

**С.И.Семыкин, В.Ф.Поляков, Т.С.Голуб, Я.А.Полякова**

## **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПРИ ПЛАВКЕ СТАЛИ**

*Институт черной металлургии НАН Украины им. З.И. Некрасова*

Экспериментально исследованы электрические характеристики конвертерной ванны при ведении плавки без внешних воздействий и в случае наложения на расплав дополнительного низковольтного электрического потенциала. Показано, что в процессе продувки в ванне расплава формируется разность электрических потенциалов, которая достигает наибольших значений между корпусом кислородной фурмы и металлическим расплавом, а наименьших - между электродами, размещенными на уровне шлакового и металлического расплавов. Показана возможность использования дополнительного низковольтного электрического потенциала для улучшения технико-экономических показателей конвертирования.

**Ключевые слова:** конвертерная ванна, электрический потенциал, показатели конвертирования

**Состояние вопроса.** В целом ряде экспериментальных исследований отмечается прохождение электрического тока между продувочной фурмой и жидким расплавом при ведении конвертерной плавки по обычной технологии, т.е. без использования внешних физических, в т.ч. электрических и электромагнитных воздействий. ИЧМ в течение ряда лет выполнялся большой объем исследований по созданию технологии конвертерной плавки с применением электрического тока малой удельной мощности и ее использованию в промышленном производстве. [1-3] Результатом комплексного применения разработанных мероприятий явилось повышение основных ресурсо- и энергосберегающих показателей плавки, а также улучшение экологических условий конвертерного производства, в частности за счет снижения пылевыведения из полости конвертера и практически полного устранения выбросов.

Для обоснования более эффективной возможности использования и выявления природы влияния низковольтного электрического потенциала на характер физико-химических и тепловых процессов при рафинировании железо-углеродистый расплавов в ИЧМ в различные периоды были выполнены экспериментальных исследования по изучению электрических параметров конвертерной ванны, в том числе при ведении плавки без внешнего физического воздействия.

Физическим источником тока в конвертере при обычной технологии плавки является подфурменная зона, где благодаря высокой температуре газовая среда подвергается ионизации, в том числе с формированием электронов. Средством придания электронам направленного движения, что, собственно, и обеспечивает прохождение тока по системе проводников (продувочная фурма, газ, шлак, металл, огнеупорная

футеровка, кожух конвертера), служит однонаправленная энергия дутья, поступающего из фурмы в расплав. Эти особенности обуславливают наличие электрического потенциала между отдельными участками конвертера, в частности, между шлаковой и металлической фазами, что, как известно из теории, может влиять на ход и результативность физико-химических и тепловых процессов в агрегате. Согласно теоретическим представлениям, при дополнительном наложении электрического потенциала за счет подвода тока взаимодействие между фазами должно усиливаться, причем результат по изменению тех или иных показателей процесса зависит от полярности тока. Это связано с особенностью конкретных химических реакций, часть которых происходит с поглощением электронов, а остальных - с их выделением, что согласно принципу Ле-Шателье позволяет влиять на скорость и полноту взаимодействия, вводя или удаляя электроны с помощью подачи тока определенной полярности.

**Цель исследований.** На предварительном этапе были изучены электрические характеристики конвертерной ванны при ведении плавки без внешних воздействий. При этом определялась величина:

- ♦ электрической проводимости участков конвертерной ванны;
- ♦ разности электрических потенциалов.

**Материалы и методика исследования.** Основная часть экспериментов проведена в лабораторных конвертерах емкостью 0,3 и 1,5-т, а ряд замеров выполнен на конвертерах емкостью 60 и 250-т в конвертерных цехах ОАО ДМЗ им. Петровского и ДМК им. Дзержинского.

Электрически изолированный от металлоконструкций корпус кислородной фурмы был включен в цепь контроля электрических параметров. Определение проводимости контролируемых участков производилось посредством записи силы электрического тока, протекающего по ним при подключении внешнего компенсирующего источника тока.

Во время записи разности электрических потенциалов между реагирующими фазами в процессе конвертирования металла компенсационный источник электрического тока отключали, и приборы КСП-4 их напрямую фиксировали значения. Дополнительно в лабораторных условиях проводили регистрацию излучения факела в видимом спектре с помощью селеновой шайбы или фотодиода.

**Результаты исследований.** Результаты обработки полученных значений электрических параметров контролируемых участков показали практически идентичность изменения этих показателей по ходу продувки плавки вне зависимости от садки конвертера при соблюдении сопоставимых режимов ведения процессов. На рис.1 приведена типичная диаграмма изменения силы электрического тока, протекающего на участке «корпус продувочной формы - металлический расплав» при

использовании переменного тока. Диаграмма отражает электрическую проводимость контролируемых участков, поскольку при фиксированных значениях напряжения источника тока величина проводимости участка (согласно закону Ома) прямо пропорциональна развиваемой в нем силе тока.

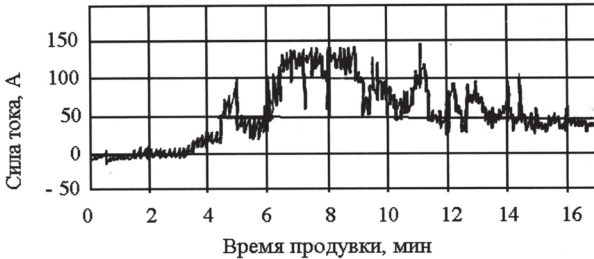


Рис.1. Изменение силы переменного тока по ходу продувки в 0,3-т конвертере на участке «фурма - расплав».

Более широкая информация об электрических свойствах конвертерной ванны на различных ее участках получили при дифференцировании опытов по полярности постоянного тока. На рис.2 приведены типичные для 1,5-т конвертера диаграммы изменения силы электрического тока по ходу продувки при использовании постоянного тока обеих полярностей. Дополнительно на рисунке приведены данные об изменении положения верхней границы ванны по ходу продувки.

Как видно из рис. 2, вид кривых изменения силы электрического тока на каждом из исследованных участков не зависит от варианта полярности тока. Однако, при практически одинаковых заданных напряжениях на фурме значения силы тока были заметно выше при использовании тока положительной полярности. В то же время установлено, что подключение той же положительной полярности к электроду, контактирующему со шлаковым расплавом, вызывало силу тока меньшую по значениям, чем при отрицательной полярности.

Анализ кривых изменения силы тока в электрической цепи «фурма - ванна», показывает также, что на протяжении первых 2-3 минут продувки значения тока в цепи были близки к минимальным. Затем имел место резкий рост силы тока в период до 5-й минуты продувки, что связано с подъемом шлакометаллической эмульсии, заполняющей промежуток между металлом и наконечником формы вследствие развития процесса обезуглероживания ванны. Отмечаемое на рисунке уменьшение значений силы тока в цепи «фурма - ванна» являются отражением операции ввода извести по ходу плавки и связано с уменьшением уровня шлакометаллической эмульсии. Это подтверждается при анализе кривых интегральной светимости факела над горловиной конвертера.

Последующий резкий рост силы тока связан с восстановлением первоначального состояния конвертерной ванны, а дальнейшее медленное возрастание (до 10-ой минуты) - с повышением уровня шлакометаллической эмульсии, в том числе за счет объемного кипения металлического расплава, пик которого приходится, как видно из кривой светимости соответствующим 12-14 минутам продувки. Уменьшение силы тока на заключительной стадии продувки обусловлено снижением уровня ванны в результате замедления процесса обезуглероживания.

Выполненный расчет среднего омического сопротивления на участке «корпус фурмы - ванна» и «донный электрод - ванна» (рис.3) свидетельствует различии в характере поведения и уровня значений электрической проводимости отдельных частей конвертерной ванны, в т.ч. зависимости ее от полярности потенциала на электродах.

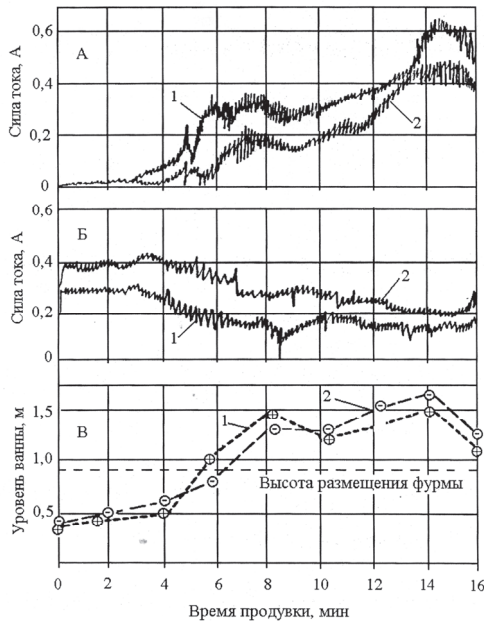


Рис.2. Изменение силы тока положительной (1) и отрицательной (2) полярности на участках: «фурма-расплав» (А), «донный электрод-расплав» (Б) и уровня ванны (В) по ходу продувки плавки в 1,5-т конвертере.

Положительной полярности тока, независимо от места подвода, соответствуют более высокие значения проводимости контролируемых участков, чем отрицательной. Установлено, что в случае применения знакопеременного тока сопротивление между электродами, контактирующими с металлическим и шлаковым расплавом, было большим, чем при использовании постоянного тока при близких

значениях напряжения и составляло 0,04-0,05 Ом. В то время как при отрицательной полярности на шлаковом электроде сопротивление ванны прохождения тока составляло 0,03-0,04 Ом, при положительной - 0,02-0,025 Ом.

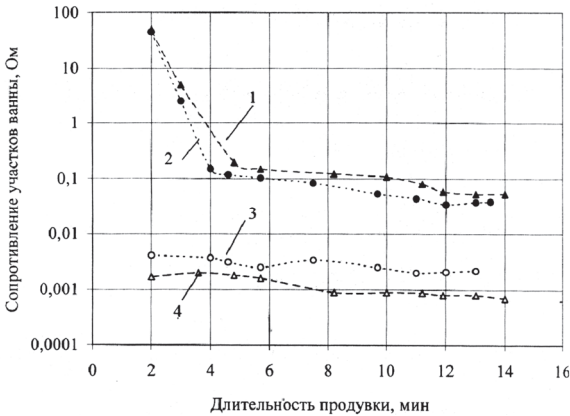


Рис.3. Изменение электрического сопротивления различных участков ванны 1,5-т конвертера при подведении к форме и донному электроду постоянного тока положительной и отрицательной полярности. (кривые 1 и 2 участок «фурма - расплав» соответственно при использовании тока отрицательной и положительной полярности, кривые 3 и 4 тоже участок «расплав - донный электрод»)

Показатели изменения электрических потенциалов ( $\Delta U$ ) на закладных электродах и корпусе для 300 кг конвертера приведены на рис. 4. Анализ полученных данных показывает, что наибольших значений разности потенциалов в ходе продувки достигает на участке между корпусом кислородной фурмы и металлическим расплавом, а наименьших - между электродами, размещенными на уровне шлакового и металлического расплавов. Электрические сигналы, снимаемые с электродов контактирующих с шлаковым расплавом, имели более постоянные характеристики, которые мало изменялись на протяжении двух третей продувки. В последней четверти продувки на шлаковом электроде формировался потенциал отрицательной полярности по отношению к металлическому расплаву, что сохранялось на протяжении всей продувки. Регистрируемые электрические сигналы, снимаемые с электродов, размещенных в газовой фазе и на корпусе кислородной фурмы, существенно изменялись в ходе продувки, а по характеру поведения повторяли друг друга.

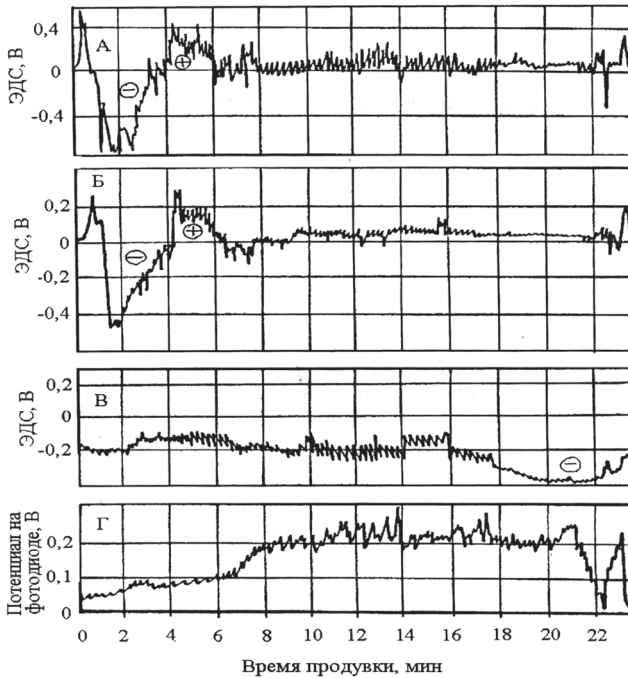


Рис.4. Изменение ЭДС на электродах, расположенных в металлическом расплаве и: на корпусе прогудочной формы (А), в газовой фазе (Б), в шлаковом поясе (В), а также светимость факела (Г) по ходу продувки 0,3-т конвертера

В начале продувки в момент опускания фурмы и вывода ее на рабочий уровень отмечалось реверсирование полярности тока с положительных значений на отрицательные. Указанный эффект имел место на всех исследованных конвертерах (0,3-т; 1,5-т; 250-т) и не зависел от материала футеровки конвертера. Наибольшая величина отрицательной разности потенциалов на продувочной фурме формировалась примерно через 1,5-2,0 мин. от начала продувки и по мере выгорания кремния и марганца она постепенно приближалась к нулевым значениям. Изменение полярности на положительную наблюдалось при присадке извести. В период интенсивного выгорания углерода из расплава значения показателей  $\Delta U$  на фурме и на газовом электроде имели минимальные отклонения от нуля, что свидетельствует о погружении наконечника фурмы в эмульсию. В конце продувки после снижения уровня ванны их величина несколько возрастала. Момент подъема фурмы характеризовался реверсом полярности аналогично начальному периоду, но в обратной последовательности. По характеру изменения показателей между корпусом продувочной фурмы и металлом длительность продувки можно разделить примерно на три неравных периода. В первой трети

(после вывода фурмы на рабочий уровень) отмечалось быстрое нарастание отрицательных значений ЭДС до максимальных величин порядка 0,5-0,8 В с последующим снижением этого уровня примерно до 0,05-0,20 В. Этот период по времени совпадал с удалением кремния из металла. Второй период характеризовался малыми величинами и незначительными колебаниями относительно нулевых значений и совпадал с развитием процесса обезуглероживания металла. В третьем периоде продувки величина ЭДС увеличивалась, что, вероятно, связано с повышением содержания окислов железа в шлаке и, как отмечалось выше, осаждением ванны (для 1,5-т конвертера при неизменном положении фурмы на уровне 700 мм и показателях  $\Delta U$  порядка - 200 мВ; - 250 мВ и - 300 мВ отмечено следующее содержание окислов железа в 8,5; 12,5; 18 % соответственно).

При экспериментах на 1,5-т конвертере выявлен характер изменения  $\Delta U$  между наконечником фурмы и контактирующим с металлом закладным электродом при различных постоянных положениях наконечника фурмы относительно металлического расплава (на уровнях 700, 900 мм) и при переменном положении: 900 мм (до 4-ой мин продувки) и 700 мм - до конца продувки. Анализ этих кривых показывает, что начальный уровень положения фурмы заметно влияет на характер зажигания плавки и газовыделения в первой трети длительности продувки плавки. В случае размещения фурмы на уровне 900 мм светимость факела была заметно ниже по сравнению с размещением фурмы на высоте 700 мм. Указанный эффект, вероятно, объясняется снижением степени ассимиляции кислорода дутья конвертерной ванной и как результат увеличением количества выносимой из конвертера пыли при снижении интенсивности процесса обезуглероживания металлического расплава. Замеры  $\Delta U$  на корпусе электрически изолированной кислородной фурмы в заводских условиях проведены на 250-т конвертерах комбината им. Дзержинского. На рис. 5 показаны типичные диаграммы изменения этих показателей при выплавке соответственно низкоуглеродистых и высокоуглеродистых марок стали. На полученных диаграммах появились те же характерные периоды, которые ранее были установлены на лабораторных конвертерах. В частности, опускание фурмы в конвертер сопровождается реверсом полярности с положительной на отрицательную и обратным реверсом полярности при подъеме фурмы в конце продувки. Период интенсивного окисления кремния и наводки шлака, накопления окислов кремния и марганца в шлаке, отмечен значениями показателя отрицательной полярности. В период интенсивного окисления углерода значения близки к нулевым и характеризуют затопление наконечника фурмы в шлако- металлический расплав и, как следствие, соответствующее повышение проводимости среды в промежутке между фурмой и металлической ванной. Приближение наконечника фурмы к металлическому расплаву (глубокое погружение фурмы) отмечается

нулевым значением ЭДС (происходит короткое электрическое замыкание в цепи фурма - металлический расплав).

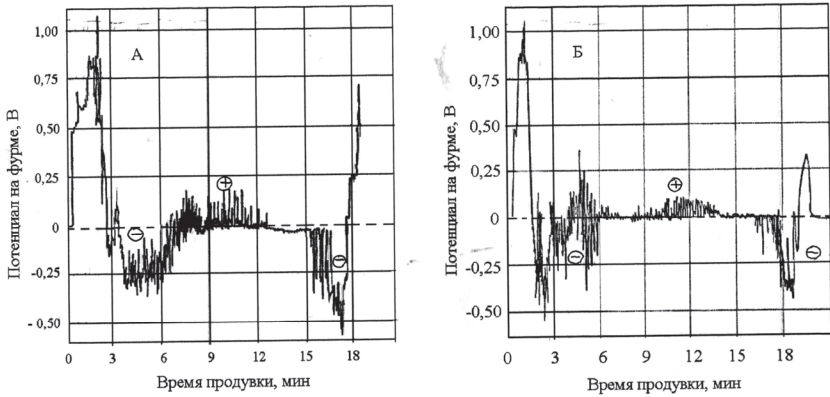


Рис.5. Изменение электрического потенциала на корпусе формы и на донном электроде, контактирующем с металлическим расплавом, при выплавке высокоуглеродистой (А) и низкоуглеродистой (Б) стали в 250-т конвертере

Обработка сигналов ЭДС, полученных на разных конвертерах при опускании фурмы на рабочий уровень, а также при выводе ее из рабочего пространства, показала наличие определенных уровней с нулевыми значениями потенциала. Нижний уровень нулевых значений потенциала соответствовал затоплению наконечника фурмы в низкоомные слои металлического расплава конвертерной ванны. Верхний уровень нулевых значений потенциала соответствовал прохождению наконечником фурмы уровня горловины конвертера. Положение уровня реверса полярности потенциала является функцией дутьевого режима и отражает момент погружения наконечника из газовой фазы с положительной полярностью ЭДС в шлакометаллическую с отрицательной полярностью.

На втором этапе исследований были изучены особенности и характер протекания электрического тока в рабочем объеме конвертера при наложении низковольтных потенциалов. Эксперименты, проведенные в лабораторных и заводских условиях, показали, что наложение внешнего электрического поля от источника низких потенциалов в ходе продувки сопровождается прохождением в указанной цепи регистрируемого приборами электрического тока (рис.6). Независимо от рода и знака тока, подаваемого на фурму, характер изменения электрических параметров (при прочих равных условиях) был повторяемым от плавки к плавке и не зависел от объема конвертера.



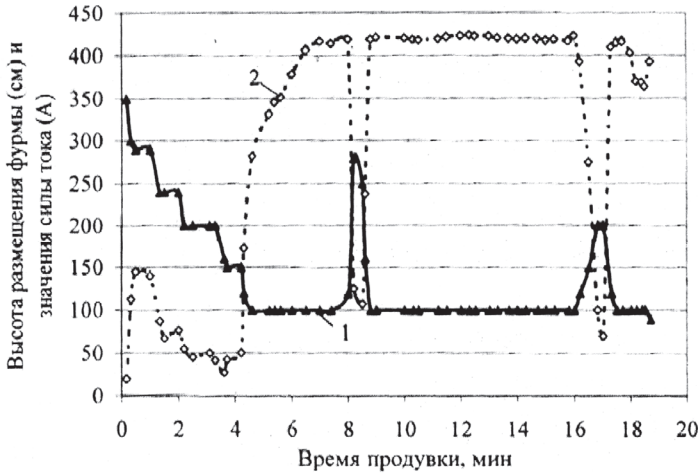


Рис.6. Изменение показателей по ходу продувки плавки при производстве высокоуглеродистой (вверху) и низкоуглеродистой (внизу) стали в 160-т конвертере

Анализ полученных диаграмм позволил выделить четыре характерных периода по ходу продувки. В течение первых двадцати-тридцати процентов общей длительности плавки значения силы тока в цепи были минимальными и определялись высокоомным сопротивлением газового промежутка между фурмой и ванной в это время. Значения разности потенциалов между фурмой и металлическим расплавом в этот период практически соответствовали напряжению источника тока. Во втором периоде (последующие пять-десять процентов длительности плавки) значения силы тока нарастают до максимальных величин при соответствующем снижении разности потенциалов. В третьем периоде (последующие 50-70%) сохраняется высокий уровень значений силы тока в цепи с некоторым снижением значений напряжения (разности потенциалов) до минимального уровня. На заключительном этапе продувки (оставшиеся 5-10%) отмечено понижение уровня значений силы тока с адекватным повышением напряжения (разности потенциалов). Как показали исследования, уровень электрического тока в цепи «фурма-ванна» является функцией как электрических свойств среды, заполняющей пространство между наконечником фурмы и жидкой ванной, так и динамики взаимодействия реагирующих фаз (подъема или осаждения шлакометаллической эмульсии в ходе продувки).

Для обеспечения более эффективной и устойчивой передачи электрической энергии конвертерной ванне на протяжении большей части продувки необходимо по ходу плавки непрерывно поддерживать нахождение наконечника формы по возможности ближе к границе раздела шлак-металл, для обеспечения. Требуется создание специального

устройства для оценки положения наконечника фурмы между верхней и нижней поверхностями слоя шлака, принципиальные основы которого разработаны ИЧМ с получением положительных результатов при испытаниях в производственных условиях на конвертерах садкой 60, 150 и 250 т.

### **Выводы**

На основании экспериментальных исследований, выполненных при выплавке стали в 0,3 и 1,5т лабораторных и 250т промышленных конвертерах, изучены величины и характер изменения электрических характеристик конвертерной ванны по ходу плавки. Получены показатели, относящиеся как к плавке, проведенной по стандартной технологии (без использования внешних воздействий), так и к варианту ее ведения с наложением на расплав низковольтного электрического потенциала при подводе переменного тока и постоянного тока положительной и отрицательной полярности. Выявлены особенности воздействия потенциала различного вида и возможности использования полученной информации для улучшения технико-экономических показателей конвертирования.

1. *Применение* электрической энергии малой удельной мощности при выплавке стали в конвертерах ДМКД / С.И.Семякин, В.Ф.Поляков, Ю.Н.Борисов, А.Д.Зражевский и др. // сб. трудов 1-го Конгресса сталеплавильщиков, г.Липецк. – 1992. – С. 105-107;
2. *Промышленные исследования* применения электрической энергии малой мощности в конвертерах комбината «Криворожсталь» / С.И.Семякин, А.В.Кекух, В.И.Макаренко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2004. – №6. - С.29-31
3. *Опыт* развития и освоения технологии применения низковольтных потенциалов при конвертерной плавке в условиях 60-т конвертеров ПАО «Евраз ДМЗ им. Петровского» / В.Ф.Поляков, С.И.Семякин, А.Д.Зражевский и др. // *Новости науки Приднепровья. Инженерные дисциплины.* – 2012. – № 3-4. – С.48-52

*Статья рекомендована к печати  
канд.техн.наук В. П. Питтюком*

*С.І.Семикін, В.Ф.Поляков, Т.С.Голуб, Я.А.Полякова*

**Аналіз електричних характеристик конвертерної ванни при плавіці сталі**

Експериментально досліджено електричні характеристики конвертерної ванни без зовнішніх впливів і в разі накладення на розплав додаткового низьковольтного електричного потенціалу. Показано, що в процесі продувки в ванні розплаву формується різниця електричних потенціалів, яка досягає максимальних значень між корпусом кисневої фурми і металевим розплавом, а найменших - між електродами, розміщеними на рівні шлакового і металевого розплавів. Показано можливість використання додаткового низьковольтного електричного потенціалу для поліпшення техніко-економічних показників конвертації.

**Ключові слова:** конвертерна ванна, електричний потенціал, показники конвертації

*S.I.Semykin, V.F.Poliakov, T.S.Golub, Ya.A.Poliakova*

**Analysis of the electrical characteristics of the converter when melting steel bath**

Experimentally investigated the electrical characteristics of the converting bath without external influences, and in the case of the imposition of additional melt low-voltage electrical potential. It is shown that in the process of blowing the molten bath in the electric potential difference is formed, which reaches the highest values between the case of the oxygen tuyere and the molten metal. It is shown that the use of extra low voltage electric potential allows to improve technical and economic indicators of the conversion.

**Keywords:** BOF bath, electric potential, conversion metrics