разрабатываемой с ее помощью конкретной прикладной ЭС [5].

8.3. Общая характеристика ЭС «интеллект доменщика»

Учитывая крупные достижения в последнее время в области искусственного интеллекта (ИИ) в решении задач диагностики и прогнозирования, с одной стороны, и появление мощных информационных систем реального времени – с другой, реально появилась возможность создания, по сути дела, автоматизированной системы управления доменным процессом нового поколения на базе экспертных систем.

В общем случае такая система должна иметь «навыки суждений» о ходе доменной печи по различным признакам, правильно анализировать их и своевременно предупреждать вероятные отклонения от нормального режима, применяя различные приемы воздействия на ход доменной плавки.

Предварительно целесообразно отметить основные группы параметров, характеризующих ход доменной плавки и используемых в ЭС:

1. Химический состав чугуна и шлака.
2. Температуры чугуна и шлака на выпуске.
3. Информация с технических средств контроля (КИП и А), используемых на доменной печи.
4. Состояние фурменной зоны.
5. Состояние горна доменной печи и, в частности, уровень разгара кладки.

Основные виды расстройств доменной печи, которые ЭС диагностирует на базе искусственного интеллекта:

1. Периферийный ход печи.
2. Осевой ход печи.
3. Канальный ход печи.
4. Перекос уровня засыпи.
5. Тугой ход печи с дальнейшим развитием верхнего или нижнего подвисяния.
6. Горячий ход печи.
7. Холодный ход печи.
8. Аварийные ситуации (загромождение горна, образование настывлей и т.п.).

Кроме того, ЭС непрерывно определяет состояние ровного хода печи и заданного нагрева и прогнозирует их развитие или нарушение.

В процессе экспертизы хода доменной плавки выделяются факторы, являющиеся причиной нарушения хода доменной плавки:

1. Изменение свойств шихтовых материалов (качество железорудных материалов, содержание мелочи в шихте, прочность кокса и т.д.).
2. Изменение параметров дутьевого режима (расход дутья, температура, влажность).
3. Изменение режимов загрузки (система загрузки, уровень засыпи).
4. Изменение вязкости шлака.
5. Оптимальность рудной нагрузки.

6. Изменение параметров комбинированного дутья (расход инжектируемого топлива, природного газа, технологического кислорода на обогащение дутья).

7. Состояние горна (уровень жидких продуктов плавки).

Основные способы воздействия на ход доменной плавки с целью устранения возникающих отклонений сводятся к следующим:

1. Изменение рудной нагрузки (в том числе загрузка в печь дополнительных скипов кокса и холостых подач).

2. Изменение режима загрузки материала (система загрузки и уровень засыпи).

3. Изменение дутьевых параметров (расход, температура, влажность дутья, расход природного газа, расход технологического кислорода).

4. Изменение в подачу масс основных и кислых добавок.

5. Изменение давления колошникового газа.

6. Изменение количества и состава шлака.

7. Искусственная (принудительная) осадка шихты.

Управляющие воздействия реализуются обычно путем выдачи рекомендаций технологическому персоналу на их изменение.

Функциональная структура ЭС, представленная на рис. 63 содержит следующие элементы [5]:

1. Модуль сбора информации о параметрах доменной плавки.

Этот модуль считывает данные, поступающие в режиме реального времени (текущую информацию), поступающие как от датчиков технологических параметров, так и вводимых вручную технологическим персоналом доменной печи. Цикл считывания текущей информации с датчиков составляет $5 \div 30$ с.

2. Модуль обработки входной информации.

Производит оценку считываемых значений параметров (сглаживание, интерполяцию, интегрирование и т.д.) и выделение характерных изменений параметров на временном интервале 8 ч по специальной программе с использованием определенных математических процедур.

3. Экспертная подсистема диагностики хода ДП.

Это подсистема представляет программный модуль, предназначенный для раннего обнаружения намечающихся расстройств доменной печи (канального хода, периферийного хода, тугого хода с дальнейшим прогнозом места подвисяния шихты, горячего и холодного хода). Благодаря этому ЭС обеспечивает возможность идентификации ровного хода печи и диагностирование его развития или нарушения. Экспертная система выдает в количественной форме вероятность появления и развития того или иного вида расстройства хода доменной печи.

4. Экспертная подсистема диагностики теплового состояния ДП.

Представляет собой программный продукт, обеспечивающий непрерывную диагностику теплового состояния доменной печи по показателям технических средств контроля. Она выдает с учетом хода, определяемого подсистемой 3, количественные данные вероятности того или иного теплового состояния (похолодания, разогрева и заданного нагрева печи).

5. Экспертная подсистема причин расстройств хода ДП.

Эта подсистема представляет собой программное средство, предназначенное для информирования технологического персонала о причинах, вызвавших отклонение от нормального хода печи.

6. Экспертная подсистема причин нарушения теплового режима ДП.

Представляет собой программное средство для определения факторов, вызывающих нарушение теплового режима доменной плавки.

7. Модуль вспомогательных расчетов.

Это программный модуль, предназначенный для выполнения расчетов, необходимых технологическому персоналу при управлении доменным процессом. В состав этого модуля входят, в частности, следующие подпрограммы:

- Поверочный расчет шихты доменной плавки.
- Расчет задувочной шихты после стоянки печи различной продолжительности.
- Расчет теоретической температуры горения.
- Оперативный расчет расходов технологического кислорода, естественного и обогащенного дутья и др.

8. Экспертная подсистема формирования рекомендаций по управляющим воздействиям.

Эта подсистема предназначена для выдачи рекомендаций технологическому персоналу по применению одного или нескольких способов воздействия на ход доменной печи в случае обнаружения возникающего отклонения от нормального хода или наметившегося отклонения теплового состояния печи от заданного. При этом предусмотрена возможность регулирования теплового режима доменной печи как снизу (температура и влажность, расход природного газа и технологического кислорода), при кратковременном (до 8 ч) нарушении, так и сверху (рудная нагрузка, режим загрузки), при длительных (более 8 ч и до нескольких суток) прогнозируемых отклонениях от заданного значения содержания Si в чугуна.

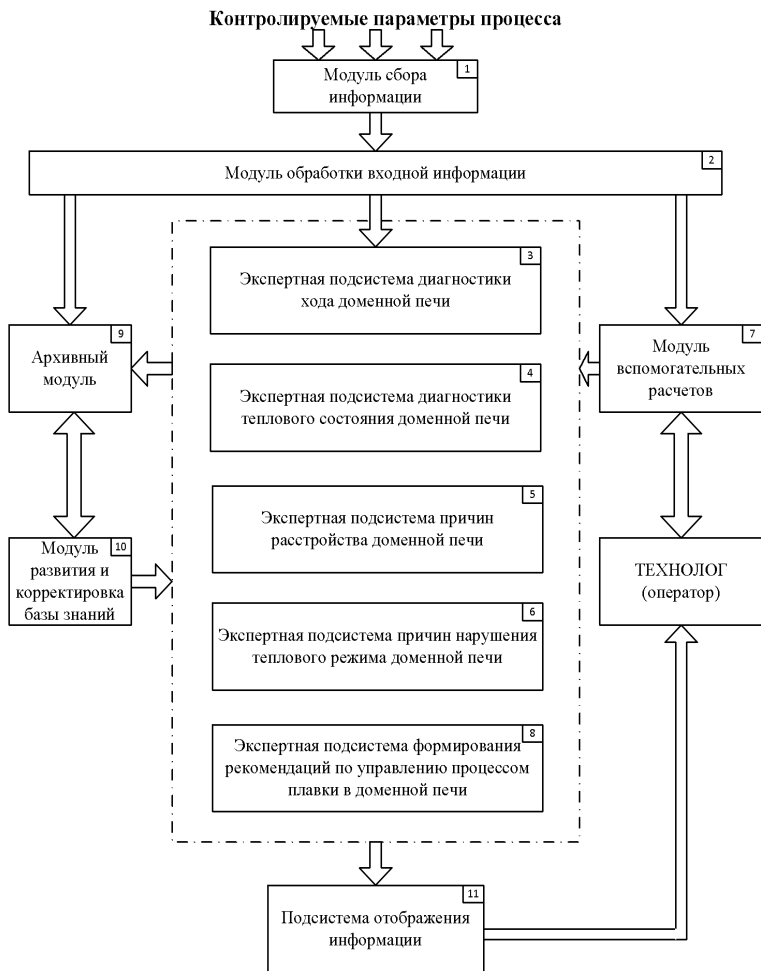


Рис. 63. Функциональная структура экспертной системы для доменной печи

9. Архивный модуль.

Представляет собой программное средство, обеспечивающее хранение непрерывных реализаций трендов (текущих сочетаний значений технологических параметров доменной плавки) параметров состояния, основных контролируемых параметров, расчетных и фактических значений управляющих воздействий. Этот модуль также сохраняет результаты подсистем хода и теплового состояния доменной печи.

10. Модуль развития и корректировки базы знаний.

Этот модуль является программным модулем и предназначен для:

- включения в базу знаний новых порождающих правил;
- установки и корректировки коэффициентов уверенности для порождающих правил;
- тестирования базы знаний на контрольных сценариях развития расстройства хода печи.

11. Подсистема отображения информации.

Этот модуль предназначен для представления технологическому персоналу необходимой информации о ходе доменной плавки. Модуль обеспечивает поддержание двух режимов работы:

- автоматический (постоянный вывод информации на монитор компьютера);
- диалоговый – по запросу пользователя.

Система отображения обеспечивает:

- 1) текущее значение вероятностей появления и развития того или иного хода доменной печи и ее теплового состояния;
- 2) графическое представление текущей тенденции и развития вероятностей того или иного хода печи за последние 24 ч;
- 3) необходимые разъяснения по заключениям экспертных систем по запросу технологического персонала;
- 4) вывод на экран монитора экстренных сообщений (перекок уровня засыпи, отклонение теоретической температуры горения от заданной, неисправность датчиков, прекращение поступления данных в систему и т.п.);
- 5) графическое отображение газодинамических характеристик столба шихты (текущих и предельных).

8.4. Обработка входной информации

В основу алгоритма обработки входной информации положен подход, при котором сигнал описывается:

- диапазоном его изменения (допустимое значение, больше или меньше допустимого значения);
- тенденцией изменения сигнала (увеличивается, уменьшается, остается неизменным, низкочастотные колебания);
- амплитудой высокочастотных колебаний (равна установленному значению, больше установленного значения).

Считывание информации с датчиков производится с периодом ΔT , определяемым, с одной стороны, временем, необходимым для обработки сигналов со всех датчиков, а с другой – из условия $\Delta T < \frac{1}{2} F$, где F – низкочастотная составляющая полезного сигнала.

Входная информация разделена на отдельные специфические блоки:

1. Блок задач быстрых входных данных.

В этот блок включены параметры, требующие периодичности опроса состояния 5 с (критические параметры), такие как верхние пики давления колошникового газа, анализ схода шихтовых материалов, время срабатывания подач, перепады давления по высоте печи, давления колошникового газа, горячее дутье, работа ВРШ, дискретные аварийные и эксплуатационные сигналы и т.д.

2. Блок задач остальных входных данных, автоматически контролируемых непосредственно на печи.

В этот блок включены параметры: анализ состава колошникового газа, температуры периферийных термопар, температуры колошникового газа по газоотводам, влажность, температура, расход, давление и состав горячего дутья, расходы природного газа и технологического кислорода, расходы кокса и железорудных материалов и т.п. Периодичность опроса состояния этих, как правило, автоматически контролируемых параметров составляет 30 с.

3. Автоматический или полуавтоматический ввод контролируемых данных.

В этот блок включены: химический состав железорудного сырья, его механическая прочность, содержание мелочи, технический анализ кокса, его прочность, состав жидких продуктов плавки. Поступающая из отдела сырья и топлива информация о химическом составе и физических свойствах очередной партии сырья обновляется по мере поступления. При этом производится предварительная обработка информации, слежение за прохождением партии сырья и передача информации о составе сырья в компьютер ЭС, когда данная партия сырья поступает на колошник доменной печи.

Поступающая из химической лаборатории доменного цеха информация о результатах химического анализа чугуна и шлака становится известной примерно через 2 ч после очередного выпуска. В ЭС передается также оперативная информация о содержании Si в чугуне и основности шлака на выпуске по оценке мастера печи.

4. Блок информации о ходе доменного процесса по оценке технолога-доменщика.

В этот блок включена информация, которая в настоящее время не контролируется автоматически, но несет большую информационную нагрузку о развитии процессов в доменной печи.

К этой информации относятся следующие данные:

- состояние фурменных зон, оцениваемое на основании визуального контроля: яркость, неравномерность свечения фурменной зоны, циркуляция кокса перед фурмами и т.п.;
- состояние горна доменной печи;
- оценка внешнего вида чугуна и шлака в жидком и твердом состояниях.

5. Блок определения уровня расплава в горне и характера выпусков чугуна и шлака.

Информация определяется на основании данных начала и конца выпуска, времени срабатывания подач, массы выпуска чугуна и массы выпуска шлака, визуального наблюдения за ходом отработки жидких продуктов плавки.

Информация блоков 4 и 5, данные визуального контроля работы фурменной зоны, программа системы загрузки, начала и конца отработки жидких продуктов плавки и т.п., обновляется по мере поступления и ввода информации.

Обновление выходной информации на экране монитора (результат диагностирования текущего состояния доменной плавки) происходит с периодичностью 5 мин, а при поступлении экстренных сообщений сразу.

В процессе обработки параметров доменной плавки возникает необходимость:

- выделения различных характеристик и их изменений: увеличение, уменьшение, наличие колебаний, наличие положительных и отрицательных пиков на определенном интервале времени;
- фильтрации, сглаживания, интерполяции и экстраполяции.

Для автоматических датчиков в основном производится периодическое считывание сигналов, их предварительная обработка по различным алгоритмам, а также запоминание оценок параметров обрабатываемых сигналов за 5-минутный интервал времени.

8.5. Алгоритмы сглаживания технологической информации

Первичная обработка данных контроля и показаний измерительных приборов включают процедуру экспоненциального сглаживания первого или второго порядка, фильтрацию методом медианны по 3-5 точкам.

Рассмотрим основные математические процедуры, обеспечивающие решение указанных задач, при обработке информации о состоянии доменного процесса.

8.5.1. Алгоритм сглаживания среднего

Алгоритм сглаживания среднего представлен в виде формализованного выражения:

$$Z^*(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=i-M+1}^i Z(j), \quad (8.1)$$

где $Z^*(i)$ – сглаженное значение контролируемой переменной $Z(i)$ для i -го момента времени;
 M – интервал сглаживания («конечная память»), выраженный в числе точек.

Величина M может выбираться из условия $M < M_{\min}^S$, где M_{\min}^S – минимальная длительность постоянного условия полезного сигнала. Такой выбор оправдан с точки зрения получения в конце переходного процесса практически точного отслеживания любого ступенчатого изменения полезного сигнала.

8.5.2. Алгоритм экспоненциального сглаживания

Алгоритм экспоненциального сглаживания первого порядка имеет вид:

$$Z^*(i) = Z(i-1) + \alpha[Z(i) - Z(i-1)]$$

или (8.2)

$$Z^*(i) = (1 - \alpha)Z^*(i-1) + \alpha Z(i).$$

Параметр сглаживания α выбирается так, чтобы длительность переходного режима была менее M_{\min} , т.е.

$$\alpha = \frac{2}{M + 1}, \quad M \leq M_{\min},$$

где M – интервал сглаживания («конечная память»), выраженный в числе точек; i – порядковый номер цикла (интервала) считывания; $Z^*(i)$ – сглаженное значение сигнала на i -м считывании; $Z(i)$ – фактическое считанное значение сигнала на i -м считывании.

Как видно из (8.2), экспоненциальное сглаживание не пропускает ни высокую составляющую, ни отдельные кратковременные (меньше цикла считывания) импульсы считываемого сигнала.

8.5.3. Алгоритм релейного экспоненциального сглаживания информационного сигнала

Алгоритм релейного экспоненциального сглаживания имеет вид

$$Z^*(i) = Z^*(i-1) + \alpha Y[Z(i) - Z(i-1)] = Z^*(i-1) + \alpha Y(x), \quad (8.3)$$

где функция $Y(x)$ принимает значение

$$Y(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \leq \gamma; \\ \gamma \text{Sign}(x), & \text{если } |x| > \gamma. \end{cases} \quad (8.4)$$

Здесь параметр $\alpha = \frac{2}{M+1}$; $\gamma > 0$ – некоторый параметр, определяющий свойства защищенности алгоритма (8.3) от влияния грубых помех. Если обычная помеха $N^H(i)$ имеет нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией δ_{NH}^2 , то параметр γ можно выбрать с учетом условия

$$\gamma = \Delta^S + 2,5\delta_{NH}, \quad (8.5)$$

где Δ^S – модуль вероятного приращения полезного сигнала на соседних отсчетах.

Как видно из (8.3), (8.4), фильтр релейного экспоненциального сглаживания не пропускает высокочастотную составляющую с амплитудой меньше γ и пропускает без запаздывания изменение сигнала, если это приращение больше γ .

8.5.4. Алгоритм формирования управляющих воздействий, рекомендаций, корректировок и обучения

В основу этих алгоритмов положен метод восстановительной прогнозирующей алгоритмизации. Сущность ее содержательно связана с разнообразной деятельностью и практикой работы человека, в ходе которой находятся ретроспективно (с запаздыванием) образцовые (идеальные) решения, а затем они используются в целях общего обучения и контрольного управления.

При восстановлении образцовых решений производится:

– **сглаживание последовательных данных**, с целью подавления измерительных помех посредством алгоритма релейно-экспоненциального сглаживания согласно (8.3); расчет ошибки управления

$$\delta X(i) = X^\Phi(i) - X^3(i), \quad (8.6)$$

где $X^\Phi(i)$ – вектор фактического значения выходного параметра при i -м отсчете (реализации);

$X^3(i)$ – вектор заданного значения выходного параметра при i -м отсчете;

– **восстановление образцовых (идеальных) уравнений:**

$$U^B(i) = U^\Phi(i) + \frac{1}{K} \delta X(i), \quad (8.7)$$

где $U^B(i), U^\Phi(i)$ – векторы соответственно восстановленного и фактического управлений на i -м отсчете (реализации); K – коэффициент передачи по каналу управления;

– **приведение управлений к базовым условиям:**

$$U^\delta(i) = U^B(i) + \sum_{m=1}^M l_m [Z_m(i) - Z_m^\delta] \quad (8.8)$$

где $Z_m(i)$, Z_m^δ – нерегистрируемые и базовые значения учитываемых факторов;

l_m – пересчетные коэффициенты;

M – число учитываемых факторов;

$U^B(i)$ – базовое (не приведенное) управление на i -м считывании;

$U^\delta(i)$ – приведенное управление к базовым условиям;

– **автопрогнозирование приведенных управлений** для условий на предстоящий отсчет:

$$U^\delta(i+1) = F[U^\delta(i), U^\delta(i-1), \dots, U^\delta(i-n)], \quad (8.9)$$

где $F[\]$ – математический оператор прогнозатора;

– **пересчет базовых экстраполированных управлений на предполагаемые начальные условия:**

$$U(i+1) = U^B(i+1) + \sum_{m=1}^M l_m [Z_m(i) - Z_m^\delta] \quad (8.10)$$

8.6. Характеристика базы знаний

База знаний ЭС содержит два основных модуля:

1. Базу знаний для диагностики нарушений хода доменной печи.
2. Базу знаний для диагностики нарушений теплового режима доменной печи.

Кроме двух основных имеются еще два вспомогательных модуля, которые используются для определения:

- 1) причин (факторов), вызывающих соответствующие нарушения хода печи;
- 2) причин (факторов), вызывающих соответствующие нарушения теплового режима доменной плавки.

Схемы баз знаний указанных модулей соответственно представлены на рис. 64-67, из которых очевидна используемая информация и логика построения экспертных подсистем хода доменной печи.

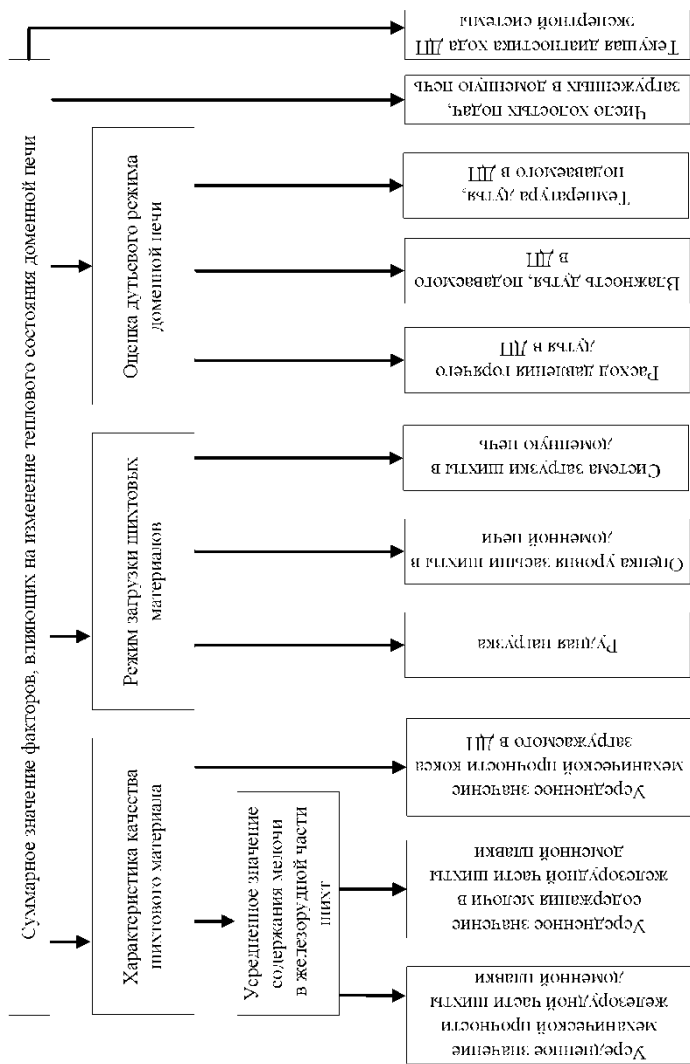


Рис. 66. Схема базы знаний по выявлению причин, вызывающих нарушение теплового состояния (тепловых расстройств) доменной печи

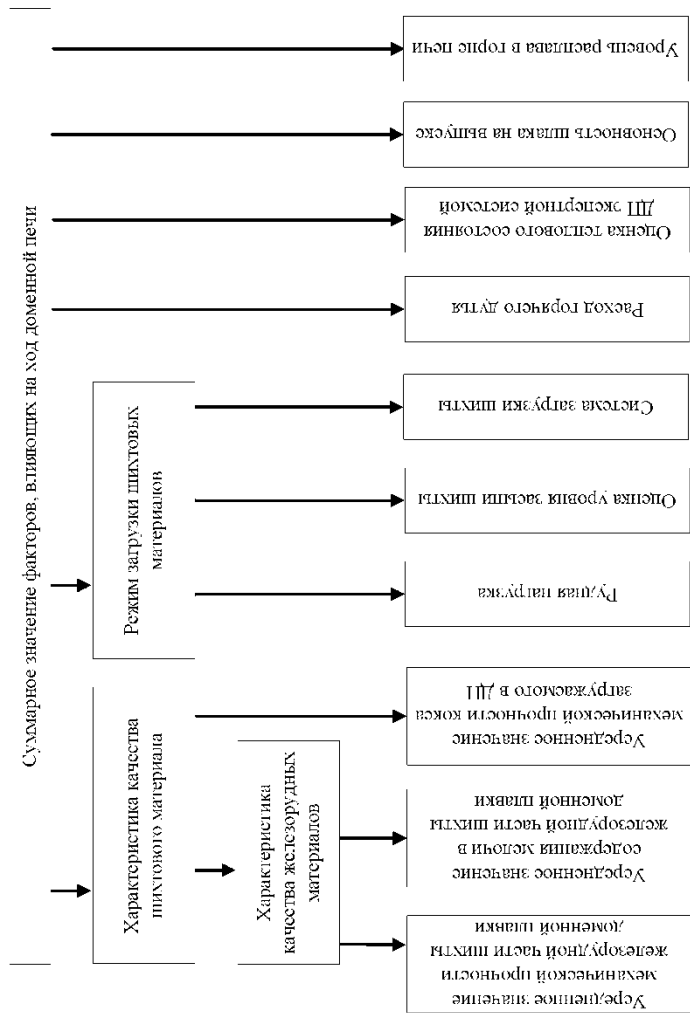


Рис. 67. Схема базы знаний по выявлению причин, вызывающих расстройство хода доменной печи

Фрагмент многослойной структуры базы знаний представлен на рис. 68, где введены следующие обозначения:

X_1^1 – давление горячего дутья (диапазон).

Имеет три альтернативы:

- оптимальное значение;
- выше оптимального значения;
- ниже оптимального значения.

X_2^1 – давление горячего дутья (тенденция):

- уменьшается;
- увеличивается;
- не меняется.

X_3^1 – давление горячего дутья (колебания):

- меньше или равно 0,05 атм;
- больше 0,05 атм, но меньше или равно 0,2 атм;
- больше 0,2 атм.

Основную часть **первого (левого) слоя** образуют N блоков входных переменных – результатов $\{X_i^j\}$ работы блока первичной обработки измерений, причем X_i^j может принимать несколько значений.

При этом в некоторых из модульных баз знаний первый слой может содержать переменные, значения которых определяются после работы других модулей.

Каждый блок входных переменных описывает результаты измерений одного из технологических параметров печи.

Так, например, группа $X^1 = \{X_i^1\}$, $i=1, 2, 3$ служит для описания параметров давления горячего дутья. При этом X_1^1 задает диапазон изменения давления, X_2^1 – тенденции изменения, а X_3^1 описывает колебания давления горячего дутья.

Второй слой образуют блоки правил вида P_i^j :

IF <условие> THEN $U^i = a$ ELSE $U^i = 0$.

В качестве условия используются предикаты вида $U^i = < значение >$, объединенные логическим условием «И».

Результатом выполнения правила является значение переменной, имеющее смысл промежуточного коэффициента уверенности.

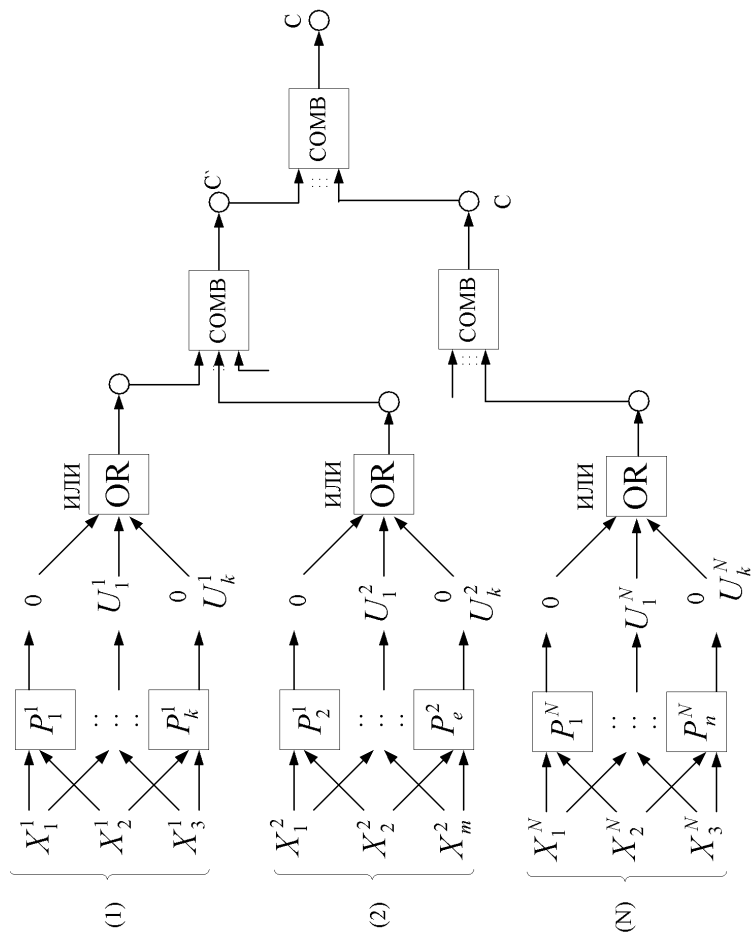


Рис.68. Схема организации базы знаний (данных)

Эти коэффициенты определяются экспертом при вводе правила в базу знаний.

K -й блок второго слоя образует правила, в условиях которых используются только переменные K -го блока переменных.

Фактические элементы j -го блока правил описывают воздействия j -го технологического параметра на технологический процесс. Для реализации правила второго слоя используется функция «И» (AND).

Третий слой образуют блоки «ИЛИ» OR-правил.

OR-правила выполняются по следующему алгоритму.

Пусть $S_1 \dots S_n$ – входные переменные OR-правила, а S – выходные.

Тогда:

- 1) если все $S_i=0$, то $S=0$;
- 2) если $S_i<0$, в качестве S принимается максимальное отрицательное значение S_i ;
- 3) если S_i имеют положительные, нулевые и отрицательные значения, то $S=\max S_i$.

Как видно из рис. 68, «ИЛИ» (OR)-правила используются для объединения результатов, полученных на втором слое.

Четвертый и последующие слои образуют блоки «КОМБ» COMB-правил, в которых вычисляются коэффициенты уверенности по формулам комбинированной связи, принцип работы которой изложен в [5].

Таким образом, в результате прогноза определяется коэффициент уверенности определения (состояния) хода доменной печи и коэффициент уверенности теплового режима.

Многослойная архитектура базы знаний обладает рядом преимуществ. К ним относятся:

– **Простота модификации.** Многослойная структура позволяет легко добавлять, расширять или удалять блоки правил на любом слое. Это свойство особенно важно на двух первых слоях, т.к. позволяет легко учитывать появление новых групп измерений технологических параметров.

– **Адаптируемость.** Предложенная структура базы знаний позволяет достаточно просто оценивать воздействия промежуточных коэффициентов уверенности на конечный результат и по результатам таких оценок вносить необходимые коррективы.

В настоящее время интенсивно развиваются программные средства для автоматизированного синтеза экспертных систем. Они, как правило, содержат широкий спектр языков и моделей представления базы знаний.

Разработка ЭС с использованием программных средств заключается в формализации исходных знаний, записи их на входном языке представления знаний и описания правил логического вывода решений. Затем экспертная система наполняется знаниями. Среди известных систем программного обеспечения, используемых при создании ЭС, является система КЕЕ (среда инженерных знаний) [5].

Система Nexpert Object является мощным средством разработки ЭС, способным конкурировать с такими системами, как Gold Work и KEE и имеющим подобную организацию базы знаний. Система функционирует в среде MS WINDOWS, имеет интерфейс с языком программирования и хорошие возможности работы с базами данных.

Система Personal Consultant Plus разработана американской фирмой Texas Instrument Inc. В этой системе используются правила «Если ..., то ...», к которым добавляются некоторые объектно-ориентированные среды. Эта система довольно интенсивно используется в промышленности.

Несомненным достоинством ЭС является то, что при формировании базы знаний учитываются не только новейшие теоретические разработки по созданию математических моделей доменного процесса, но и накопленный богатый опыт эксплуатации доменных печей, обобщенный в виде алгоритмов управления, полученных в результате многолетней работы лучших технологов-экспертов доменного производства.

Приведенные в данной работе общие сведения о содержании и структуре ЭС являются начальным этапом при синтезе этих современных интеллектуальных способов автоматизированного управления сложными технологическими процессами промышленного производства.

Контрольные вопросы к разделу 8

1. В чем заключается основное назначение ЭС?
2. Перечислите основные принципы формирования ЭС.
3. Назовите принципы обработки исходной информации в ЭС.
4. Назовите основные правила формирования выводов из базы данных ЭС.
5. Какой математический аппарат используется для формирования базы знаний в ЭС?
6. Приведите примеры эффективного использования ЭС для управления доменным процессом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1979. 481 с.
2. Волков Ю.П., Шпарбер Л.Я. Эксплуатация современной доменной печи. М.: Металлургия, 1991. 288 с.
3. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин, В.А. Улахович. М.: Металлургия, 1978. 263 с.
4. Глинков Г.М., Косырев А.И., Шевцов Е.К. Контроль и автоматизация металлургических процессов. М.: Металлургия, 1989. 352 с.
5. Информационные системы в металлургии: учебник для вузов / Н.А. Спиринов, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов и др.; под науч. ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 617 с.
6. Батыршин И.З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001. 224 с.
7. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 221 с.
8. Глинков Г.М., Маковский В.А. АСУ технологическими процессами в агломерационных и сталеплавильных цехах: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1981. 360 с.
9. Современные загрузочные устройства доменных печей / В.А. Авдеев, О.И. Шайнович, Е.И. Ясаков, А.В. Марченко. М.: Металлургия, 1994. 64 с.
10. Распределитель шихты загрузочного устройства доменной печи: пат. 1527273 Рос. Федерация: С 21 В 7/20.
11. Большаков В.И. Научное обоснование стратегии управления распределением шихты при использовании БЗУ // Сталь. 2004. №4. С. 37-42.
12. Тарасов В.П., Тарасов П.В., Быков Л.В. Газодинамические параметры и показатели работы доменных печей с загрузкой шихты БЗУ типовой конструкции // Сталь. 2005. №1. С. 6-9.
13. Тарасов В.П. К вопросу радиального распределения материалов и газов в доменной печи // Сталь. 2003. №6. С. 31-35.
14. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей. М.: Металлургия, 1990. 256 с.
15. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.Л. Терентьев и др.; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 301 с.
16. Автоматизация металлургических печей / В.Ю. Каганов, О.М. Блинов, Т.М. Глинков, В.А. Морозов. М.: Металлургия, 1975. 376 с.
17. Копелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. М.: ГНТИ ЧМ, 1960. 190 с.
18. Копелович А.П. Краткий справочник по автоматическому регулированию в черной металлургии. М.: ГНТИ ЧМ, 1993. 408 с.

19. Воскобойников В.Г. Система оптимизации расхода природного газа // Сталь. 1992. №6. С. 16-19.
20. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. М.: Энергия, 1973. 190 с.
21. Либерзон Л.М., Родов А.Б. Шаговые экстремальные системы. М.: Энергия, 1969. 96 с.
22. Парсункин Б.Н., Бушманова М.В. Расчеты переходных процессов в системах экстремального регулирования с запоминанием экстремума: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 164 с.
23. Рябчиков М.Ю., Трофимов Л.М. Повышение эффективности управления бесконусным загрузочным устройством в доменном цехе ОАО «ММК» // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. С. 118-124.
24. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ишметьев Е.И. Системы автоматической оптимизации управления технологическими процессами с запоминанием экстремума: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2015. 136 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА

/ Программа поиска оптимального расхода природного газа в доменной печи разработана студенткой гр.ЭМ-97-1 Михайловской Н.А. под руководством профессора кафедры ПКиСУ Парсункина Б.Н.*/*

```

program say;
uses crt,Graph;
const
    a1 =-0.0000191;           { коэффициенты }
    a =0.006603;             { уравнения }
    a3=-0.817;               { линии регрессии }
    a4=42.86;                 { статической }
    a5=-338.002;             { характеристики }
    ki=5;                     { скорость ИМ }
    dx=3;                     { шаг оптимизации }
    dZn =0.5;                 { зона нечувствительности }
    T0=6;                     { постоянная времени }
    Tz=1;                     { время запаздывания }
    dt=0.1;                   { период дискретизации }
    tpaus =6;                 { продолжительность паузы }
    {tzikl=6 ; }
    {0.5..0.7\20\0.05} {1..1.5,0.96\40\0.05}

var
    i,sg,j,ii,k                : integer;
    dZmax,n,timp,t,x0,t00,tzikl,ms,dZ,Z1 : real;
    y,y1,x,Z                    : array[0..2600] of real;
    alfa      : real; {-6.6} { скорость горизонтального дрейфа}
    beta      : real; {-13,2} { скорость вертикального дрейфа}
    st        : string;

procedure Init;
var
    graphdriver, graphmode : integer;
begin
    graphdriver:=detect;
    InitGraph(graphdriver,graphmode,'c:\tp\bgi\');
end;

{-----функция статической характеристики-----}

```

```

function f(xi,ti:real)      :      real;
begin
    f:=
        (al *(xi+alfa*ti)*(xi+alfa*ti)*(xi+alfa*ti)*(xi+alfa*ti))+
        (a2*(xi+alfa*ti)*(xi+alfa*ti)*(xi+alfa*ti))+
        (a3*(xi+alfa*ti)*(xi+alfa*ti)))+(a4*(xi+alfa*ti))+a5+(beta*ti)
    );
end;

begin
    {writeln(' t X(t) Y(t) Z(t)');
    writeln(' -----');}
    alfa:=0;
    beta:=0;
    x0:=60;
    x[0]:=x0;y [0] :=f(x0,0);y 1 [0] :=y[0] ;z[0] :=y[0];dZmax:=0;dZ:=0;
    timp:=dx/ki;tzikl:=timp+tpaus;sg:=l;
    for j:=0 to 21 do {22 npu 20c, 10 npu 40c}
        begin
            t00:=j*tzikl;
            Z1 :=Z[round(t00/dt)];
            for i:=round(0+t00/dt) to round((tzikl+t00)/dt-1) do
                begin
                    t:=i*dt;
                    if (t>=t00) and (t<timp+t00) then
                        x[i]:=x0+sg*ki*(t-t00);
                    if(t>=timp+t00) and (t<tzikl+t00)
                        then
                            x[i] :=x0+sg*ki*timp;
                    {-----ограничение концевыми выключателями-----}
                    if (x[i]<=60) or (x[i]>=1 10) then
                        x[i]:=x0;
                    {-----формула Эйлера-----}
                    y[i]:=f(x[i],t);
                    yl[i+1]:-yl[i]+((y[i]-yl[i])*dt/T0);
                    Z[i+1]:=Z[i]+((y[i]-Z[i])*dt/tz);
                    {writeln(t.2:i; ',x[i]:.3:l/ \y[i]:.5:3,' ',z[i]:.5:3);
                    if t={timp+tpaus}10*dt then readkey;}
                end;
                dZ:=z1-Z[round((tzikl+t00)/dt-1)];
                if dZ>dZmax then
                    dZmax:=dZ;
                if dZmax-dZ>dZn then

```

```

begin
    sg:=-sg;
    dZmax:=dZ;
end;
x0 :=x[roimd((tzikl+t00)/dt-1)];
end;
    {readkey}
{-----ГРАФИКИ-----}
n:=(tzikl+t00)/dt-1;
{-----X(t),Y(t),Z(t)-----}
Init:
line(20,250,20,400);
line(20,400,610,400);
line(20,220,20,50);
line(20,220,610,220);

for i:=1 to 5 do
begin
    line (20+100*4398,20+100*i,402);
    line (20+100*i,218,20+100*Q0*i,222);
    str(i*100*(t00+tzikl)/580:5:2, st);
    outtextxy( 15+100*i,412,st);
    outtextxy( 15+100*i,232,st);
end;

    (*for i:=1 to 19 do begin {насечки}
    line(20+i*27,398,20+i*27,402);
    line(20+i*53,218,20+i*53,222);
    end;
    for i:=0 to 1 do {надписи}
    outtextxy(20,230+i*180,'0 24 48 72
*)

outtextxy (0,397, '60');
outtextxy(0,357,'70');
outtextxy(0,277,'80');
outtextxy(0,277,'90');
outtextxy(0,257,'95');
{outtextxy(0,247,'1 10');}

for i:=0 to 7 do
    line( 18,400-20*i,22,400-20* i);
outtextxy( 130,10,'Y,Z,X(t)');
outtextxy(35,40,'Y(t),Z(t),кг/г');
outtextxy(35,255,'X(t),м^3/г');
outtextxy(560,200,'т,ч. ');
outtextxy(560,380,'т,ч. ');

```

```

outtextxy(25,213,'450');
outtextxy(25,183,'456');
outtextxy(25,153,'462');
outtextxy(25,128,'468');
outtextxy(25,93,'474');
outtextxy(25,63,'480');
for i:=0 to 5 do
    line(18,3+(215-round(30*i)),22,3+(215-round(30*i))); moveto(20,400-round((x[0]-60)*4));
for i:=0 to round(n) do
    lineto(20+round((600-20)/n*i),400-roiind((x[i]-60)*4));

moveto(20,220-roiind((z[0]-450)*5));
for i:=0 to round(n) do
    lineto(20+round((600-20)/n*i),220-round((z[round(i)]-450)*5));
moveto(20,220-round((y[10]-450)*5));
for i:=0 to round(n) do
    lineto(20+round((600-20)/n*i),220-round((y[round(i)]-450)*5));
readkey;
{-----Y(X)+Z(X)-----}
clrscr;
Init;
line(40,80,40,480);
line(40,400,600,400);
for i:=0 to 10 do
    line(i*50+70,398,1*50+70,402);
for i:=1 to 7 do
    line(38,400-i*45,42,400-i*45);
for k:=0 to 4 do
    begin
        moveto(70,400-round((f(60,5*T0*k)-460)*15));
        for ii:=0 to 50 do
            lineto(70+round(ii*10),400-
round((f(ii+60,5*T0*k)-460)*15));
        end;
        moveto(70,400-round((z[0]-460)*15));
        for i:=0 to round(n) do
            begin
                lineto(70+round((x[i]-60)*10),400-roiind((z[i]-460)*15));
            end;
        setcolor(white);
        outtextxy(70,410,'60 65 70 75 80 85 90 95 100 105');
        outtextxy(0,120,'480');
        outtextxy(0,165,'475');

```

```

outtextxy(0,210,'472');
outtextxy(0,255,'469');
outtextxy(0,300,'466');
outtextxy(0,345,'463');
outtextxy(0,390,'460');

for i:=0 to 25 do
    outtextxy(60,i* 10+140,'|');
for i:=0 to 25 do
    outtextxy(570,i*10+140,'|');
outtextxy(150,20, 'Y,Z(X)');
outtextxy(80,100, 'Y,Z(X),кг/т');
outtextxy(450,430,'X, м^3/т');
readkey;

{-----увеличенная Y(X)-Z(X)-----}
clrscr;
Init;
line(40,80,40,480);
line(40,400,600,400);
for i:=0 to 10 do
    line(i*50+70,398,i*50+70,402);
for i:=1 to 7 do
    line(38,400-i*45,42,400-i*45);
for k:=0 to 4 do
    begin
        moveto(70,400-round((f(75,5*T0*k)-460)*45));
        for ii:=0 to 20 do
            lineto(70+round(ii*25),400-
round((f(ii+75,5ii:T0*k)-460)*45));
        end;
        moveto(70,400-round((z[0]-460)*45));
        for i:=0 to round(n) do
            begin
                lineto(70+round((x[i]-75)*25),400-round((z[i]-460)*45));
            end;
        setcolor(white);
        outtextxy(70,410,'75 77 79 81 83 85 87 89 91 93');
        outtextxy(0,120,'466');
        outtextxy(0,165,'465');
        outtextxy(0,210,'464');
        outtextxy(0,255,'463');
        outtextxy(0,300,'462');
        outtextxy(0,345,'461');
        outtextxy(0,390,'460');
        outtextxy(150,20,'Y,Z(Xy)');
    
```

```

outtextxy(80,100,'Y,Z(X),кг/г');
outtextxy(450,430,'X,м^3/г');
readkey;

{-----с дрейфом-----}
  alfa:=-0.2;
  betta:=-0.01;
  x0:=60;
  x[0]:=x0;y[0]:=f(x0,0);yl[0]:=y[0];z[0]:=y[0];dZmax:=0;dZ:=0;
  timp:=dx/ki; {tzikl := timp+tpaus;} sg:=1;
  for j:=0 to 21 do {22 нпу 20с, 10 нпу 40с}
    begin
      t00:=j*tzikl;
      Z1 :=Z[round(t00/dt)];
      for i:=round(0+t00/dt) to round((tzikl+t00)/dt-1) do
        begin
          t:=i*dt;
          if (t>=t00) and (t<timp+t00) then
            x[i] :=x0+sg*ki*(t-t00);
          if (t>=timp+t00) and (t<tzikl+t00)
            then
              x[i]:=x0+sg*ki*timp;

          {-----ограничение концевыми выключателями-----}
          if (x[i]<=60) or (x[i]>=110) then
            x[i]:=x0;

          {-----формула Эйлера-----}
          y[i]:=f(x[i],t);
          y1[i+1]:=y1[i]+((y[i]-
y1[i])*dt/T0);
          Z[i+1]:=Z[i]+((yl[i]-Z[i])*dt/tz);
          { writeln(t:2:l, ' ',x[i]:3:l, '
',y[i]:5:3, ' ',z[i]:5:3);}

          if t=timp+tpaus then
            readkey;

          end;
          dZ:=z1-Z[round((tzikl+t00)/dt-1)];
          if dZ>dZmax then
            dZmax:=dZ;
          if dZmax-dZ>dZn then
            begin
              sg:=-sg;
              dZmax:=dZ;
            end;
        end;
    end;

```

```

                                x0:=x[round((tzikl+t00)/dt-l)];
end;
                                { readkey;}

{-----ГРАФИКИ-----}
n:=(tzikl+t00)/dt-l;

{-----X(t),Y(t),Z(t)-----}
Init;
line(20,250,20,400);
line(20,400,610,400);
line(20,220,20,50);
line(20,220,610,220);
for i:=1 to 5 do
begin
    line (20+100*i,398,20+100*i,402);
    line (20+100*1,218,20+100*1,222);
    str( i * 100 * (t00+tzikl )/580:5:2, st);
    outtextxy (15+100*i,412,st);
    outtextxy( 15+100*i,232,st);
end;
(* for i:=1 to 19 do
begin {насечки}
line(20+i *2 7,398,20+i*2 7,402);
line(20+i*53,218,20+i*53,222);
end;
for i:=0 to 1 do {надписи}
outtextxy(20,230+i*180,'0 24 48 72');
*)
outtextxy(0,397,'60');
outtextxy(0,357,'70');
outtextxy(0,317,'80');
outtextxy(0,277,'90');
outtextxy(0,257,'95');
{outtextxy(0,247,'110');}

for i:=0 to 7 do
    line(18,400-20*i,22,400-20*i);
outtextxy( 130,10,'Y,Z,X(t)');
outtextxy (35,40,'Y(t),Z(t),кг/т');
outtextxy(35,255,'X(t),м^3/т');
outtextxy(560,200,'т.ч. ');
outtextxy (560,3 80, 'т.ч. ');
outtextxy(25.213,'450');
outtextxy(25,183,'456');
outtextxy (25,153,'462');

```

```

outtextxy(25,128,'468');
outtextxy(25,93,'474');
outtextxy(25,63,'480');
for i:=0 to 5 do
    line(18,3+(215-round(30*i)),22,3+(215-round(30*i)));
moveto(20,400-round((x[0]-60)*4));
for i:=0 to round(n) do
    lineto(20+round((600-20)/n*i),400-round((x[i]-60)*4));
moveto(20,200-round((z[0]-450)*5));
for i:=0 to round(n) do
    lineto(20+round((600-20)/n*i),200-round((z[round(i)]-
450)*5));
moveto(20,200-round((y[0]-450)*5));
for i:=0 to round(n) do
    lineto(20+round((600-20)/n*i),200-round((y[round(i)]-
450)*5));
readkey;

{-----Y(X)+Z(X)-----}
clrscr;
Init;
line(40,80,40,480);
line(40,400,600,400);
for i:=0 to 10 do
    line(i*50+70,398,i*50+70,402);
for i:=1 to 7 do
    line(38,400-i*45,42,400-i*45);
for k:=0 to 4 do
    begin
        moveto(70,400-round((f(60,5*T0*k)-450)*15));
        for ii:=0 to 50 do
            lineto(70+round(ii*10),400-
round((f(ii+60,5*T0*k)-450)*15));
        end;
        moveto(70,400-round((z[0]-450)*15));
        for i:=0 to round(n) do
            begin
                lineto(70+round((x[i]-60)/J:10),400-round((z[i]-
450)*15));
            end;
        setcolor(white);
        outtextxy(70,410,'60 65 70 75 80 85 90 95 100 105');
        outtextxy(0,120,'470');
        outtextxy(0,165/465');
        outtextxy(0,210,'462');
        outtextxy(0,255,'459');
    
```

```

outtextxy(0,300,'456');
outtextxy(0,345,'453');
outtextxy(0,390,'450');
for i:=0 to 25 do
    outtextxy(60,i* 10+140,'|');
for i:=0 to 25 do
    outtextxy(570,i* 10+140,'|');
outtextxy(150,20,'Y,Z(X)');
outtextxy(80,100,'Y,Z(X),кг/г');
outtextxy(450,430,'X, м^3/г');
readkey;

{-----увеличенная Y(X)+Z(X)-----}
clrscr;
Init;
line(40,80,40,480);
line(40,400,600,400);
for i:=0 to 10 do
    line(i*50+70,398,i*50+70,402);
for i:=1 to 7 do
    line(38,400-i*45,42,400-i*45);
for k:=0 to 4 do
    begin
        moveto(70,400-round((f(75,5*T0*k)-455)*45));
        for ii:=0 to 20 do
            lineto(70+round(ii*25),400-
round((f(ii+75,5*T0*k)-455)*45));
        end;
        moveto(70,400-round((z[0]-455)*45));
        for i:=0 to round(n) do
            begin
                lineto(70+round((x[i]-75)*25),400-round((z[i]-
455)*45));
            end
        setcolor(white);
        outtextxy(70,410,'75 77 79 81 83 85 87 89 91 93');
        outtextxy (0,165,'460');
        outtextxy (0,210,'459');
        outtextxy(0,255,'458');
        outtextxy(0,300,'457');
        outtextxy(0,345,'456');
        outtext xy (0,390, '4 5 5');
        outtextxy(150,20,'Y,Z(X)');
        outtextxy(80,100,'Y,Z(X),кг/г');
        outtextxy(450,430,'X,м^3/г');
        readkey;
end.

```

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
И ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ
ПРИ СОСТАВЛЕНИИ БАЗЫ ЗНАНИЙ
ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Параметры, характеризующие текущее состояние доменной плавки, признаки появления текущих отклонений этих параметров нормального хода печи и рекомендации по устранению отклонений, являющиеся основой для эффективного функционирования АСУ ТП и базы знаний для экспертной системы управления доменным процессом содержат основные данные и изложены с учетом [5].

Приведённые сведения являются технологическим обоснованием основных положений по автоматизированному управлению доменным процессом. Особенно эти сведения полезны специалистам по автоматизации при синтезе систем управления, основанных на использовании принципов нечёткого и нейросетевого управления.

Б.1. Химический состав чугуна

Чувствительными параметрами к нагреву горна печи являются содержание в чугуне Si, Mn, S. С увеличением нагрева печи наблюдается увеличение содержания Si и Mn и уменьшение содержания S в чугуне.

Излом пробы чугуна. На печи Si в чугуне способствует выделению С в нём в виде графита, дающего в изломе пробы серый цвет. В том случае, когда С в чугуне связан в виде карбидов железа Fe_3C или марганца Mn_3C , излом чугуна будет белым.

В связи с этим чугун с содержанием Si более $0,6 \pm 0,7$ % имеет кристаллический излом пробы серого цвета (серый чугун), а при содержании Si менее 0,5% излом пробы чугуна становится аморфным и имеет белый цвет (белый чугун). В последнем случае большая часть углерода связана с железом в виде прочного соединения карбида железа (Fe_3C).

При суждении о тепловом уровне горна печи по излому пробы чугуна следует иметь в виду, что на вид излома пробы большое влияние оказывает скорость её охлаждения.

При быстром охлаждении образуются карбиды железа, поэтому при охлаждении пробы чугуна водой или при заливке чугуна в металлическую пробницу (кокиль) периферийная часть пробы бывает чаще всего «отбеленной». Напротив, проба, отлитая в песке и постепенно охлаждаемая в нём, при тех же условиях даёт серый излом.

Б.2. Искрение чугуна при выпуске

При достаточном производственном опыте о составе чугуна и его нагреве можно сравнительно точно судить визуально по характеру искрения чугуна и выделенного графита на впуске.

Здесь основная закономерность проявляется в том, что чем больше Si в чугуне (т. е. чем выше его нагрев), тем меньше его искрение при выпуске и тем больше присутствует выделение графита в окружающее пространство и на поверхности чугуна в виде скоплений (так называемая «спель»). Объясняется это явление тем, что при выходе чугуна из печи на литейный двор и снижении его температуры уменьшается растворимость углерода в чугуне, что и вызывает усиленное выделение графита. Горячий литейный чугун с содержанием Si до 3% и выше практически не даёт искр.

Передельные чугуны с содержанием Si менее 1% искрят обильно по мере снижения их нагрева. Что касается природы искрения чугунов при их выпусках, то это объясняют окислением поверхности слоев чугуна, появлением газообразных оксидов железа, разрывающих плёнку чугуна.

При выплавке чугунов с содержанием Mn в пределах 0,5÷1,0% по искрению чугуна можно судить о содержании Mn в металле. В этом случае на поверхности зеркала чугуна наблюдается появление мелких чистых искр – язычков жёлтого цвета от окисления марганца на поверхности чугуна.

По внешнему виду чугуна за перевалом, где зеркало чугуна освобождено от шлака, можно делать заключение о нагреве печи и содержании S в нём. Сера в соединениях с Fe в виде FeS при холодном ходе печи легко заметна на поверхности чугуна в виде отдельных тёмных плёнок. Однако появление таких плёнок возможно и при нормальном тепловом режиме плавки, но при плохом развитии процессов десульфурации.

Б.3. Состав шлака

О тепловом уровне доменной плавки возможно судить по цвету шлака. При похолодании печи наблюдается снижение степени перехода в чугун таких элементов, как железо и марганец. Вследствие этого в шлаке возрастает содержание монооксида железа FeO и монооксида марганца MnO. Известно, что FeO окрашивает шлак в бутылочно-зелёный цвет, а затем в чёрный. Монооксид марганца MnO окрашивает марганец в горюхо-зелёный цвет.

Нагрев доменной печи изменяет основность шлака. Повышение основности шпика (при неизменности состава и расходов загружаемых шахтовых материалов) свидетельствует о повышении нагрева печи. Это связано с уменьшением содержания кремнезема SiO₂ в шлаке вследствие восстановления Si и перехода его в чугун.

Основность шлака сравнительно легко определяется визуально по виду излома остывшего шлака.

Шлак высокой основности имеет серый камневидный излом, а кислый – полностью стекловидный или имеющий стекловидную корочку.

В расплавленном состоянии основность шлака определяется с помощью пики, на которую он берётся из желоба:

- кислый шлак при поднятии пики над уровнем шлака даёт длинные стекловидные нити («длинный шлак»);
- основной шлак нитей не даёт.

Остывший основной шлак склонен к рассыпанию в силу того, что двухкальцевый силикат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, входящий в состав основного шлака, при охлаждении при температуре 675°C переходит из α -фазы в β -фазу, что сопровождается увеличением объема примерно на 10%. Это и приводит шлак к разрушению с образованием мелкого порошка.

Признаком, определяющим недостаточный нагрев печи, является наличие так называемого «греналя» холодного железистого шлака, образующего помимо расплава чугуна третью фазу, плывущую по поверхности чугуна тонким слоем. Греналь трудно отделить от чугуна и задержать на перевале. Именно появление греналя является часто причиной «закозления» шлаковозов и чугуновозов.

Б.4. Показатели, характеризующие сход шихты в печи

Для фиксации уровня шихты в печи и для записи опускания материалов устанавливаются, как правило, два шомпольных зонда, движение которых фиксируется датчиками и передается в систему отображения технологической информации. Зонды поднимаются в верхнее положение перед загрузкой материалов в печь для предотвращения засыпания их шихтой, а затем после опускания очередной подачи в печь опускаются на уровне шихтовых материалов и движутся вниз вместе с шихтой до заданного уровня засыпи при двухконусной системе шихтоподачи.

Вторым объективным параметром, характеризующим сход шихтовых материалов в доменной печи является число сработанных подач в единицу времени. Очевидно, что ровному ходу ДП соответствует постоянное число сработанных подач в час (смену, сутки).

Давление горячего дутья является также показателем равномерности хода печи. Нормальному сходу шихты отвечает (соответствует) постоянство давления дутья. Допускаются случайные изменения давления дутья в пределах 10 кПа (примерно 0,1 атм) за 25÷30 мин.

Масса чугуна за выпуск при ровном ходе плавки должна случайно колебаться для доменных печей среднего и большого объема в пределах 20÷30 т. Вынос колошниковой пыли при ровном ходе доменной плавки тоже примерно постоянен. Это также является показателем ровного хода печи.

Б.5. Показатели, характеризующие устойчивость распределения газового потока по сечению доменной печи

Прежде всего, таким показателем является кривая изменения содержания диоксида углерода CO_2 по диаметру колошника доменной печи.

Наилучшие показатели доменной плавки:

- высокая производительность;
- низкий расход кокса.

Они достигаются при определённом (наилучшим) для данной печи (т.е. рациональном) распределении материалов и газов по сечению печи. Этому соответствует «оптимальное» изменение CO_2 по диаметру колошника. При устойчивом распределении газового потока текущие значения содержания CO_2 в колошниковом газе в кольцевых сечениях печи имеют небольшие колебания относительно установленных наилучших (оптимальных) значений.

Следующий параметр, характеризующий устойчивость газораспределения, – это температура колошникового газа в вертикальных газоотводах печи. Температура отходящих из печи газов фиксируется термомпарами, установленными в каждом газоотводе в непосредственной близости от уровня шихты (примерно 2÷3 м от уровня засыпи).

Температура, фиксируемая каждой термопарой, имеет синусоидальный вид, что связано с периодичностью загрузки в печи холодных шихтовых материалов и последующим их прогревом до момента последующего опускания большого конуса. На траекторию изменения температуры оказывает влияние дополнительная периодичность попадания гребня шихтовых материалов, образующегося во вращающейся воронке распределителя шихты, в различные секторы колошника.

В связи с этим фиксируемые температуры на диаграммной ленте укладываются в область определённой ширины, которая для условий ровного хода доменной плавки составляет 50÷60 °С.

Критерием устойчивости распределения газового потока по окружности печи может являться температура периферийных газов. Эта температура фиксируется обычно шестью-восемью термопарами, установленными в кладке по окружности печи (см. рис. 57). Термопары устанавливаются заподлицо с огнеупорной кладкой под броневой защитой колошника и заключаются в массивные чехлы, поэтому они имеют значительно большую инерционность по сравнению с термопарами, регистрирующими температуру колошникового газа в газоотводах. При нормальных ходах печи температуры периферийных газов укладываются в полосу шириной 100÷150 °С.

Б.6. Информационное отображение нормального хода доменной печи

Расход дутья представляет собой ровную линию с небольшими колебаниями, связанными с накоплением в горне и выпуском жидких продуктов плавки. Периодически на диаграмме появляются «пики» в сторону увеличения расхода в момент перевода воздухонагревателей с «нагрева» на «дутьё», когда идёт заполнение нагретого воздухонагревателя дутьём и уменьшается сопротивление тракта подачи горячего дутья в печь.

Давление горячего дутья (и холодного тоже) на диаграммной ленте имеет вид ровной мало меняющейся линии. Имеются пульсации давления горячего дутья в пределах 0,05 атм (около 5 кПа). В соответствии с расходом дутья, в момент перевода воздухонагревателей из одного режима в другой, на диаграмме давления горячего дутья появляются пики в сторону снижения давления.

Следует отметить, что изменения, происходящие в доменной печи, в меньшей степени отражаются на значении давления холодного дутья по сравнению с давлением горячего дутья.

Общий и частные перепады давления газа представляют собой ровные линии с небольшими периодическими пиками в сторону повышения давления в момент опускания очередной подачи в печь. При этом пикообразное возрастание перепада давления более отчётливо появляется на показании верхнего перепада давления газа и в меньшей мере на нижнем перепаде.

Сущность замера уровня засыпи и отображение движения материалов в печи рассмотрены ранее. Правильность показаний устройств для регистрации уровня шихты в печи периодически тщательно проверяется. Допустимая разница в показаниях уровнемеров обычно не должна превышать 0,25 м. Частота опускания зондов свидетельствует о числе сработанных подач. Меняющаяся частота опускания зондов не всегда является признаком неровного движения материалов в печи.

В процессе накопления расплавов чугуна и шлака и подхода к их уровню воздушных фурм скорость опускания материалов в печь уменьшается, а после выпуска возрастает.

При нормальном ходе доменной плавки на показаниях зондовых диаграмм отсутствуют горизонтальные площадки и вертикальные провалы, свидетельствующие о подвисаниях и осадках шихты.

При ровном ходе доменной плавки показание термопар, установленных в газоотводах печи, регистрирует синусообразное изменение температур, связанных с периодичностью загрузки в печь холодных порций шихтовых материалов и последующим их прогревом, а также работой вращающего распределителя шихты (ВРШ). Ровный ход доменной печи характеризуется тем, что разброс показаний термопар не превышает

50÷60°C, при средней температуре колошникового газа 200÷250°C, как отмечено ранее.

Температура периферийных термопар представляет несколько линий (по числу термопар) шириной разброса не более 100÷150°C. При этом средняя температура периферийных газов при нормальном режиме работы доменной печи составляет 700÷850°C.

Давление колошникового газа при работе системы локального автоматического регулирования представляет собой относительно ровную линию с регулярными и равномерными понижениями, связанными с опусканием шихты в печь и носящими название «нижние пики». При нормальном ходе печи на диаграмме отсутствуют пики в сторону повышения давления, а длина нижних пик практически одинакова.

Распределение содержания CO₂ по диаметру колошника при нормальном режиме доменной плавки имеет специфическую траекторию и мало отличается от «оптимального» распределения. При этом изменение температуры газа по диаметру колошника является как бы зеркальным отражением траектории изменения CO₂ по диаметру (радиусу) колошника доменной печи. Отбор пробы на анализ по радиусу колошника с одновременным замером температуры этого газа осуществляется с помощью специального информационного зонда, периодически вводимого в рабочее пространство печи над или под уровень засыпи на фиксирование расстояния от кладки печи.

Б.7. Нарушение устойчивости газового потока в ДП

Б.7.1. Периферийный газовый поток

Этот вид расстройтва газораспределения в печи характеризуется преимущественным движением газового потока у стен печи, когда газ движется широким потоком в периферийных участках столба шихты. Центральная зона столба шихты слабо омывается газами и становится малопроницаемой.

При таком виде расстройтва наблюдается ухудшение использования тепловой и восстановительной энергии газа, что в конечном итоге приводит к уменьшению производительности печи, увеличению удельного расхода кокса, к устойчивому загромождению горна, к ускоренному разгону огнеупорной кладки печи и частому прогару холодильников шахты.

Причины, вызывающие периферийный газовый поток, могут быть различными:

1. Длительная работа доменной печи на разрыхляющих периферию системах загрузки. Например, увеличенная доля подач «коксом вперёд» (ККРР↓ или КРРК↓).

2. Длительная работа печи на излишне больших подачах. Известно, что большие подачи способствуют загрузке центральной части столба

шихты железорудными материалами, что может привести к закрытию центра столба шихты этими материалами и спровоцировать движение газа в периферийных участках шихты.

3. Загромождение горна доменной печи, затрудняющее движение газового потока в центральной зоне печи, ведет к появлению тотермана или устойчивой зоны непереработанной шихты.

4. Работа печи с малым расходом дутья и связанная с этим малая кинетическая энергия истечения дутья, что сопровождается слабым развитием фурменных очагов.

5. Перегрузка осевой зоны столба шихты мелкими фракциями шихтовых материалов за счет их перемещения из периферийных участков слоя шихты.

В начальный период появления периферийного движения газов давление горячего дутья первоначально уменьшается на $0,1 \div 0,15$ атм ($10 \div 15$ кПа). Однако затем по мере загромождения горна шихтой давление горячего дутья начинает возрастать.

Расход дутья в период появления периферийного движения газа в начальный период расстройтва хода печи самопроизвольно возрастает, а затем по мере потери активности центра работа фурм становится «вялой» с периодическим появлением на фурмах неподготовленных материалов.

Разность температур в отдельных газоотводах (температура колошникового газа) увеличивается до $100 \div 150^\circ\text{C}$ при общем уровне $350 \div 400^\circ\text{C}$ для передельного чугуна.

Термопары, показывающие температуру периферийных газов, фиксируют повышенный нагрев кладки печи – температура возрастает на $100 \div 200^\circ\text{C}$ по отношению к нормальному режиму плавки.

Из-за ухудшения восстановительной работы газового потока содержание CO_2 в колошниковом газе уменьшается, а содержание H_2 и CO возрастают. Содержание CO_2 на периферии уменьшается и становится ниже «оптимального», а у оси печи возрастает и превышает оптимальное значение. Максимальное значение содержания CO_2 на кривой распределения CO_2 по диаметру к радиусу колошника перемещается к центру печи.

Первоначально наблюдается ускоренный сход шихты, что можно наблюдать по шомпольным диаграммам, но затем сход шихты уменьшается за счёт уменьшения производительности печи, ухудшения восстановительных процессов.

При развитии периферийного газового потока температура жидких продуктов плавки понижается.

На диаграмме давления колошникового газа периодически появляются «верхние пики» (мгновения повышения давления), что не свойственно нормальному ходу плавки. Увеличивается длина «нижних пик».

Меры по ликвидации периферийного потока газа бывают различными в зависимости от степени его развития. При относительно свобод-

ном центре может быть вполне достаточным устранение активности периферии путём увеличения рудной нагрузки в эту зону. При загроможденном центре сокращение периферийного хода газов путём загрузки периферии недопустимо. Это приведёт к серьёзному подвисанию шихты в печи. В этом случае (при загроможденном центре) необходимо принять меры для разрыхления центрального столба (зоны) шихты. После загрузки центра необходимо осуществление следующих мероприятий:

- 1) уменьшить массу подачи;
- 2) постепенно подгружать периферию путём изменения системы загрузки или путём понижения уровня засыпи;
- 3) понизить концентрацию O_2 в дутье, сокращая при этом расход природного газа (мазута, пылеугольного топлива);
- 4) понизить давление колошникового газа;
- 5) для поддержания достаточного нагрева печи загрузить несколько «холостых подач». При достижении устойчивой работы центральной зоны печи постепенно восстанавливать параметры технологического режима до исходного уровня.

Б.7.2. Центральный (осевой) поток газа в печи

Это отклонение от нормального газораспределения является результатом длительной работы печи на системах загрузки, излишне загружающих периферию, при работе печи с малыми подачами, а также с пониженным уровнем засыпи.

Изменение основных параметров доменной плавки, характеризующих период от нормального к осевому (центральному) потоку газа, характеризуется следующими явлениями.

Расход горячего дутья уменьшается вследствие возрастания газодинамического сопротивления, а давление горячего и холодного дутья, соответственно, возрастает. Температура колошникового газа понижается, а разброс точек отдельных показаний термопар снижается. При этом полоса показаний термопар приобретает вид узкой ленты. Температура периферийных газов уменьшается до $650 \div 700^\circ C$, а ширина разброса этих температур уменьшается.

На шомпольной диаграмме меняется вид схода подач: датчик уровня засыпи фиксирует замедление и неравномерный во времени сход шихты, неравномерное по глубине срабатывание подач с регистрацией зависаний (простоев) и обрывов шихты.

На кривой изменения CO_2 по диаметру (радиусу) колошника содержание CO_2 на периферии возрастает, а в осевой зоне снижается. Воздушные фурмы работают с неровной, но с интенсивной циркуляцией и с периодическим появлением кусков неподготовленных материалов.

Нагрев чугуна и шлака, как правило, повышенный. Давление колошникового газа же характеризуется постоянством, но возникают часто «верхние пики» большой величины, а «нижние пики» становятся меньше.

Общий и частные перепады возрастают вначале интенсивно, но затем стабилизируются на более высоком значении.

Для устранения чрезмерного движения газового потока в центре печи недопустимо в качестве первоочередной меры использовать приемы для закрытия осевой части шихты железорудным материалом. В этом случае может возникнуть подвисяние шихты. Поэтому последовательность действий технологического персонала по ликвидации осевого хода газа состоит в следующем:

1. Снизить степень подгрузки периферийных участков шахты железорудными материалами путем изменения режима загрузки печи. Это можно сделать, к примеру, увеличением числа подач «коксом вперед» (ККРР↓ или КРРК↓).

2. Уменьшить расход дутья для снижения общего перепада давления газов по высоте столба шихты.

3. Если имеется возможность, то повысить давление газа под колошником печи.

4. При появлении первых признаков разгрузки периферии приступить к подгрузке осевой части столба шихты железорудными материалами.

Б.7.3. Канальный газовый поток

«Канал» – это местный разрыхленный участок в столбе шихтовых материалов, по которому устремляется усиленный поток газов. Этот вид нарушения возникает, как правило, в периферийных участках столба шихты.

При канальном движении газа происходит перенос мелких частиц шихты с периферии (вероятного места канала) в центр печи. Это обстоятельство в конечном итоге приводит к еще более значительному нарушению газопроницаемости центральных участков столба шихты и к частым подвисяниям шихты.

Подвисяния шихты и ее обрывы вызывают похолодание печи. Происходит загромождение горна, наступает массовое горение воздушных фурм, что приводит к частым остановкам доменной печи.

В конечном итоге центральная часть столба шихты становится практически газонепроницаемой и создается так называемый «химический холодильник».

Причины появления канального газового потока разнообразны, но основные из них следующие:

- неровный ход доменной плавки;
- ухудшение качества шихтовых материалов;

- увеличение мелочи (фракции $0\div 5$ мм) в железорудном материале;
- снижение механической прочности кокса;
- несоответствие гранулометрического состава шихты дутьевому режиму плавки;
- длительная работа доменной печи на воздушных фурмах, частично залитых шлаком;
- неравномерное распределение дутья по воздушным фурмам;
- нарушение графика выпусков чугуна и шлака.

Изменение основных параметров доменной плавки при переходе от нормального распределения газового потока к развитию канального газового потока характеризуется средними изменениями параметров доменного процесса.

Возникновение канального хода газов в печи сопровождается изменением давления горячего дутья (и холодного, соответственно). Давление становится непостоянным и резко колеблющимся. Отклонения от среднего значения достигают $0,1\div 0,2$ атм ($10\div 20$ кПа).

Из-за уменьшения газодинамического сопротивления столба шихты при возникновении канального газового потока расход дутья самопроизвольно возрастает.

Показания термопар, регистрирующих температуру колошниково-го газа в газоотводах печи, начинают иметь больший разброс ($100\div 200$ °С и более). Они перестают пересекаться. При этом начинают выделяться, смещаясь в область высоких температур, те точки, которые расположены ближе к «каналу». Нарушается постоянство температур в отдельных точках по периферии печи. Увеличивается разность температур периферийных газов. Траектория температур, измеряемые отдельными термопарами, изменяют свой температурный уровень и, перемещаясь, могут менять свое взаимное расположение. Причем чем ближе к «каналам», тем температура должна быть большей.

Уровень схода материалов, фиксируемый зондами, становится непостоянным и различным по сечению печи. Со стороны расположения «канала» могут появиться провалы зондов, когда они уходят «без меры».

Давление колошниково-го газа становится неровным, появляются «верхние пики», возникающие в моменты опускания подач, а также и независимо от этого, вследствие чего на диаграмме исчезают «нижние пики» практически совсем.

Общее содержание CO_2 в колошниковом газе уменьшается, а CO увеличивается. На диаграмме распределения содержания CO_2 по радиусу (диаметру) колошника появляются минимумы (впадины), если плоскость отбора проб газа проходит вблизи «канала». Воздушные фурмы в окрестностях «канала» работают интенсивно, но холодно. На них периодически появляются куски не подготовленного материала.

Во время выпуска расплавов из печи наблюдаются значительные колебания температуры жидких продуктов плавки.

Меры борьбы с канальным ходом газа предусматривают уменьшение загрузки периферийной части печи железорудными материалами путем изменения системы загрузки. Постепенно следует увеличивать рудную нагрузку в районе канала путем укладки коксовых гребней по всему оставшемуся периметру колошника.

Если принятые меры не приводят к ликвидации канального движения газов, то необходимо осуществить кратковременное глубокое снижение расхода дутья, затем опустить уровень засыпи, догрузить доменную печь коксом до заданного уровня и постепенно раздувать печь с пониженным (против обычного) перепадом давления газа.

Б.8. Перекос поверхности шихты на колошнике доменной печи

При перекосе уровня засыпи в доменной печи наблюдается неравномерная тепловая и восстановительная работа газа по сечению печи, происходит и односторонний разгар огнеупорной кладки.

Перекос уровня шихты является результатом установившегося неравномерного распределения материалов и газового потока по сечению печи. Это может быть вызвано рядом причин:

- неправильной центровкой загрузочного устройства;
- длительной работой печи с неисправной вращающейся воронкой распределителя шихты (ВРШ);
- неравномерным распределением дутья и природного газа по воздушным фурмам;
- заливкой шлаком части воздушных фурм и др.

В этом случае на шомпольных диаграммах фиксируются различные уровни шихты.

Увеличивается разность температур в показаниях термопар, измеряющих температуру периферийных газов. Кривые температур газа в газоотовах перестают перекрещиваться и идут обособленными линиями. Ширина ленты разброса температур колошниковога газа значительно увеличивается.

Кривые изменения содержания CO_2 по радиусу колошника имеют значительные отличия.

При водяном охлаждении шахты в местах интенсивного развития газового потока температура выходящей из холодильников воды повышается.

Обычно меры борьбы с перекосом шихты в печи сводятся к следующему: очистить залитые шлаком воздушные фурмы и установить углы поворота (станции) ВРШ таким образом, чтобы гребни материалов, сформированные на малом и большом конусе, попадали в сторону пониженного уровня шихты.

Если вышеприведенные меры не дают положительного результата, то на выпуске чугуна следует приостановить загрузку печи на 5÷10 мин, затем снизить давление дутья на 0,2÷0,3, догрузить печь до нормального уровня и осуществить медленную раздувку печи.

Б.9. Нарушение теплового состояния доменной плавки

Б.9.1. Признаки и методы борьбы с холодным ходом доменной плавки

Похолодание печи обусловлено уменьшением прихода тепла, связанного факторами, приведенными к дополнительным расходам топлива и тепла или снижением степени использования тепловой энергии.

Таковыми причинами могут быть:

- ухудшение восстановимости железорудного материала;
- увеличение содержания мелочи (фракции 0÷5 мм) в железорудном материале;
- ухудшение качества кокса и увеличение его влажности;
- применение нерациональной загрузки печи, приводящей к периферийному или канальному ходу газового потока;
- длительная работа печи с пониженным уровнем засыпи;
- систематическое попадание воды в печь;
- ошибки при наборе и взвешивании компонентов шихты;
- длительная работа печи с осадками шихты и др.

Основные признаки холодного хода доменной плавки сводятся к следующему состоянию:

1. Давление горячего дутья плавно уменьшается до определенного предела, а затем интенсивно увеличивается из-за снижения нагрева печи, нарушения режима шлакообразования.

2. Расход дутья в соответствии с давлением дутья вначале увеличивается, а затем интенсивно уменьшается вследствие увеличения сопротивления столба шихты (охлажденной) газовому потоку.

3. Первоначально при развитии холодного хода доменной плавки наблюдается снижение нижнего перепада давления газа.

4. Скорость опускания шихты на колошнике (число срабатываемых подач) первоначально увеличивается из-за самопроизвольного роста расхода дутья и из-за увеличения расхода кокса на прямое восстановление оксидов железа вследствие похолодания и возрастания степени прямого восстановления.

Затем на шомпольных диаграммах фиксируется снижение числа сработанных подач, появление подвисаний (подстоев) шихты с последующим ее обрывом.

5. Температура колошникового газа и периферийных газов снижается. Вынос колошниковой пыли вследствие уменьшения температуры газа, снижение его объема и скорости движения тоже уменьшается.

6. На воздушных фурмах периодически появляются неподготовленные шихтовые материалы, состоящие из невосстановленных окислов железа, первичного шлакового расплава и мелких кусков кокса.

7. Нагрев шлака снижается, понижается его основность, шлак меняет свой цвет, становится черным вследствие возрастания содержания монооксида железа FeO в нем. При взятии шлака на «пику» наблюдается образование длинных нитей вследствие увеличения содержания в нем SiO₂.

8. Содержание Si и Mn в чугуне уменьшается, а содержание S возрастает. Увеличивается частота искр над поверхностью зеркала чугуна и уменьшается высота этих искр над поверхностью расплава. При выпуске верхнего шлака наблюдается наличие мелких искр, что указывает на ухудшение процесса разделения металла и шлака вследствие увеличения его вязкости и снижения температуры.

9. При дальнейшем развитии похолодания шихтовые материалы начинают непрерывно подвисать, обрываясь по ходу доменной плавки. В период подвисания очень опасно появление на воздушных фурмах железистого шлака, поскольку увеличивается вероятность заливки фурм шлаком с прогаром сопел и с неизбежными остановками доменной печи. Главной заботой технологического персонала, ведущего доменную плавку, должно быть предотвращение подвисаний всеми доступными средствами, в частности ценой большой временной потери производительности печи.

При первых признаках похолодания необходимо принять следующие меры:

- если имеется возможность повышения температуры горячего дутья, то необходимо ее увеличение до максимального значения;
- уменьшить влажность дутья вплоть до полного прекращения подачи пара;
- уменьшить расход природного газа и технологического кислорода с расчетом выхода значений теоретической температуры горения не выше 2200°C;
- уменьшить рудную нагрузку путем добавки кокса в подачу. Если похолодание развивается дальше, то целесообразно дать кокс в виде «холостых» подач;
- для предотвращения холодных подвисаний запрещается изменение системы загрузки, уровня засыпи и иные приемы регулирования хода доменной плавки «сверху». Запрещается также увеличивать расход известняка.

Б.9.2. Признаки и меры борьбы с горячим ходом доменной плавки

Причины излишнего нагрева печи прямо противоположны похолоданию доменной плавки. Отклонение доменной плавки в сторону разо-

грева менее опасно, чем похолодание. Тем не менее это нарушение нормального режима плавки, которое приводит к уменьшению производительности печи и росту удельного расхода топлива.

Основные признаки разогрева доменной печи, которые вызывают отклонения основных параметров процесса от значений, соответствующих нормальному ходу плавки, определяются наличием следующих изменений текущих параметров доменного процесса.

Основные признаки разогрева доменной печи сводятся к следующему:

1. Постепенно повышаются общий и нижний перепады давления газов, а также давления горячего дутья.

2. Расходы горячего и холодного дутья уменьшаются в соответствии с ростом давления в связи с повышением сопротивления газовому потоку.

3. Сход шихтовых материалов в печи замедляется, и если не принимать мер к снижению перепада давления газа, то появляются обрывы шихты и неустойчивое положение уровня шихты в печи.

4. На диаграмме давления колошниковога газа появляются «верхние пики», что является признаком прорыва газа через слой шихты в моменты ее подвисаний и обрывов.

5. Температура колошниковога газа и периферийных газов увеличивается.

6. Яркость свечения фурм возрастает, но интенсивность циркуляции кусков кокса замедляется.

7. Содержание CO_2 в колошниковом газе возрастает.

8. Возрастает содержание Si и Mn в чугуна и уменьшается содержание S в чугуна.

9. Возрастает температура и основность шлака. Растет температура чугуна на выпуске.

При появлении признаков разогрева печи для устранения этого рекомендуется принимать следующие меры:

1. Если нарушение плавки обнаружено своевременно, то для ликвидации разогрева печи достаточно ограничиться увеличением влажности дутья до установленного верхнего предела. Это является полезным и для предотвращения подвисаний шихты.

2. Если увеличения влажности дутья недостаточно, то для ликвидации разогрева печи рекомендуется временное снижение температуры дутья на 50°C и более с постепенным ее восстановлением по мере исчезновения признаков подвисания.

3. Если установлено, что действие фактора, вызвавшее разогрев печи, имеет длительный характер, то необходимо увеличить рудную нагрузку.

Б.10. Нарушение ровного схода шихты в доменной печи

Б.10.1. Подвисание шихтовых материалов в доменной печи

Подвисанием шихты в доменной печи называют прекращение ее движения (схода) или временную задержку с последующим возобновлением движения.

Подвисяние шихты – одно из самых распространенных видов расстройств доменной плавки, часто имеющих тяжелые последствия (потеря производительности печи и выпуск бракованной продукции). Тяжелые случаи подвисяний могут быть причиной повреждения отдельных конструкций доменной печи.

Подвисяние шихты является следствием:

- нарушения нормального распределения материалов и газов в печи;
- нарушения теплового состояния и шлакового режима плавки вследствие ухудшения качества железорудных материалов и кокса;
- перегрузки периферийной зоны печи рудной оставляющей;
- чрезмерной основности шлака.

Это может быть следствием разогрева или значительного похолодания доменной плавки, загромождения горна, а также канального газового потока.

Подвисянию материалов в печи обычно предшествует неровный ход печи. По своему характеру подвисяния разделяют на «верхние» и «нижние».

Б.10.2. Верхние подвисяния шихты в доменной печи

Эти подвисяния, как правило, связаны с увеличением мелочи в железорудных материалах, а также с ухудшением механической прочности кокса.

Изменение основных параметров плавки при возникновении верхних подвисяний при предыдущем нормальном ходе печи, представленные на диаграммах, характеризуются следующими признаками:

1. Возрастание верхнего и общего перепада давления газа.
2. Резкое возрастание давления горячего дутья на $0,1 \div 0,3$ атм ($10 \div 30$ кПа) против нормального.
3. Резкое замедление или полное прекращение схода шихты после нескольких обрывов.
4. Увеличение содержания диоксида CO_2 углерода в колошниковом газе.
5. Температура колошникового газа в газоотводах первоначально снижается, а затем медленно увеличивается.

6. Температура периферийных газов увеличивается при одновременном уменьшении разброса температур.

7. Воздушные фурмы работают интенсивно и в большинстве случаев равномерно.

Меры по ликвидации верхнего подвисяния шихты заключаются в следующем:

1. Снизить температуру горячего дутья на $50 \div 100^\circ\text{C}$.

2. Уменьшить расход дутья до установления давления горячего дутья на $0,1$ атм (10 кПа) меньше по сравнению с его давлением до момента подвисяния.

3. Если, несмотря на принятые меры, сход шихтовых материалов не возобновляется, то через $10 \div 15$ мин от начала подвисяния сделать искусственную осадку шихты.

4. После восстановления схода шихты в печи следует постепенно восстановить количество дутья, поддерживая общий перепад давления газов на $0,1 \div 0,2$ атм (1020 кПа) ниже рабочего нормального.

Б.10.3. Нижние подвисяния шихты в доменной печи

Нижние подвисяния чаще всего являются следствием нарушения теплового и шлакового режимов, в результате чего происходит ухудшение газопроницаемости зон шлакообразования вследствие потери подвижности шлака, возрастания зоны вязкопластичных масс и образования неблагоприятной формы зоны когезии, т.е. зоны вязкопластичного (размягчения) состояния материала.

Изменения основных параметров доменной плавки, характеризующие переход от нормального хода печи к состоянию нижнего подвисяния шихты доменной печи характеризуются изменением параметров доменного процесса по следующим признакам:

1. Повышается общий или нижний перепад давления газов.

2. Медленно повышается давление горячего дутья в течение $1 \div 1,5$ ч перед подвисянием.

3. Шомпольные диаграммы регистрируют многочисленные простои шихты с последующей осадкой материалов и в конце концов происходит полное прекращение схода материалов в печи.

4. На диаграмме давления колошниковога газа появляются «верхние пики».

5. Кривая температуры колошниковога газа имеет узкий вид зигзагообразной ленты.

6. Воздушные фурмы во время нижних подвисяний работают вяло и неравномерно.

7. Движение шихты прекращается после одного или нескольких обрывов. При этом давление дутья быстро возрастает до величины $0,2 \div 0,3$ атм ($20 \div 30$ кПа) выше нормального.

Ликвидация нижних подвисаний на горячем ходу печи сводится к следующему управляющим воздействиям:

1. Уменьшить расход дутья с таким расчетом, чтобы снизить давление горячего дутья на $0,1 \div 0,2$ атм ($10 \div 20$ кПа) ниже того, которое было до момента подвисания.

2. Увеличить влажность дутья.

3. Изменить систему загрузки для развития периферийного газового потока.

Холодные подвисания являются наиболее тяжелой формой расстройства хода печи. Поэтому необходимо оперативно прилагать все усилия для того, чтобы заблаговременно при появлении первых признаков этого расстройства принимать энергичные меры для предотвращения его.

Ликвидация нижних подвисаний на холодном ходу печи сводится к следующему:

1. При первых же признаках необходимо уменьшить расход дутья таким образом, чтобы снизить давление горячего дутья на $0,1$ атм (10 кПа) по отношению к тому, которое было до момента подвисания. Уменьшение расхода дутья должно быть проведено в максимально короткий срок.

2. Загрузить в доменную печь несколько холостых подач в зависимости от теплового состояния печи.

3. Снизить рудную нагрузку.

4. Если, несмотря на принятые меры, возобновление схода шихты не происходит, то через $15 \div 20$ мин сделать осадку шихты, непрерывно наблюдая за состоянием воздушных фурм, не допуская заливки их шлаком.

5. При упорных подвисаниях шихты загрузить $5-8$ холостых подач, поддерживая сниженный расход дутья.

6. После повышения нагрева печи и появления устойчивого схода шихты постепенно увеличивать расход дутья, поддерживая перепад давления по высоте слоя шихты на $0,1 \div 0,2$ атм ($10 \div 20$ кПа) ниже рабочего значения при нормальном ходе печи.

Б.10.4. Тугой ход доменной печи

Чрезмерное сокращение периферийного потока газа при недостаточной газопроницаемости осевой зоны обычно становится причиной неустойчивой работы ДП, склонной к подвисаниям и простоям.

Подобное нерациональное газораспределение является результатом работы печи при:

- пониженном уровне засыпи;
- применении излишне больших подач;
- нерациональной системой загрузки;
- большом количестве мелочи в шихте.

Изменение основных параметров плавки при переходе печи от нормального хода к тугому ходу печи характеризуется следующими признаками изменения параметров доменного процесса:

1. Давление горячего дутья повышается и становится неустойчивым.
2. Расход горячего дутья, соответственно, уменьшается.
3. Давление колошникового газа становится неустойчивым (появляются колебания) и на диаграмме появляются «верхние пики».
4. Возрастает общий перепад давления, а диапазон колебаний перепада давления увеличивается.
5. Температурные кривые колошникового газа сходятся в узкую ленту, отдельные точки траекторий температуры накладываются друг на друга.
6. Температура периферийных газов понижается.
7. Сход шихты становится неравномерным, имеют место подвисания (подстои) шихты и провалы шомполов.
8. Содержание диоксида углерода CO_2 как на периферии, так и в центре (осевой части) на $2\div 4$ % выше, чем при нормальном ходе печи.
9. Интенсивность циркуляции кусков кокса на воздушных фурмах уменьшается, фурмы работают вяло.

Для восстановления нормального хода печи необходимо переходить на систему загрузки, разгружающего периферию без увеличения нагрузки на осевую зону столба шихты.

Приведенные в приложении сведения являются только предварительными данными для синтеза экспертной системы и основаны на обобщении практического производственного опыта по управлению доменным процессом.

Очевидно, что в каждом конкретном случае существуют свои индивидуальные особенности управления процессом доменной плавки, определяемые специфическими условиями и физико-химическим составом шихтовых материалов. Эти условия обязательно должны быть учтены при формировании управляющих воздействий при функционировании экспертной системы в условиях реального производства.

Учебное издание

Борис Николаевич ПАРСУНКИН
Сергей Михайлович АНДРЕЕВ
Татьяна Геннадьевна СУХОНОСОВА

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫПЛАВКИ
ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ**

Учебное пособие

Редактор Н.П. Боярова
Компьютерная верстка А.А. Нерода

Подписано в печать 19.02.2018. Рег. № 17-18. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.
Плоская печать. Усл. печ. л. 13,50. Тираж 50 экз. Заказ 66.



Издательский центр ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»