

ХАРАКТЕР ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФОСФОРА И КАРБИДА КАЛЬЦИЯ

На примере фосфорных и карбидных печей рассмотрен характер изменения и природа существования постоянной составляющей $U_{п.с}$ в фазном напряжении рудно-термической печи с закрытым колошником. Величина и направление $U_{п.с}$ зависят от соотношения процессов химического взаимодействия электрода с компонентами реакционной зоны и степени развития и условия горения электрической дуги.

On example of phosphoric and carbide furnaces is considered character of change and the nature of existence a constant component (U_{cc}) in a phase voltage of ore-smelting furnaces with closed furnace throat. The size and direction U_{cc} depends on a ratio of electrode processes chemical interaction with reactionary zone components and a degree of development and a condition of burning electric arch.

В отличие от сталеплавильных печей и печей для получения нормального электрокорунда, величина постоянной составляющей $U_{п.с}$ в фазном напряжении которых достигает 15–20 В, в рудно-термических печах для получения фосфора и карбида кальция значение $U_{п.с}$ не превышает 1–1,5 В и колеблется обычно в пределах 200–500 мВ. Направление тока в измерительной цепи может меняться, при этом в фосфорной печи ток большей частью имеет направление от электрода к «земле», т.е. «плюс» находится на электроде.

На фосфорной печи мощностью 10,5 МВ·А с ручным управлением перемещением электродов и периодическим выпуском шлака $U_{п.с}$, имея наибольшее значение сразу после закрытия летки 300 мВ («плюс» на электроде), постепенно по мере накопления шлака – уменьшается до нуля (рис.1) и вновь увеличивается, но с обратным знаком («минус» на электроде). После открытия шлаковой летки в процессе выпуска шлака значение $U_{п.с}$, уменьшаясь до нуля, затем увеличивается, достигая максимальной величины к моменту ее закрытия, имея вновь направление от электрода к «земле».

На печах РКЗ-80Ф с практически непрерывным выпуском шлака такого не наблюдается. Здесь $U_{п.с}$ всегда имеет направление от элек-

трода к «земле», лишь иногда, при пуске печи после продолжительного простоя, 5–10 мин на электроде «минус»*. При переключении ступеней печного трансформатора с повышением напряжения $U_{п.с}$ растет.

Выпуск феррофосфора в фосфорных и карбидных печах, как и в печах для получения нормального электрокорунда не отражается на величине $U_{п.с}$. Так как электрическое сопротивление ферросплава на несколько порядков меньше сопротивления остальных материалов, находящихся в ванне рудно-термической печи, которыми и определяется электрические параметры ее работы.

Своеобразно поведение $U_{п.с}$ в случае, когда работа фосфорной и карбидной печей сопровождается обрушениями шихты. Перед обрушением значение $U_{п.с}$ постепенно растет, а после обрушения, определяемого по шуму в загрузочных точках и резкому падению тока в каком-либо электроде, падает (рис.2). Через 5–10 мин, в зависимости от того, насколько сильным было обрушение, $U_{п.с}$ при-

* Педро А.А. Использование постоянной составляющей фазного напряжения в качестве характеристики состояния расплава нормального электрокорунда / А.А.Педро, Н.Л.Степанова // Исследование электротермических установок. Чебоксарский технический ун-т. 1986.

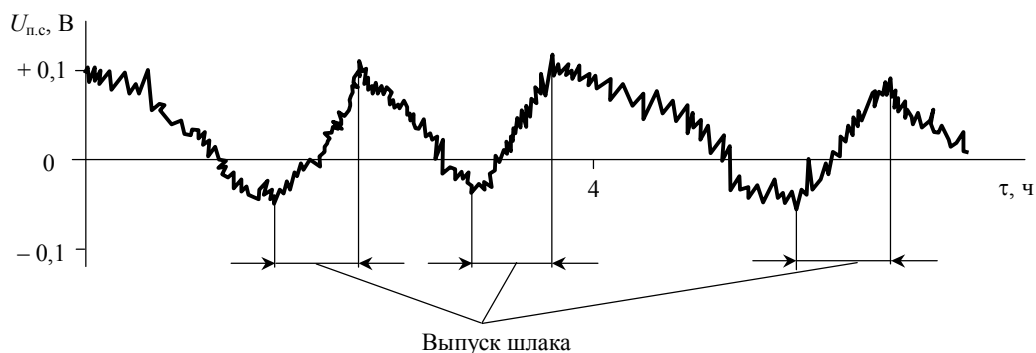


Рис.1. Изменение $U_{п.с}$ фазного напряжения на печи РКЗ-10,5 для получения фосфора

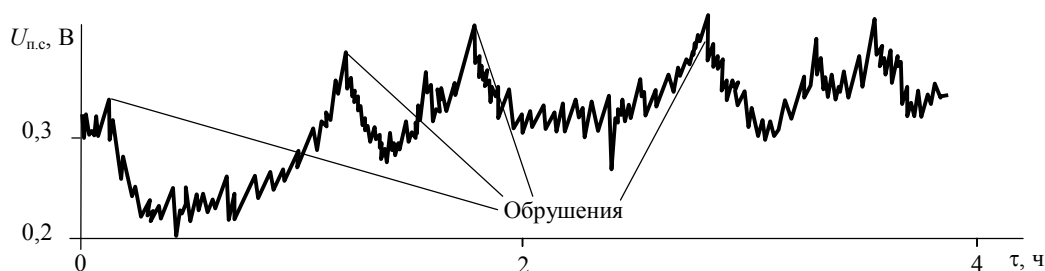


Рис.2. Изменение $U_{п.с}$ фосфорной печи при обрушениях шихты

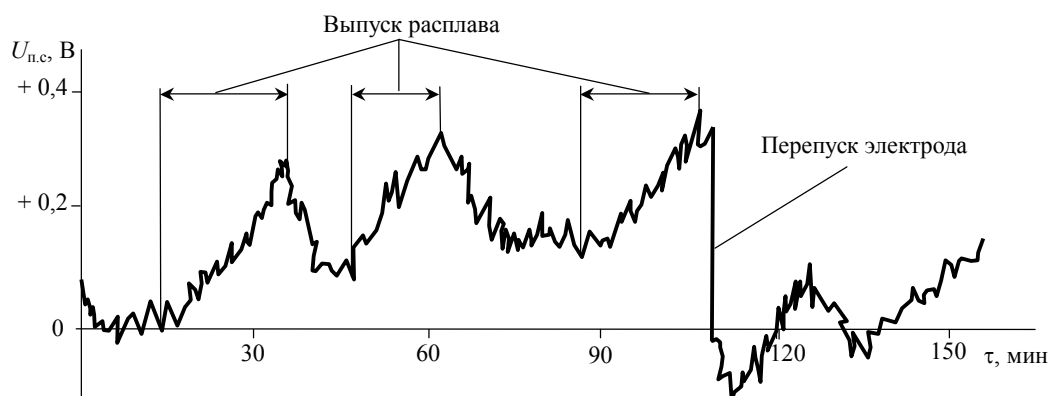


Рис.3. Изменение $U_{п.с}$ карбидной печи

нимает прежнее значение, характерное для данных условий ведения процесса.

Если обрушения происходят часто, то запись изменения $U_{п.с}$ на диаграммной ленте имеет волнообразный вид.

Особенностью работы карбидных печей является то, что по ряду причин механизм перемещения электродов на них не работает и возможен только перепуск электродов. По-

этому регулирование мощности возможно только переключением ступеней печного трансформатора. На печи мощностью 60 МВ·А Карагандинского завода синтетического каучука $U_{п.с}$ практически всегда имеет направление от электрода к «земле», лишь после перепуска электродов получает обратное направление (рис.3). При выпуске расплава карбида значение $U_{п.с}$ растет, при закрытой

карбидной летке – падает. Последнее наблюдается и при перепуске электродов.

На аналогичной печи Усольского ПО «Химпром» $U_{п.с}$ в течение всего технологического процесса имеет обратное направление, т.е. на электроде – «минус». При закрытой летке $U_{п.с}$ растет, при выпуске карбида – падает. В этом случае ее изменения аналогичны изменению тока в электродах: с увеличением силы тока значение $U_{п.с}$ увеличивается, с уменьшением силы тока – падает.

Регулярный характер изменения $U_{п.с}$ в рудно-термических печах для получения фосфора и карбида кальция говорит о том, что эти изменения не случайны. Действительно, наличие постоянной составляющей фазного напряжения в печи с закрытым колошником возможно, если в электрической цепи имеется элемент, обладающий полупроводниковым (вентильным) эффектом, т.е. элемент, сопротивление которого в полупериоды различно. Таким элементом могут быть контакты твердых кусковых материалов, контакт электрода с расплавом, находящимся в реакционной зоне, и электрическая дуга переменного тока. Контакты твердых кусковых материалов являются в основном причиной появления так называемого «токового шума», т.е. наличия в спектре тока и напряжения составляющих самых разных частот с минимальными амплитудами.

Более существенной причиной наличия постоянной составляющей $U_{п.с}$ может быть химическое взаимодействие электрода с компонентами реакционной зоны и, прежде всего, с расплавом. Электродвижущая сила, вызванная этим взаимодействием, определяется изменением изобарного потенциала реакций, в которых участвует углерод электрода. Так как $RT = nK$ (здесь R – газовая постоянная; T – температура на поверхности электрода в месте контакта с расплавом; K – константа равновесия), то значение ЭДС будет зависеть от температуры на поверхности электрода и активности компонентов реакционной зоны. Та ЭДС будет направлена от расплава к электроду, т.е. на последнем будет «минус». Это объясняется тем, что электропроводность силикатных шлаков, какими большей частью являются расплавы рудно-термических печей, носит ионный характер.

Поэтому, например, в фосфорной печи в полупериод, когда на электроде находится «плюс», имеет место химическое взаимодействие его со следующими ионами: $(SiO_3)^{2-}$, $(Si_2O_5)^{2-}$, $(Si_2O_7)^{6-}$, $(PO_4)^{4-}$, $(PO_3)^{3-}$, $(PO_4)^{3-}$, $(P_2O_7)^{4-}$, $(Al_2O_5)^{4-}$, $(AlO_3)^{3-}$, $(AlO_2)^-$, $(FeO_2)^-$, $(Fe_2O_5)^{4-}$, $(FeO_3)^{3-}$, $(FeO_4)^{5-}$.

Другой причиной наличия постоянной составляющей в фазном напряжении может быть электрическая дуга переменного тока. В фосфорной и карбидной печах дуга горит между однородными материалами: углеродистым электродом и коксом. Тепловые условия, в которых находятся катодные пятна, в данном случае практически одинаковы, так как дуга горит под закрытым колошником. Однако вследствие большей устойчивости катодного пятна на неподвижном электроде по сравнению с перемещающимся пятном на плавающем коксе температура его, когда он находится на электроде, выше, чем в полупериод, когда катодом является кокс. Следствием этого и будет появление постоянной составляющей в фазном напряжении с направлением от электрода к «земле», т.е. «плюс» будет находиться на электроде*.

Величина постоянной составляющей, обусловленной вентильным эффектом дуги переменного тока, зависит от степени развития и условий горения дуги и определяется ее длиной и разницей градиентов падения напряжения в столбе дуги в соседних полупериодах.

Таким образом, в зависимости от степени развития дуги и процессов химического взаимодействия электрода с компонентами реакционной зоны определяется и направление суммарной постоянной составляющей фазного напряжения в печи с закрытым колошником. Поскольку на больших фосфорных печах, а также на карбидных печах Карагандинского завода СК $U_{п.с}$ почти всегда имеет направление от электрода к «земле» можно утверждать, что ЭДС, обусловленная вентильным эффектом дуги, превосходит ЭДС,

* Педро А.А. О природе постоянной составляющей напряжения электрической дуги в печи для получения нормального электрокорунда // Промышленная энергетика. 1993. № 5.

вызванную химическим взаимодействием электрода с компонентами реакционной зоны. Именно поэтому изменения $U_{п.с}$ в данном случае находятся как бы в противофазе с изменениями силы тока: при увеличении последней $U_{п.с}$ уменьшается, а при уменьшении силы тока, наоборот, растет. Это вызвано тем, что уменьшение тока в результате подъема электрода сопровождается увеличением длины дуги и соответствующим ростом величины $U_{п.с}$. С ростом силы тока при заглоблении электрода длина дуги и величина $U_{п.с}$ уменьшаются.

Если ЭДС, вызванная химическим взаимодействием электрода с компонентами реакционной зоны, превосходит ЭДС, обусловленную вентильным эффектом дуги, то изменения $U_{п.с}$, фиксируемой измерительным прибором ЭДС будут синфазны с изменением силы тока в электроде. При направлении $U_{п.с}$ от «земли» к электроду (на электроде «минус») с увеличением силы тока в электроде будет увеличиваться и $U_{п.с}$, а при уменьшении силы тока – уменьшаться. Это и наблюдается на карбидных печах Усольского ПО, что свидетельствует о более глубокой посадке электродов и меньшим развитием электрической дуги по сравнению с печами Карагандинского завода.

Предложенный механизм возникновения и существования $U_{п.с}$ в фазном напряжении рудно-термической печи с закрытым колошником позволяет объяснить отмеченное при пуске после простоя, фосфорной и карбидной печей, направление $U_{п.с}$ от «земли» к электроду тем, что в этот период в виду повышенного в результате охлаждения электросопротивления реакционной зоны электропечи работают при отсутствии дуги. По мере разогрева ванны и уменьшения ее электросопротивления уменьшается площадь контакта электрода с реакционной зоной, увеличивается плотность мощности в этом контакте, что ведет к развитию микродуговых процессов. С их развитием ЭДС, обусловленная вентильным эффектом дуги, точнее ее мощность, начинает превосходить ЭДС, возникающую в результате химических реакций на поверхности электрода, и в итоге $U_{п.с}$ меняет направление: на электроде устанавливается «плюс».

При управлении электрическим режимом, что ток в электроде поддерживается постоянным только путем перемещения электродов, остается практически постоянным и положение электрода относительно уровня расплава. В результате и $U_{п.с}$ колеблется около некоторого значения, пропорционального длине дуги и остающегося практически постоянным. Однако при неподвижных относительно ванны электродах и закрытых летках накапливающийся в печи расплав будет увеличивать поверхность контакта электрода с ним, тем самым уменьшая степень развития дуги и увеличивая роль ЭДС, вызванной химическим взаимодействием электрода с расплавом.

При выпуске шлака или карбида наблюдается обратная картина. В результате уменьшения площади контакта электрода с расплавом увеличивается плотность тока в этом контакте, развивается дуговой процесс и растет $U_{п.с}$, вызванное вентильным эффектом дуги. Отсюда следует, что изменение знака $U_{п.с}$ и ее значения может служить для оценки уровня расплава шлака или карбида в печи при неподвижных электродах.

Изменения $U_{п.с}$, отмеченные при обрушениях шихты, можно объяснить следующим образом. Обрушению шихты предшествует образование полости в подэлектродном пространстве. Именно в этой полости начинает развиваться дуга. С развитием дуги возникает и начинает расти постоянная составляющая фазного напряжения. В момент обрушения относительно холодная, обладающая большим электросопротивлением шихта, проникая вдоль электрода в нижние горизонты печи на какое-то время экранирует электрод – дуга продолжает гореть с торца электрода и сохраняет высокое значение. По мере разогрева обрушившейся шихты последняя плавится, шунтирует дуговой разряд. Однако до этого момента электрод под действием управляющего сигнала перемещается вниз, тем самым способствуя уменьшению длины дуги и снижению $U_{п.с}$.

Если обрушение значительно, то при закрытых шлаковых летках и при большом заглоблении электродов обрушившаяся шихта

может повысить уровень шлака в печи и, существенно снизить дуговой режим. Вероятно этим и объясняется отмечавшееся на печи РКЗ-48Ф изменение направления $U_{п.с}$ на электроде с положительного на отрицательное при обрушениях шихты.

Особенностью измерения постоянной составляющей фазного напряжения в многофазных печах является то, что вследствие ничтожно малого электрического сопротивления короткой сети для постоянного тока все фильтры, выделяющие постоянные составляющие в каждой фазе, оказываются включенными практически параллельно, и поэтому приборы, установленные на выходах фильтров будут показывать одно и то же значение $U_{п.с}$, наибольшее из всех существ-

вующих в данный момент и соответствующее фазе с наиболее развитой дугой. Именно поэтому использование постоянной составляющей фазного напряжения для характеристики протекания технологического процесса наиболее эффективно в однофазных печах или многофазных, но работающих с единым плавильным тиглем. В противном случае необходимы дополнительные данные, позволяющие определить, к какой фазе относится фиксируемая измерительным прибором величина $U_{п.с}$. Такими данными могут быть активное сопротивление подэлектродного пространства, положение электрода относительно уровня расплава, величина тока в электродах, гармонический состав напряжения и тока электродов.