

УДК 669.162.213

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ МЕЖДУ ФУРМАМИ И КОЖУХОМ, ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

© **Большаков Вадим Иванович**, д-р техн. наук, акад. НАН Украины;  
**Семькин Сергей Иванович**, канд. техн. наук; **Муравьева Ирина Геннадиевна**, д-р техн. наук;  
**Поляков Владимир Федорович**, д-р техн. наук; **Семенов Юрий Станиславович\***, канд. техн. наук;  
**Голуб Татьяна Сергеевна**, канд. техн. наук; **Дудченко Сергей Александрович**;  
**Прокопенко Павел Григорьевич**; **Костюк Юрий Борисович**

Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины (ИЧМ). Украина, г. Днепропетровск.

\*E-mail: semenoffffff@mail.ru

Статья поступила 27.06.2013 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению электрических потенциалов, регистрируемых между воздушными фурмами и кожухом доменной печи № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». На основе изменения электрических потенциалов выполнен анализ процессов, происходящих в горне доменной печи.

**Ключевые слова:** доменная печь; электрическое поле; выпуск продуктов плавки; воздушная фурма; кожух доменной печи.

Исследованиями ряда авторов [1, 2] установлено, что в доменной печи (ДП) в условиях отсутствия каких-либо внешних физических воздействий формируется природное электрическое поле, что, как показали эксперименты, проявляется в наличии электрических токов и разнице в электрическом потенциале отдельных участков печи. Основой формирования электрического поля являются электронная природа металлической части расплава и ионная природа его шлаковой составляющей, а направленное движение электрически заряженных частиц (электронов и ионов), т.е. прохождение тока, обусловлено наличием в ДП мощных источников дутья и движением шихты в процессе ее проплавления.

Эти особенности доменной плавки могут быть использованы как для контроля процесса, так и для воздействия на ход физико-химических реакций и тепловые характеристики плавки. По первому направлению выполнен ряд исследований [2–9], которые обозначили принципиальную возможность использования электрических характеристик доменной плавки для определения уровня жидких продуктов. Однако практического применения результаты этих работ не нашли ни в Украине, ни за рубежом. В то же время «закрытый» характер ДП, сложность установления специальных приборов в условиях высокотемпературного воздействия и другие причины предопределяют

целесообразность разработки методов, способных преодолеть имеющиеся сложности.

Институт черной металлургии имеет более чем двадцатилетний опыт работы по использованию электрической энергии малой удельной мощности для стимуляции физико-химических и тепловых процессов при выплавке стали в кислородных конвертерах [10], а также контроля и регулирования хода плавки на основе фиксации электрических параметров процесса конвертирования [11]. Наличие накопленных знаний о природе формирования и особенностях воздействия низковольтного электрического поля и опыта их практического применения при конвертерной плавке стали послужило основанием для начала собственных исследований в области доменного производства, в первую очередь, с целью контроля происходящих в печи тепловых и физико-химических процессов.

Первый этап исследований, выполненных на ДП-9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», предусматривал предварительное определение возможности использования значений электрических потенциалов (ЭП), формируемых между фурмами и кожухом, для анализа, в первую очередь, процессов, происходящих в нижней части ДП и решения определенного круга практических задач.

Для ДП-9 характерен практически непрерывный выпуск продуктов плавки, для чего использу-

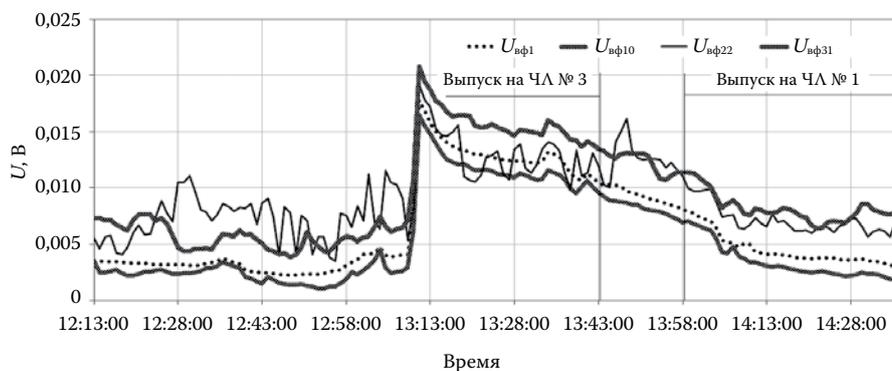


Рис. 1. Значения электропотенциалов, измеренных между кожухом ДП и воздушными фурмами

ются четыре летки (ЧЛ-1, ЧЛ-2, ЧЛ-3, ЧЛ-4). В течение исследованного периода выпуск продуктов плавки до 13 ч 45 мин осуществлялся через ЧЛ-3 и в 14 ч был начат через ЧЛ-1. Полученные записи диаграммы изменения значения ЭП на каждой из четырех фурм (обозначенных соответственно  $U_{вф1}$ ,  $U_{вф2}$ ,  $U_{вф3}$ ,  $U_{вф4}$ ) приведены на рис. 1. Следует отметить, что в период проведения исследований две из четырех контролируемых фурм – 1-я и 31-я были закрыты, т.е. на них не подавалось дутье. Однако, несмотря на это, значение ЭП на этих фурмах изменялось во времени, что свидетельствует о том, что контролируемый сигнал отражает процессы, протекающие в рабочем объеме печи.

Для установления связи значений ЭП с основными технологическими параметрами работы ДП использовали информацию о распределении дутья по воздушным фурмам, изменениях уровней засыпи шихты, которые регистрируются с помощью четырех электромеханических зондов (ЭМЗ), а также об изменении газодутьевых параметров.

Наибольший интерес представляют данные периода работы печи, в течение которого на диаграммах зафиксировано резкое увеличение значения ЭП на всех контролируемых фурмах. Следует отметить, что начиная с 12 ч 50 мин на печи наблюдался неравномерный сход шихты с периодически возникающими подстоями (рис. 2). По нашему мнению, причиной резкого увеличения ЭП явилась естественная осадка столба шихтовых материалов, приведшая к значительному изменению уровня шлака в горне, величина которого определяет электропроводность внутренней электрической цепи. В связи с тем, что в результате уменьшения давления дутья увеличилась активная масса шихтовых материалов, находящихся в печи, произошло вытеснение расплава из металлоприемника с подъемом его уровня,

вследствие чего уменьшилось электросопротивление участка внутренней электрической цепи.

В отличие от установленных ранее рядом авторов [2–9] особенностей изменения потенциалов на кожухе печи, исследования авторов позволили получить новые научные знания. В частности, установлено, что формируемые на фурме потенциалы по величине в несколько раз превышают

известные. Зафиксировано также, что значения ЭП, снимаемые с различных фурм, отличаются по величине, причем в начале амплитуда изменения разности потенциалов была наибольшей в секторе ЧЛ-3, через которую производится выпуск, и наименьшая – в противоположном секторе. Это может быть объяснено неравномерностью опускания уровня шлака по окружности горна печи. Однако при переходе на ЧЛ-1 этого не наблюдалось; в этом случае максимальное значение ЭП было характерно для ЧЛ-4 и ЧЛ-3.

Физической причиной изменения значений потенциалов в первом случае – между кожухом ДП и фурмами, расположенными над летками ЧЛ-3 и ЧЛ-4, – по нашему мнению, может являться смещение коксовой насадки, что приводит к повышению уровня шлакового расплава в этих секторах. Подтверждением этих предположений явились результаты исследований состояния футеровки печи, выполненных в процессе выдувки ДП-9, т.е. в период, непосредственно следующий за измерениями потенциалов. Как показали исследования, меньший разгар металлоприемника наблюдается в секторах ЧЛ-3 и ЧЛ-4, что позволяет предположить смещение основания коксовой насадки в сторону этих секторов. Это подтверждается и данными визуального наблюдения через монтажный люк, и результатами инструментальных замеров поверхности коксовой насадки после выдувки ДП-9.

По нашему мнению, причиной практически не зависящей от номера летки, на которую осуществляется выпуск, значений потенциалов между фурмами, расположенными над ЧЛ-1 и ЧЛ-2, и кожухом печи, является максимальный разгар футеровки металлоприемника в секторах, расположенных под этими летками. Эти соображения подтверждаются показаниями автоматизированной системы «Разгар», контролирующей на

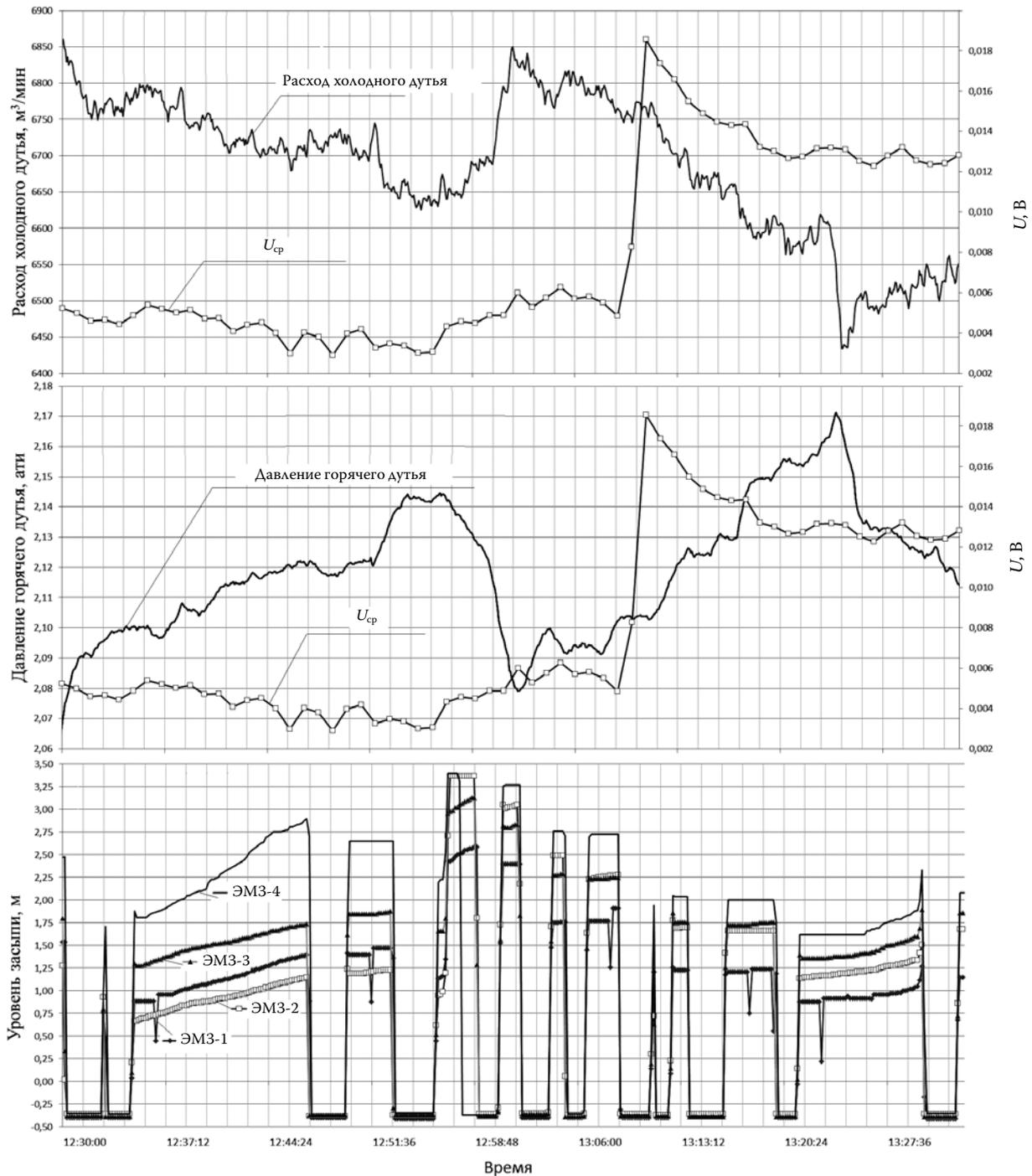


Рис. 2. Изменения среднего значения потенциалов, расхода холодного дутья, давления горячего дутья и уровней засыпи в исследованном периоде работы ДП-9

ДП-9 остаточную толщину футеровки и гарнсажа металлоприемника. В связи с максимальным разгаром футеровки в секторах над ЧЛ-1 и ЧЛ-2 и сдвигом коксовой насадки относительно оси печи в противоположную от них сторону накопление шлакового расплава и, соответственно, его уровень в этих секторах ниже, что и объясняет минимальные значения измеряемых ЭП.

Таким образом, значения потенциалов, фиксируемые между фурмами и кожухом ДП, с до-

статочной достоверностью характеризуют состояние горна, изменения уровня расплава, а также процессы, происходящие в нижней части печи.

На следующем этапе были выполнены более масштабные исследования, одной из целей которых было изучение принципиальной возможности использования фиксируемых значений ЭП для разработки с их использованием системы диагностирования состояния горна ДП. В ходе экспериментов помимо технологических пара-

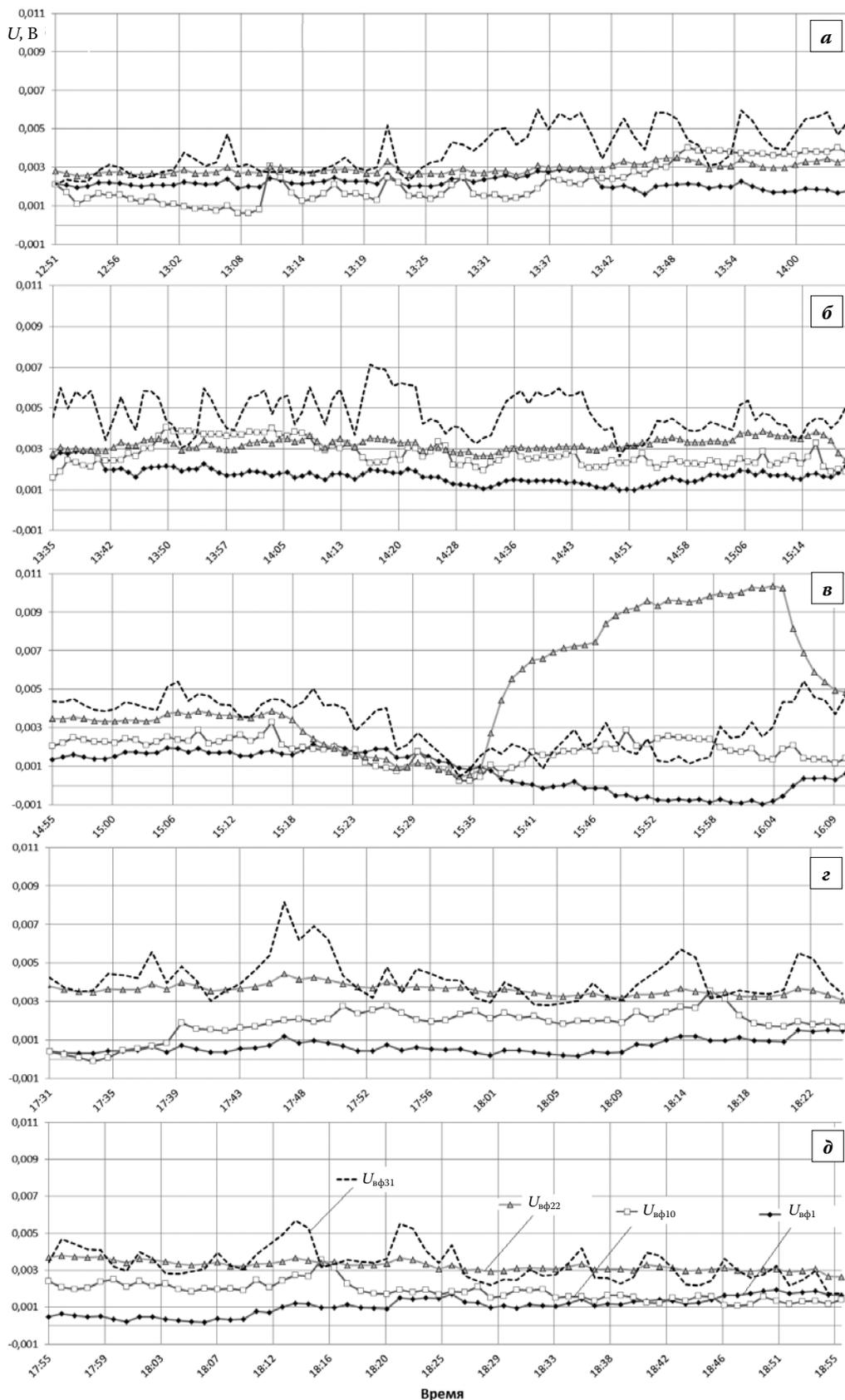


Рис. 3. Значения потенциалов, измеренных между кожухом ДП и воздушными фурмами, для пяти последовательно проведенных выпусков продуктов плавки (а–д)

гунными летками – 1-й (над ЧЛ-1), 10-й (ЧЛ-2), 22-й (ЧЛ-3) и 31-й (ЧЛ-4), и кожухом ДП (обозначения на рис. 3:  $U_{вф1}$ ,  $U_{вф10}$ ,  $U_{вф22}$ ,  $U_{вф31}$  соответственно), а также интегральную светимость светового потока через кварцевое стекло глазка визуального наблюдения, которая характеризует температуру в зоне горения кокса. Следует отметить, что при проведении эксперимента выпуск плавки осуществлялся на следующие летки: выпуски 1 и 3 – на ЧЛ-2; выпуски 2 и 4 – на ЧЛ-4; выпуск 5 – на ЧЛ-1.

Учитывая специфику поставленных задач, особенностью эксперимента являлась возможность использования информации, получаемой с помощью установленных на ДП-9 автоматизированных систем контроля поверхности засыпи шихты, и распределения дутья по фурмам для комплексной оценки процессов, протекающих в горне печи, что отличает эти исследования от ранее выполненных другими учеными [12].

Анализ представленных на рис. 3

метров плавки регистрировали значения ЭП, измеренные между каждой из четырех воздушных фурм, расположенных непосредственно над чу-

графиков изменения потенциалов позволил выделить период наиболее значительного увеличения значения ЭП на 22-й фурме, расположенной

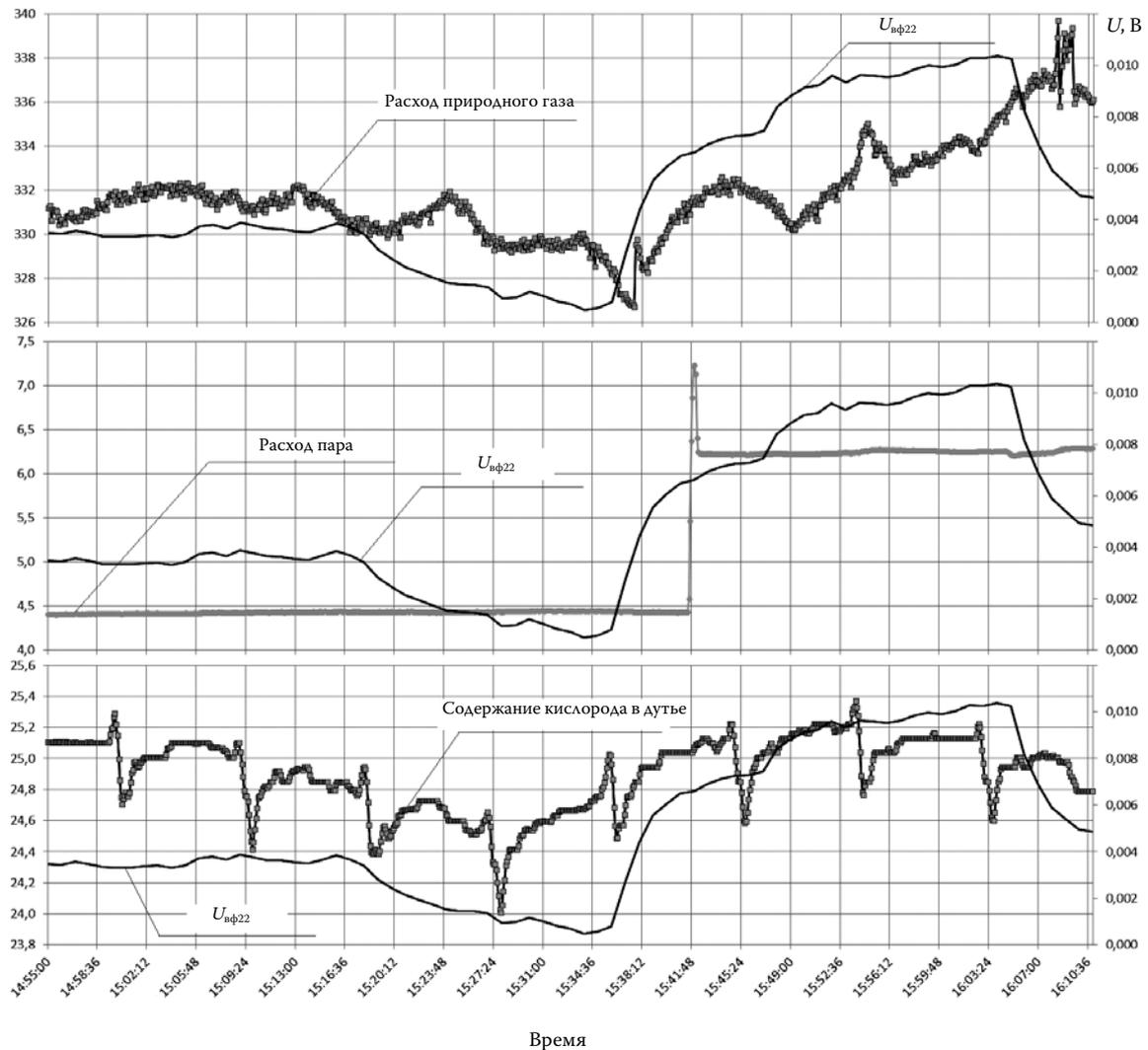


Рис. 4. Изменение потенциала между кожухом ДП и 22-й воздушной фурмой, измеренного в период 3-го выпуска продуктов плавки, а также расходов природного газа и пара, подаваемого для увлажнения дутья, и содержания кислорода в дутье

в секторе одного из подводов дутья (см. рис. 3, в). Причиной такого роста явилось осуществление персоналом регулирования теплового состояния горна печи, поскольку перед вторым выпуском содержание кремния в чугуна достигло 1,1% при заданном диапазоне его изменения 0,6–0,9% [13]. При этом были осуществлены действия, направленные на изменение параметров дутья – уменьшение расхода природного газа и кислорода (рис. 4), а затем подача пара, что, в конечном счете, способствовало уменьшению содержания кремния в чугуна на 4-м выпуске до 0,93%. Следует отметить, что наибольшие значения ЭП зафиксированы как на 22-й фурме, так и на 31-й, что объясняется подводом дутья в район сектора, где они расположены (аналогичная картина наблюдалась и в результате первого этапа исследований).

Исследование влияния технологических условий на значения ЭП и температуры факела фурменного очага является многофакторной за-

дачей. Для выявления наиболее информативных и значимых показателей использован факторный анализ [14].

Поскольку экспериментальные исследования выполнены в период, соответствующий пяти выпускам, были сформированы пять выборок исследованных данных, каждая из которых содержит информацию о величинах ЭП и температуры фурменных очагов, технологических показателях работы печи, а также информацию о параметрах, характеризующих состояние поверхности засыпи шихты на колошнике и распределение дутья по фурмам. В перечень этих параметров входят:

- значения уровней засыпи шихты, измеряемых в трех кольцевых зонах колошника по радиусам, расположенным в секторах чугунных леток;
- скорости опускания поверхности шихтовых материалов, рассчитанные на основе измеряемых профиломером уровней засыпи;
- расход дутья по фурмам.

В результате факторного анализа получены матрицы «нагрузок» отдельных показателей и их обобщенных «свернутых» значений для 1-го и 4-го выпусков продуктов плавки на восемь генеральных факторов, для второго выпуска – на девять, а для третьего и пятого – на семь. В связи с большим объемом полученной информации в статье в качестве примера приводятся данные только по связи переменных со значениями ЭП и температурой фурменных очагов.

Выполненный анализ показал следующее.

1. Контролируемые на четырех диаметрально расположенных фурмах 1, 10, 22 и 31 значения ЭП в значительной степени взаимосвязаны друг с другом.

2. Значения ЭП на контролируемых фурмах хорошо коррелируют с такими показателями, как:

- изменение расхода дутья через фурмы;
- распределение природного газа;
- температура горения кокса;
- измеряемые с помощью стационарного профилера параметры, характеризующие состояние поверхности засыпи шихты – ее уровни и рассчитанные скорости опускания поверхности засыпи шихты.

Включение в число анализируемых переменных значений температур в зоне горения кокса на двух фурмах позволило установить их связь с указанными выше параметрами поверхности шихты. Кроме того, как показал анализ, температура в зоне горения кокса в значительной степени связана с расходом природного газа.

Результаты экспериментов и выполненного на их основе факторного анализа позволяют сделать следующие выводы о возможности использования этой информации для контроля процессов доменной плавки.

1. Тесная связь потенциалов с расходами дутья и природного газа на фурмах позволяет на основе данных об изменении ЭП осуществлять оценку распределения дутья по воздушным фурмам, что имеет особое значение в случаях отсутствия на ДП соответствующей автоматизированной системы контроля.

2. Установленная связь ЭП с расходами природного газа на фурмах может быть использована для разработки способа регулирования теплового состояния горна ДП путем изменения расхода природного газа на фурмах с целью выравнивания тепловой неравномерности работы горна.

3. Связь ЭП с параметрами поверхности засыпи шихты на колошнике печи, получаемыми с помощью стационарной радиолокационной системы, может быть использована для контроля и оценки процессов опускания шихты в печи. Это

тем более важно, так как только одна ДП Украины оснащена подобной системой контроля профиля поверхности засыпи шихты.

4. Существенным дополнением к оценке распределения дутья и природного газа по фурмам, а также состояния поверхности засыпи шихты на колошнике с помощью информации об изменении ЭП явилась регистрация температуры горения кокса на двух фурмах. Установленная связь температуры горения кокса с параметрами поверхности засыпи логически объяснима. Известно, что на динамику процесса горения влияет дискретное поступление кокса в зону циркуляции. В свою очередь, горение кокса – один из основных факторов, способствующих опусканию шихтовых материалов в ДП. Поэтому регистрируемая температура горения кокса на фурмах может быть использована во взаимосвязи со значениями ЭП для оценки изменения параметров поверхности засыпи шихты, что имеет особое значение на печах, не оснащенных средствами контроля поверхности засыпи шихты.

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований показали принципиальную осуществимость метода контроля электрических потенциалов и возможность использования их значений для анализа условий работы доменной печи. Установленные связи значений потенциалов и температур в зоне горения кокса с технологическими параметрами работы печи указывают на целесообразность применения этой информации для контроля равномерности распределения дутья и природного газа по фурмам, а также опускания поверхности шихтовых материалов. Для установления количественных связей изучаемых параметров в ИЧМ им. З.И.Некрасова предусматривается проведение последующих исследований.

#### Библиографический список

1. **Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Семькин С.И. и др.** Обзор исследований образования в доменной печи электродвижущей силы: Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2012. Вып. 26.
2. **Дорофеев В.Н., Новохатский А.М.** О возникновении разности электропотенциалов на кожухе доменной печи / Изв. вузов. Черная металлургия. 1984. № 1. С. 24–28.
3. **Федулов Ю.В.** Использование электрического тока доменной печи для контроля плавки // Сталь. 1987. № 3. С. 17–21.
4. **Федулов Ю.В.** К вопросу возникновения электрического тока в доменной печи: Сб. «Производство чугуна». Свердловск: МГМИ УПИ, 1980. С. 84–96.
5. **Радилов С.В.** Электрический ток в доменной печи и его использование для контроля доменного процесса // Сталь. 1985. № 3. С. 9–11.

6. А.с. 601310 СССР, МПК<sup>5</sup> C21B7/24. Способ определения изменения количества жидкой фазы в горне рудно-термической печи / Радилов С.В., Козодеров В.И., Заболотин Ф.И. и др.; заявл. 17.05.1976, опубл. 05.03.1978, Бюл. № 13. С. 84.

7. А.с. 956566 СССР, МПК<sup>5</sup> C21B7/24. Устройство для контроля жидких продуктов в горне доменной печи / Драчук Э.Ф., Клугерман И.И., Першин В.П.; заявл. 25.02.1981, опубл. 07.09.1982, Бюл. № 33. С. 116.

8. А.с. 998513 СССР, МПК<sup>5</sup> C21B7/24. Способ измерения жидких фаз в горне шахтной печи / Новохатский А.М., Дорофеев В.Н., Борисов И.М. и др., заявл. 09.02.81, опубл. 23.02.83, Бюл. № 7.

9. А.с. 508525 СССР, МПК<sup>5</sup> C21B7/24. Способ контроля работы металлургического агрегата / Радилов С.В., Заболотин Ф.И.; заявл. 13.05.1981, опубл. 30.03.1976, Бюл. № 12. С. 65.

10. Семькин С.И., Поляков В.Ф., Шеремет В.А. и др. Опыт применения электрического воздействия при конвертерной плавке // Сталь. 2004. № 6. С. 37–38.

11. Семькин С.И., Пищида В.И. Практика использования низковольтных потенциалов для контроля и оптимизации конвертерного процесса // Металлургическая и горно-рудная промышленность. 2002. № 7. С. 103–106.

12. Большаков В.И., Бородулин А.В., Гладков Н.А. и др. Доменное производство «Криворожстали». Монография под ред. чл.-корр. НАНУ В.И.Большакова / Днепропетровск, Кривой Рог : ИЧМ НАНУ, Криворожсталь, 2004. 378 с.

13. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н. и др. Разработка и реализация в составе АСУ ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» автоматизированных способов контроля, прогноза и управления плавкой / Целевая комплексная программ НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин»: Сб. науч. ст. по результатам, полученным в 2010–2012 гг. Киев : Ин-т электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, 2012. С. 381–385.

14. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М.Ивановой. М. : Статистика, 1980. 399 с.

## ASSESSMENT OF CAPABILITY FOR USE OF ELECTRICAL POTENTIALS RECORDED BETWEEN TUYERES AND BF CASING FOR ANALYSIS OF PROCESSES IN BF HEARTH

© **Bol'shakov V.I.**, Dr Sci. (Eng.); Member of the NASU; **Semykin S.I.**, Cand. Sci. (Eng.); **Murav'jova I.G.**, Dr Sci. (Eng.); **Polyakov V.F.**, Dr Sc. (Eng.); **Semenov Yu.S.**, Cand. Sci. (Eng.); **Golub T.S.**, Cand. Sci. (Eng.); **Dudchenko S.A.**; **Prokopenko P.G.**; **Kostyuk Yu.B.**

The results of experimental studies to determine the electrical potentials recorded between air tuyeres and the casing of BF-9 at PJSC «ArcelorMittal Kryviy Rih» are presented. Based on changes in electrical potential processes taking place in the BF-hearth are analyzed.

**Keywords:** blast furnace; electric field; discharge of melt products; air tuyere; blast furnace casing.

### ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

#### ОАО НПО «ВНИИПТМАШ» поставит кран для Группы «Мечел»

ОАО НПО «ВНИИПТМАШ» (дочернее предприятие Уралмашзавода) заключило контракт на поставку крана мостового электрического магнитного с поворотной тележкой грузоподъемностью 20+20 т для Челябинского металлургического комбината (группа «Мечел»). Кран будет установлен в прокатном цехе ЧМК и использоваться для транспортировки пакетов фасонного металлопроката. С этой целью траверсы крана будут оборудованы электромагнитами.

– Компания «Мечел» открыта новым, современным решениям, – рассказал А.Валитов, руководитель представительства ОАО НПО «ВНИИПТМАШ» в г. Екатеринбурге, – кран будет оснащен частотно-регулируемыми приводами, позволяющими осуществить плавное регулирование скоростей подъема и передвижения, а также снизить потребление реактивной мощности. Механизмы передвижения и вращения тележки будут оснащены мотор-редукторами.

НПО ВНИИПТМАШ имеет большой опыт проектирования и изготовления кранов для предприятий черной металлургии. В последние годы такие краны изготовлены для Магнитогорского металлургического комбината, Северстали, Объединенной металлургической компании. Год назад для компании Мечел по проекту ВНИИПТМАШ был изготовлен и поставлен пратцен-кран грузоподъемностью 17 т.

ОАО «Уралмашзавод» – один из лидеров российского рынка оборудования для металлургии, горнодобывающей, нефте- и газодобывающей промышленности, строительных материалов и энергетики. Стратегия развития компании предусматривает создание машиностроительного предприятия мирового уровня, которая сможет комплексно обеспечивать потребности заказчиков в оборудовании.

На Уралмашзаводе при поддержке основного акционера – Газпромбанка – разработана и реализуется инвестиционная программа, предусматривающая коренную реконструкцию производства.

Пресс-центр ОАО «Уралмашзавод»