

**И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, С.И.Семыкин, Е.А.Белошапка,  
Т.С.Голуб, С.А.Дудченко**

## **ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ**

Представлен анализ исследований по изучению электрических явлений в нижней части доменной печи. Показано, что изменение электродвижущей силы (ЭДС) в доменной печи используется для контроля процессов в нижней части доменной печи в качестве показателя уровня жидких продуктов плавки. Однако, известные способы регулирования теплового состояния горна доменной печи, основанные на информации об ЭДС, пока еще не нашли широкого применения в промышленных условиях.

**доменная печь, электродвижущая сила, жидкие продукты плавки, тепло-  
вое состояние горна**

**Современное состояние вопроса.** Известные из литературных источников результаты исследований по изучению электрических явлений в нижней части доменной печи свидетельствуют о том, что в нижней части доменной печи образуются зоны, являющиеся источниками электродвижущей силы. В 1927 г. В.Руфф в работе «Электричество в доменной печи» показал, что между землей и кожухом доменной печи наблюдается падение напряжения, достигающее 0,9 В [1]. В.Руфф допустил, что источником тока являются гальванические элементы, находящиеся в горне доменной печи. При этом электродами в них служат расплавленный чугун и кокс, а электролитом – жидкий шлак. Электродвижущая сила такого элемента обусловлена реакцией прямого восстановления. Автором работы [1] высказано предположение о том, что гальванические элементы образуются не только в горне доменной печи, но и на других ее горизонтах. Они возникают и в местах контакта руды и кокса с флюсами, или шлаком, причем электродвижущая сила может вызываться не только реакцией прямого, но и косвенного восстановления.

Теоретические основы возникновения термоэлектрических токов в анизотропных средах и используемая для их исследования магнитометрическая методика описываются в работах [2,3]. В работе [2] показано, что в анизотропной среде при наличии неоднородного температурного поля должны существовать замкнутые термоэлектрические токи. Плотность этих вихревых токов может служить мерой анизотропии коэффициента термоэдс (ТЭДС). В работе [3] приведены результаты исследования этого эффекта на конкретном веществе с целью выяснения возможности использования его в качестве индикатора анизотропии ТЭДС.

Это направление физики термоэлектричества получило дальнейшее теоретическое и практическое развитие. Рабочее пространство горна, заплечиков доменной печи заполнено коксовой насадкой, орошаемой

железоуглеродистым расплавом. В этом объеме существуют градиенты температур как по высоте, так и по радиусу различных сечений. Наиболее характерным изменением температур является их цикличность, связанная с наполнением горна жидкими продуктами плавки и выпуском чугуна и шлака.

**Методика исследования.** Многие исследователи используют показатель изменения ЭДС в нижней части доменной печи для контроля доменного процесса, как показатель уровня жидких продуктов плавки [4–11]. Как показано в [4], уменьшение температур ниже фурменного очага при открытии выпуска связано, в первую очередь, с механическим перемещением кокса из зоны регенерации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , расположенной в передней стенке фурменного очага. Кроме того, вследствие отдува энергией дутья от воздушных фурм расплава, процессы вторичного восстановления окиси железа, наиболее интенсивно протекают на расстоянии 0,8–1,0 м от стен печи, что соответствует минимуму температур на этом горизонте. Из сказанного следует, что возникновение тока в доменной печи происходит прежде всего за счет термоэлектричества, поэтому величина напряженности магнитного поля оценивалась по ее взаимосвязи с тепловым состоянием печи [5]. Из приведенных в работе [4] результатов исследований следует, что изменение внутреннего сопротивления рабочего пространства не является причиной циклической колеблемости электрического тока в доменной печи. По мнению автора, термин «уровень продуктов плавки в горне» неприемлем и его ошибочность показана замерами внутреннего сопротивления по ходу плавки и отмечена отсутствием надежной корреляционной связи между количеством выпущенного из печи чугуна и шлака и изменением напряженности магнитного поля.

Как замечает Ю.В.Федулов (НЛМК), сделано заключение, что наполнение горна расплавом приводит к уменьшению внутреннего сопротивления [6] и это, прежде всего, отождествляется с количеством чугуна в горне [7]. В работе [8] связывают результирующую разность электропотенциалов с уровнем жидкого шлака. На Челябинском металлургическом комбинате разработано устройство для контроля уровня жидких продуктов плавки в горне [9]. В работе [4] предлагается, для контроля работы доменной печи при помощи измерений ЭДС на кожухе, использовать непосредственно крепежные болты холодильников запечников, так как, по мнению авторов, данный сигнал будет иметь большую величину и меньшие помехи, а также использовать совместно с сигналом изменения ЭДС и сигнал изменения напряженности магнитного поля Нп. Характер его изменения, по мнению автора, идентичен изменению ЭДС, что указывает на токовую природу изменения разности потенциалов. Изменение кривых Нп и ЭДС определяются температурами в газовой полости и зоне регенерации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  фурменного очага, количеством расплава, прошедшего через фурменный очаг, количеством и температурой кокса, вытесненного из зоны регенерации, и характеризуют процессы массо- и

теплообмена в горне и общее тепловое состояние печи. Показание Нп и ЭДС зависят от резких изменений давления горячего дутья, а также от увеличения толщины гарнисажа.

В ходе экспериментов на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) выявлены три типа кривых изменения Нп (напряженность магнитного поля) и ЭДС при обработке жидких продуктов плавки через чугунные летки, характер которых объясняется различными особенностями движения кокса в горне во время выпуска [5]. В первом случае в период выпуска в освобождающийся объем горна организованно вытесняется центральный, наиболее «холодный» кокс. Температура внутренней поверхности футеровки снижается, одновременно происходит уменьшение и Нп, и ЭДС. Увеличение температуры «холодного» кокса и футеровки, сопровождающееся увеличением ЭДС и Нп, происходит вследствие действия расплава, стекающего по поверхности кусков кокса. В случае ухудшения качества кокса и железорудного сырья происходит понижение температуры в центральной зоне доменной печи. В таком случае вытесняется более нагретый кокс из межфурменных зон и уменьшения напряженности поля и ЭДС не происходит. Третий случай – местное накопление жидкости выше рабочего уровня. В этом случае при обработке чугуна и шлака на одной из леток уровень расплава в других зонах печи или не уменьшается, или даже возрастает. Возрастает и напряженность магнитного поля. Анализируя опубликованные результаты исследований, выполненных О.А.Есиным, Ю.В.Федулов заключает, что расплавленные металлургические шлаки – это электролиты, их взаимодействие с жидким металлом сопровождается возникновением электрохимического потенциала на границе раздела металл – шлак. Величина электрохимического потенциала при постоянной температуре определяется составом расплава. Изменение химического состава чугуна, шлака сопровождается различной направленностью потенциалов на границе раздела металл – шлак, поэтому вполне возможно, что результирующая величина ЭДС будет близка к нулю. По мнению автора [5] электрохимические процессы не могут быть источником возникновения электрического тока в доменной печи. Для изучения причин возникновения электрического тока в доменной печи выполнены исследования, в результате которых установлено, что изменение ЭДС происходит за счет термоэлектричества футеровки. Этот вывод согласуется с работами А.Г.Самойловича и А.Л.Коренблита [2,3]. По мнению автора [5] первопричиной возникновения электрического тока в доменной печи следует считать изменение температуры внутренней поверхности футеровки горна и заплечиков. Это изменение определяется процессами тепло – и массообмена кокса и расплава. Отсутствие четкой связи между внутренним сопротивлением состояния горна в предельных режимах минимума и максимума расплава свидетельствует о возможности прохождения тока не только в коксовой насадке, но и по гарнисажу.

Связывать изменения ЭДС только с накоплением чугуна, как это делается на НЛМК [7], по мнению автора, является недостаточно обоснованным.

Способ определения изменения количества жидкой фазы в горне доменной печи, предложенный в [7], заключается в том, что сначала взвешивают чугун, полученный при наполнении-выпуске за период, предшествующий определяемому, регистрируют суммарное изменение падения напряжения за этот период, масштабируют это измерение, измеряют в пределах текущего наполнения-выпуска время, происходящее от исходной до определяемой точки падения напряжения, и по полученным данным вычисляют изменение количества жидких продуктов плавки в пределах текущего наполнения-выпуска. На изменение падения напряжения на кожухе доменной печи оказывает влияние изменение теплового и физико-химического состояния горновой части печи, вызывающее изменение толщины и состава гарнисажа и шлака, однако эти изменения имеют сильные запаздывания и в масштабном коэффициенте не учитываются.

Способ измерения уровня жидких фаз в горне [10], так же, как и [7], использует масштабирование падения ЭДС между горизонтами чугунной и шлаковой леток. Нижний уровень жидких фаз определяют по моменту окончания выпуска чугуна, а верхний уровень – по знаку изменения температуры охлаждающей воды шлаковой фурмы. Для устранения влияния внутренних условий в горне доменной печи на изменение ЭДС, операцию масштабирования и измерения уровня жидких фаз осуществляют за один и тот же период цикла наполнение-выпуск.

В работе [11] приведено описание способа контроля работы металлургического агрегата (в частности доменной печи), при помощи измерения величины падения напряжения на кожухе доменной печи, вызванное протеканием по нему токов от внутренних электрохимических и электрофизических процессов. В описанном способе с целью повышения точности контроля при этом измеряют температуру кожуха доменной печи, и компенсируют падение напряжения на кожухе, на составляющую, обусловленную изменением этой температуры. Характер ЭДС, возникающей на различных горизонтах печи, не одинаков. Ниже воздушных фурм в зоне жидкого расплава ЭДС носит, в основном, электрохимический характер и возникает на границах сред шлак-металл-застойная зона металла ниже чугунной летки. Так, как имеет место периодическое изменение уровня расплава в горне доменной печи, обусловленное периодами выпусков и накоплений жидких продуктов плавки, то и величина падения напряжения на кожухе печи, имеет волнообразный характер. ЭДС возникающая в верхней части печи от зоны воздушных фурм и выше, обусловлена электрохимическими и электрофизическими воздействиями в столбе шихты. Величина падения ЭДС в верхней части доменной печи мало зависит от выпусков металла и определяется интенсивностью реакций и состоянием футеровки печи, т.е. тепловым состоянием верха печи [11]. Для печи объемом  $2000 \text{ м}^3$  сила тока в верхней части печи составляет порядка 200 – 500

А, а в нижней части – 2000 – 3000 А. Величина падения напряжения коррелируется с изменением содержания [Si] в чугуне. В развитие этого способа в статье [11] автором приводятся формулы и выводы, которые при введении соответствующих масштабных коэффициентов, полностью применимы для оценки состояния печи по напряженности магнитного поля.

В работе [11] применили метод снятия ЭДС с двух точек кожуха. Нижняя точка взята на уровне первого ряда холодильников лещади, а верхняя – в районе одной из воздушных фурм. Учитывая, что одна фурма не может характеризовать общее состояние печи, предложено точку отбора установить на кожухе кольцевого воздухопровода горячего дутья. Однако, полученные на практике результаты по определению потенциалов показали, что районом подключения измерительных линий связи к кожуху могут быть только заплечики. Поэтому было сделано заключение [12], что электрическая цепь проходит через гарнисаж, «лапы» холодильников заплечиков, крепежные болты холодильников, кожух печи. Авторы работы [13] предлагают снимать потенциалы с кожуха ниже горизонта фурм, а общий электрод устанавливать в центральной части лещади.

На доменной печи ММК объемом 2014 м<sup>3</sup> по данным 253 выпусков, был проведен корреляционный анализ напряженности магнитного поля или ЭДС в период очередного накопления чугуна и массы выпуска [14]. Этот анализ показал, что связь эта имеется, но она не достаточно надежная (коэффициент корреляции составил 0,32). Поэтому был сделан вывод, что на циклические колебания ЭДС и напряженности магнитного поля в горне доменной печи оказывают влияние не только процессы массообмена, связанные с накоплением и выпуском жидких продуктов плавки, но и другие явления. К ним можно отнести теплообмен между расплавом и коксом, перемещение коксовой насадки и т.п. Наилучшая связь изменения напряженности магнитного поля, по данным [14], наблюдалась с температурой чугуна (коэффициент корреляции 0,68) и с содержанием кремния в чугуне (0,57).

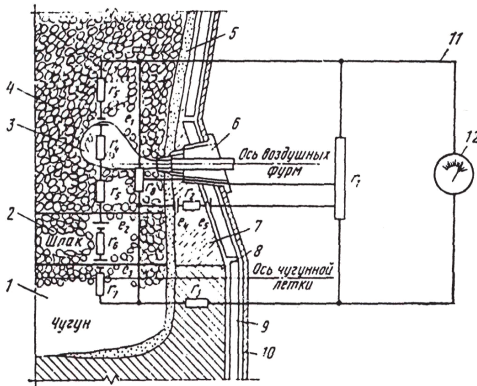
В работе [15] описывается система автоматического контроля уровня расплава в горне доменной печи, основанная на использовании показаний изменения ЭДС на кожухе. В работе показано, что контролировать уровень расплава в горне доменных печей можно используя внутридоменные электрические явления. Под действием ЭДС, возникающей на границе кокс–шлак–металл, по кожуху печи протекают токи, а величина падения напряжения на участке кожуха печи ниже воздушных фурм меняется в соответствии с изменением уровня расплава в горне. При выпуске расплава она понижается и растет по мере его накопления.

Анализируя результаты исследований, приведенные в [7,11], в соответствии с которыми установлено, что термоэлектрические сигналы, регистрируемые на кожухе доменной печи, несут информацию о наполнении горна печи и его тепловом состоянии, которое, в частности, определя-

ется содержанием кремния в чугуне, авторы работы [16] используют следующее объяснение. Источником термохимического сигнала являются процессы, происходящие на границах раздела фаз чугун–шлак, чугун–огнеупор, шлак–углеродистые блоки, кокс–шлак, капли чугуна в шлаке и других. По мнению авторов [16], наиболее существенный вклад в сигнал, возникающий на кожухе печи, вносят границы шлак–углеродистые блоки и чугун–шлак. Потенциал первой группы существенно не меняется, тогда как потенциал границы чугун–шлак связан с изменением состава чугуна. Если потенциалопределяющим является процесс перехода кремния из шлака в металл, то согласно уравнению Нёрнста, концентрация кремния экспоненциально связана с потенциалом границы раздела. При высоких температурах экспоненту можно разложить в ряд и, ограничившись первым членом, получить линейную связь потенциала с концентрацией кремния, что и было обнаружено в исследованиях [11]. В работе [16] выполнен анализ термоэлектрохимических сигналов, получаемых на двух сечениях кожуха горна доменных печей Кузнецкого меткомбината. Установлено, что наибольшую информативность сигналы имеют в том случае, если один из электродов крепится к кожуху в районе лещади (примерно на уровне «мертвого» слоя чугуна), а второй либо на уровне кольцевого воздухопровода, либо на уровне шлаковой летки. В случае подключения верхнего электрода на уровне кольцевого воздухопровода получена четкая корреляция изменений амплитуды термоэлектрического сигнала  $\Delta E$  при наполнении горна с фактической массой чугуна на этом выпуске ( $M_b$ ). Она описывается зависимостью:  $M_b = 39 + 11\Delta E$ , где  $M_b$  измеряется в тоннах, а  $\Delta E$  – в относительных единицах (процентах шкалы диаграммы). Для ровного хода коэффициент корреляции  $r(\Delta E, M_b) = 0,87 \pm 0,08$ . При установлении верхнего электрода на уровне шлаковой летки информативность термоэлектрического сигнала меняется: в нем отсутствует информация, связанная с наполнением горна и выпусками продуктов плавки, и преобладает информация о тепловом состоянии горна доменной печи. Связь уровня термоэлектрохимического сигнала с составом чугуна в первом приближении может быть выражена линейной зависимостью  $E' = 0,9[Si] - 6[S]$ . Коэффициент корреляции расчетной оценки уровня сигнала  $E'$  и значений сглаженной кривой непрерывного замера сигнала  $E$ , соотнесенных к середине выпуска,  $r(E', E) = 0,84 \pm 0,05$ . Таким образом, в работе подтверждена целесообразность дальнейшего развития предложенного способа получения непрерывной информации о ходе доменного процесса, а также предложено эмпирическое уравнение, связывающее уровень термоэлектрохимического сигнала с составом чугуна. В работе [6] приводятся формулы для определения падения напряжения на участке кожуха печи и внутреннего сопротивления коксовой насадки и жидких продуктов плавки.

В работе [17] описывается способ измерения агрегатного состояния шихты в доменной печи с использованием магнитометрических датчиков, которые устанавливались снаружи печи на разных горизонтах. По показаниям этих датчиков авторы судили об изменении температурного градиента в шихте, находящейся в доменной печи.

В работе [8] низ доменной печи рассматривается как эквивалентная схема электрической цепи с сосредоточенными параметрами. Исходя из такого представления, делается вывод, что районами, в которых возникают основные источники электродвижущей силы, являются зоны печи, где протекают окислительно-восстановительные реакции. При стабильности теплового состояния печи и постоянстве параметров комбинированного дутья результирующая разность электропотенциалов на кожухе доменной печи связана прямопропорционально с уровнем жидкого шлака. Авторы работы [8] разработали электрическую измерительную схему и алгоритм для обработки и проведения масштабирования информации о разности электропотенциалов на кожухе доменной печи, позволяющий оценить количество остаточного шлака, его дренажную способность, степень заполнения горна продуктами плавки, а также произвести подбор оптимального режима выпусков продуктов плавки (рисунок). Описание разработанной авторами системы контроля работы горна доменной печи приведено в работе [18].



1 – чугун, 2 – жидкий шлак, 3 – факел фурменного очага горения, 4 – горновой кокс, 5 – гарниссаж, 6 – воздушная фурма, 7 – шамотная кладка, 8 – углеродистые блоки, 9 – плитовые гладкие холодильники, 10 – кожух печи, 11 – провода измерительной цепи, 12 – измерительный прибор

$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8$  – электро-сопротивление кожуха печи, шамотной кладки, углеродистой кладки, факела в фурменной зоне, горнового кокса, слоя жидкого шлака, слоя чугуна, гарниссажа, соответственно

Рисунок. Эквивалентная схема электрической цепи с сосредоточенными параметрами

По мнению авторов [8], источниками электродвижущей силы в нижней части доменной печи являются:

- Реакции окисления стекающих капелек чугуна кислородом дутья. В основном электрохимическое напряжение определяют реакции окисления железа, углерода топлива ( $e_1$ ).

- Протекание реакции прямого восстановления окислов железа при попадании в слой шлака при соприкосновении с горновым коксом, в результате чего ниже окислительной зоны, образуется источник ЭДС ( $e_2$ ).
- При окислении углерода, содержащегося в расплавленном чугуне, в результате чего возникает источник ЭДС ( $e_3$ ).
- Источником ЭДС являются термоэлектродвижущие силы футеровки горна печи ( $e_4$ ), а также термоэлектродвижущие силы в местах контакта материала футеровки с металлоконструкциями ( $e_5$ ).

В работе [19] описывается установка для экспресс-контроля состава передельного чугуна после выпуска, на основе использования термоэлектродвижущей силы (ТЭДС). Метод основан на измерении ТЭДС проб чугуна, отобранных из сливного канала при выпуске чугуна из печи, путем контактирования проб с электродами. По полученным значениям ТЭДС определяют массовые доли [Si], [Mn] и [C] отсчетом по шкале прибора. Число измерений должно быть не менее 3. Если полученные данные значительно отличаются, то выполняют до 5–7 измерений. Результаты измерений считаются удовлетворительными, если разброс показаний прибора находится в пределах двух делений, что соответствует разбегу в определении массовых долей: кремния  $\pm 0,015\%$ , марганца  $\pm 0,010\%$ , углерода  $\pm 0,20\%$ . Точность метода контроля состава чугуна определяется расчетом среднеквадратических расхождений термоэлектрического и химического методов.

Другим направлением использования ЭДС является разработка на их основе способов регулирования теплового состояния горна доменной печи. Изменение ЭДС, измеренной на кожухе доменной печи, используется в способе регулирования теплового состояния горна доменной печи [20] для изменения расхода природного газа на фурмах (при неизменном его общем расходе) с целью выравнивания тепловой неравномерности работы горна, что позволяет повысить производительность доменной печи и снизить расход кокса. Для этого измеряют ЭДС на кожухе горна в районе каждой фурмы и изменяют прямо пропорционально расход природного газа на 5–40% от среднего расхода при отличии ЭДС на 0,01–0,15 мВ относительно ее значения в предыдущем выпуске.

Установленные взаимосвязи между массо- и теплообменными процессами в горне и током явились основанием разработки способа перераспределения природного газа таким образом, чтобы к концу периода наполнения горна жидкими продуктами плавки иметь минимум расхода ПГ [21]. Анализ литературных источников свидетельствует об отсутствии применения в промышленных условиях способов регулирования теплового состояния горна доменной печи, основанных на информации об ЭДС.

Внимания заслуживают исследования электронноионных явлений при горении кокса в доменной печи. В монографии Б.С.Филалова и В.Т.Плицына [22] показано, что при горении кокса в доменной печи наблюдаются электронноионные явления в пламени, зависящие от интен-



сивности процесса горения. Известно, что любая химическая реакция, в том числе и горение, есть не что иное, как процесс обмена электронами, движущимися по внешним орбитам атомов реагирующих веществ. Первым исследователем, который в 1802 г. установил, что пламя проводит электрический ток, был Эрман [22]. В настоящее время общепризнанной является гипотеза Хабера [22] о том, что в зоне реакции горения имеет место хеминонизация, когда сама химическая реакция является источником заряженных частиц. Тем более сложный характер имеет ионообразование в присутствии сажистых частиц. Исследованиями М.А.Глинкова, Е.М.Степанова, Б.Г.Дьячкова [23,24] показано, что значения проводимости характеризуют кривую выгорания топлива и интенсивность тепловыделения по его длине. То есть характер проводимости тока в зоне реакции и в продуктах сгорания отображает изменение во времени скорости горения, температуры газов, чем создаются предпосылки для получения путем его измерения информации о ходе процессов горения.

Значительные перспективы в разработке способа определения проводимости открыло явление «электрического шума» пламени, впервые исследованное Марсденом [22]. Явление это состоит в том, что при помещении в пламя двойного зонда без источника внешней э.д.с. на нагрузочном сопротивлении, включенном между его электродами, возникает переменное напряжение, отражающее нестационарность параметров ионизированного в ходе горения газа. Зависимость «электрического шума» от интенсивности горения может быть использована для получения информации о динамике процесса горения. Исследования электронно-ионных явлений при горении кокса были выполнены на доменных печах Карагандинского металлургического завода [25,26] и подтвердили преимущественное влияние режима сжигания топлива на развитие электронно-ионных явлений при горении. Разработанные способы и устройства, выполненные в виде зондов, позволили осуществить безинерционный контроль и исследование процессов горения [22].

Известно, что от интенсивности горения кокса на горизонте воздушных фурм зависит скорость опускания шихтовых материалов в рабочем объеме доменной печи. В результате горения углерода кокса у воздушных фурм усиленное движение газов наблюдается над очагами горения у фурм. Движение кусков кокса у фурм доменной печи носит характер циркуляции в потоке дутья и продуктов горения, когда опускающиеся сверху куски подхватываются этим потоком и вначале уносятся в глубь горна, затем поднимаются вверх или отводятся в стороны и возвращаются обратно к фурме. Выходящая из фурмы струя дутья образует в слое кокса канал, в который и начинается обрушение порций кусков кокса. В объеме, ограниченном снизу этим каналом, а сверху и с боков – поверхностью динамически неустойчивого свода, происходит циркуляция. Образование зоны циркуляции приводит к разрыхлению слоя кокса перед фурмой, что способствует снижению перепада давления на фурмах доменной печи.

Одним из показателей устойчивости процесса и ровности хода печи является стабилизация размеров зоны циркуляции с чередующимися условиями циркуляционного и слоевого режимов горения кокса. Частота поступления кокса в очаги горения у фурм влияет на интенсивность процесса горения, а также процессы восстановления и теплообмена в доменной печи.

С увеличением расхода дутья, поступающего в печь, увеличивается протяженность очагов горения и возрастает давление газов в горне, в результате большее количество газа проникает к срединным и осевым участкам горна печи и, следовательно, улучшается распределение газов по ее сечению. Однако интенсификация процесса распределения газов по сечению печи за счет увеличения расхода дутья сопровождается увеличением расхода кокса, требуемого для полного расходования кислорода в дутье. Кроме того, увеличение расхода дутья само по себе не может быть средством расширения зоны циркуляции. Кроме того, в случаях подвисяний и «осадок» шихты газопроницаемость кокса в фурменной зоне значительно понижается, что является одной из причин снижения расхода дутья.

**Заключение.** Наиболее вероятной причиной высокой проводимости газов в зоне циркуляции являются создающиеся здесь периодически условия повышенной интенсивности горения. Большую роль в увеличении проводимости газов в зоне горения у фурм доменной печи играет термоэмиссия электронов с поверхности кусков кокса, а также с поверхности частиц сажи. Фактором, ускоряющим процесс горения, является облегчение доступа окислителя к углероду кокса и эвакуация продуктов горения из области реакции, улучшение условий теплообмена, при удалении с поверхности горящего куска зольной корочки. Непрерывное удаление корочки с помощью внешних воздействий позволяет в 4–5 раз ускорить сгорание куска по сравнению с условиями естественного ее отпадания. При этом теплопередача от куска кокса к газам возрастает в 6–7 раз. В связи с этим большое значение приобретает очищение поверхности фурменного кокса. Наиболее вероятным механизмом удаления зольных корочек с поверхности кусков кокса является повторное участие их в сводообразовании. Вероятность возникновения значительных по амплитуде импульсов тока проводимости и «электрического шума» должны быть тем выше, чем большая масса кокса принимает многократное участие в сводообразовании. К сожалению, исследования электронноионных явлений при горении кокса в доменной печи не получили дальнейшего развития, хотя регистрация их содержит важную информацию о ходе печи.

Таким образом, приведенные в литературных источниках данные свидетельствуют о том, что измерение ЭДС на кожухе доменной печи используется для контроля процессов в нижней части доменной печи в качестве показателя уровня жидких продуктов плавки, а также для разработки способов регулирования теплового состояния горна доменной печи.

Однако, известные способы регулирования теплового состояния горна доменной печи, основанные на информации об ЭДС, не нашли широкого применения в промышленных условиях.

1. *Есин О.А.* К электрохимии прямого и косвенного восстановления / Форсирование доменной плавки. Труды научной конференции по теоретическим вопросам металлургии чугуна. – М., 1963. – С.25–30.
2. *Самойлович А.Г., Коренблит Л. Л.* Вихревые термоэлектрические токи в анизотропной среде. // Физика твердого тела. – 1961. – №7. – С.2054–2059.
3. *Коренблит Л.Л.* Исследование замкнутых термоэлектрических токов в анизотропных кристаллах. // Физика твердого тела, 1964. №10. – С. 3059–3064.
4. *Федулов Ю.В.* Использование электрического тока доменной печи для контроля доменной плавки. // **Сталь. 1987 3 – С. 17–21.**
5. *Федулов Ю.В.* К вопросу возникновения электрического тока в доменной печи // Производство чугуна. Сб.МГМИ УПИ. – Свердловск, 1980. – С.84–96.
6. *Радилов С.В.* Электрический ток в доменной печи и его использование для контроля доменного процесса. // Сталь. – 1985. – №3. – С.9–11.
7. *А. С. 601310 (СССР)* Способ определения изменения количества жидкой фазы в горне руднотермической печи / С.В.Радилов, В.И.Козодеров, Ф.И.Заболотин и др. // Бюллетень. – 1978. – №13. – С.84.
8. *Дорофеев В.Н., Новохатский А.М.* О возникновении разности электропотенциалов на кожухе доменной печи. // Известия ВУЗов Черная металлургия. – 1984. – №1. – С.24–28.
9. *А.С. 956566 (СССР)* Устройство для контроля жидких продуктов в горне доменной печи. / Э.Ф.Драчук, И.И.Клугерман, В.П.Першин и др. // Бюллетень. – 1982. – №33. – С.116.
10. *А. С. 998513 (СССР)* от 09.02.81. Способ измерения жидких фаз в горне шахтной печи. / А.М.Новохатский, В.Н.Дорофеев, И.М.Борисов, Д.А.Янкевич и др. // Опубликовано 23.02.83 Бюллетень №7.
11. *Радилов С.В., Заболотин Ф.И.* А.С. 508525 (СССР) Способ контроля работы металлургического агрегата. // Бюллетень. – 1976. – №12. – С.65.
12. *Федулов Ю.В., Михеев М.А.* А. С. 1183542 (СССР) Устройство контроля хода процессов в заплечиках-горне доменной печи. // Бюллетень. – 1985. – №37. – С.109.
13. *А. С. 850671 (СССР)* Устройство для контроля работы доменной печи. / Б.П.Ельцов, Н.И. Валов, С.В.Коршиков и др. // Открытые изобретения, 1981. №28. – С.99.
14. *Федулов Ю.В.* К вопросу изменения напряженности магнитного поля в горне доменной печи. // Металлург. – 1982. – №8. – С.12–14.
15. *Семенко А.Я., Штанько Н.И., Дышлевич И.И.* Система автоматического контроля уровня расплава в горне доменной печи. // Сталь. – 1984. – №5. – С.12–14.
16. *Дубовик В.Я., Плышевский А.А., Валов Н.И.* Об автоматическом контроле состояния горна доменной печи / Известия ВУЗов Черная металлургия. – 1982. – №4. – С.4–6.

17. А. С. 501066 (СССР) Способ измерения агрегатного состояния шихты в доменной печи. / Ю.В.Федулов, С.А.Еременко, Г.Е.Овчинников и др. // Открытые изобретения. – 1976. – №4. – С.67.
18. Новохатский А.М., Дорофеев В.Н., Михайлюк Г.Д. Система контроля работы горна доменной печи. // Теория и практика производства чугуна. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГТМК “Криворожсталь”, 2004. – С.534–537.
19. Экспресс-контроль состава передельного чугуна при выпуске из печи. / Р.И.Гиниятуллин, Б.Н.Парсункин, И.Н.Гиниятуллин и др. // Сталь. – 2005. – №7. – С.21–23.
20. А. С. 1068486 (СССР) от 02.10.81. Способ регулирования теплового состояния горна доменной печи. / В.Н.Дорофеев, А.М.Новохатский, В.Т.Лобачев и др. // Опубликовано 23.01.84. Бюлл. №3.
21. А. С. 1121292 (СССР) Способ регулирования хода доменной печи. / Ю.В.Федулов, Ю.Н.Овчинников, Б.И.Китаев и др. // Бюллетень. – 1984. – №40. – С.68–69.
22. Фиалков Б.С., Плицын В.Т. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. – М: Metallurgia, 1971. – 288 с.
23. Глинков М.А., Степанов Е.М. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – №9. – С.143.
24. Глинков М.А., Дьячков Б.Г. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1962. – №11. – С.181.
25. Плицын В.Т. и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1966. – №10. – С.22.
26. Плицын В.Т. и др. // Физика горения и взрыва. – 1968. – №1. – С.84.

*Статья рекомендована к печати  
академиком НАН Украины Большаковым В.И.*

***І.Г.Муравйова, Ю.С.Семенов, С.І.Семікін, О.А.Бєлошапка, Т.С.Голуб,  
С.А.Дудченко***

**Огляд досліджень утворення у доменній печі електрорушійної сили**

У роботі представлено аналіз досліджень щодо вивчення електричних явищ у нижній частині доменної печі. Показано, що зміна електрорушійної сили (ЕРС) у доменній печі широко використовується для контролю процесів у нижній частині доменної печі в якості показника рівня рідких продуктів плавки. Відомі способи регулювання теплового стану горна доменної печі, що базуються на інформації про зміну ЕРС, поки що не знайшли застосування на практиці.