

УДК 669.162.263.44.001.5

Ю.С.Семенов<sup>1)</sup>, И.Г.Муравьева<sup>1)</sup>, В.Ф.Поляков<sup>1)</sup>, С.И.Семыкин<sup>1)</sup>,  
В.В.Горупаха<sup>1)</sup>, А.В.Наследов<sup>1)</sup>, П.Г.Прокопенко<sup>1)</sup>, Н.М.Сапрыкин<sup>2)</sup>,  
А.С.Хайбулаев<sup>2)</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ

*Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины<sup>1)</sup>  
ПАО «Енакиевский металлургический завод»<sup>2)</sup>*

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей и характера изменений электрических потенциалов (ЭП), регистрируемых между воздушными фурмами и кожухом доменной печи № 3 ПАО «Енакиевский металлургический завод». Выявлена связь уровня приращения сигнала ЭП и изменения содержания кремния в чугуна. На основании полученных данных установлена возможность использования электрических сигналов для контроля тепловых процессов в горне доменной печи.

**Ключевые слова:** доменная печь, тепловые процессы, электрические потенциал, контроль, кремний

**Современное состояние вопроса.** В предыдущие годы было сделано значительное число попыток использовать сведения об электрическом состоянии ванны доменной печи для контроля хода процесса [1]. То обстоятельство, что ни один из известных способов пока не получил промышленного применения свидетельствует о недостаточно высокой их эффективности. Вместе с тем, выявленная возможность фиксации электрических параметров ванны и наличие корреляции между ними и характером, а также показателями плавки предопределяет целесообразность продолжения работ в этом направлении.

Дополнительным аргументом в пользу этого соображения является закрытый характер агрегата и сложность происходящих в нем физико-химических и тепловых процессов, что затрудняет возможность их непосредственного контроля. Поэтому, важна любая возможность получения дополнительной информации о процессах в доменной печи.

Сотрудниками Института черной металлургии НАН Украины в течение длительного периода выполнялись работы по контролю и улучшению показателей процессов при конвертерной плавке и внепечной обработке стали, а также десульфурации чугуна, базирующиеся на электрических свойствах реагирующих фаз, т.е. на ионном и электронном характере проводимости расплавов [2–4]. Накопленный опыт, разработка целого ряда технических решений и положительные результаты промышленного применения в сталеплавильном производстве разработанных в рамках этой деятельности оборудования и технологии послужили основанием для выполнения в ИЧМ разработок в доменном производстве первоначально для контроля хода плавки, а в перспективе –

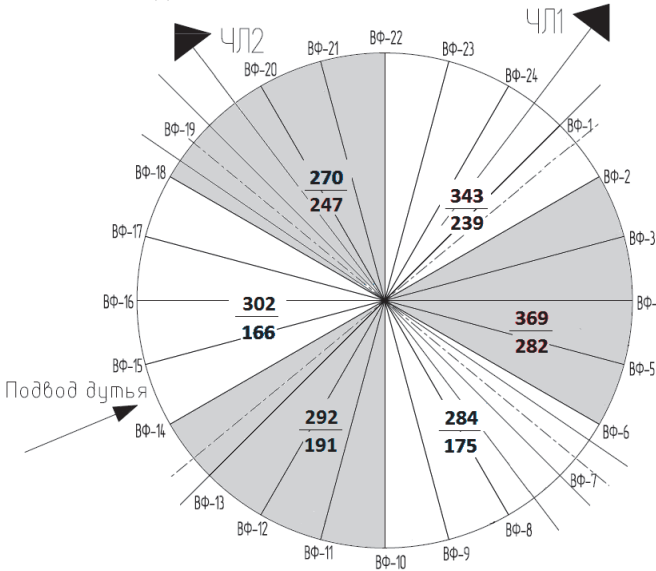
для управления процессом и улучшения его показателей, что может быть достигнуто, как за счет обеспечения ровности хода печи, так и интенсификации происходящих в агрегате процессов.

Результаты первых экспериментов, проведенных на ДП № 9 металлургического комбината «АрселорМиттал Кривой Рог», изложенные в публикациях [5], дают основание считать разработанный ИЧМ способ и оборудование перспективными для решения, в первую очередь, задач контроля процесса. Вместе с тем, следует отметить, что ДП № 9 существенно превосходит доменные печи, эксплуатируемые на металлургических предприятиях СНГ, по техническому уровню оснащённости средствами автоматизированного контроля процессов. Кроме того, на ДП № 9 используется непрерывный режим выпусков. Известно, что режим выпусков в значительной степени определяет ход процессов в нижней зоне доменной печи. Так как практически все доменные печи Украины работают в режиме с накоплением продуктов плавки, целесообразным явилось проведение исследований на другой печи, отличающейся режимом выпусков. В качестве объекта исследований выбрана ДП № 3 ПАО «Енакиевский металлургический завод», отличающаяся от ДП № 9 полезным объемом, конструкцией металлоприемника, режимом выпусков и т.д.

**Целью настоящей работы** является оценка возможности использования электрических сигналов, регистрируемых между фурмами и кожухом печи для контроля тепловых процессов в горне доменной печи.

**Изложение основных материалов исследований.** Исследования на ДП № 3 выполнены в два этапа. На рис.1 представлена схема расположения чугунных леток, воздушных фурм и подвода дутья на ДП № 3, на которой отражены также данные о температуре футеровки низа доменной печи (нижняя часть шахты, распар и заплечики) по шести секторам печи. На этом рисунке в каждом из шести секторов указаны температуры футеровки низа печи, в числителе – для первого этапа исследований, в знаменателе – для второго этапа. В период первого этапа, который был проведен перед, во время и после остановки печи, вызванной проведением плановых ремонтных мероприятий, величина электрических потенциалов (ЭП) измерялась между восьмью фурмами, расположенными в различно ориентированных секторах по периметру печи – 1-ой, 4-ой, 7-й, 10-ой, 14-ой, 17-ой, 20-ой, 24-ой и участками кожуха печи, обозначенных на рис.2, соответственно, Увф-4, Увф-7, Увф-10, Увф-14, Увф-17, Увф-20 и Увф-24, что соответствует расположению чугунных леток (ЧЛ) соответствующей нумерации. Остановке ДП предшествовал период с достаточно устойчивой работой печи при практически неизменном тепловом состоянии горна, характеризующимся стабильным содержанием кремния в чугуне ( $[\text{Si}] = 0,62 \pm 0,18\%$ ) и близкими по величине технологическими показателями плавки (рис.2–4). В период

исследований масса выпусков продуктов плавки изменялась в широком диапазоне – от 166 т до 465 т.



ЧЛ1 и ЧЛ2 – чугунные летки, ВФ – воздушные фурмы

Рис.1. Схема расположения основных элементов ДП № 3 и распределения температур по шести секторам (числитель – в первом, знаменатель – во втором этапе исследований)

Зафиксированное в исследуемом периоде существенное уменьшение регистрируемых сигналов ЭП объясняется уменьшением давления дутья, предшествующим выпуску большой массы продуктов плавки (465 т)/ Это привело к росту активного веса столба шихтовых материалов, находящихся в печи, под воздействием которого произошло вытеснение расплава, явившееся причиной резкого изменения ЭП на всех контролируемых фурмах. Правая часть графиков изменения ЭП отражает их поведение в период остановки печи (в течение 11 часов). Как следует из анализа рис.1, после остановки печи разница между величиной замеряемых ЭП монотонно уменьшается до определенных значений и в дальнейшем практически не изменяется, что подтверждает приведенные в работах [6, 7] результаты исследований.

Таким образом, результаты первого этапа исследований, а именно, установленное влияние давления дутья и остановки ДП на изменение ЭП согласуются с результатами исследований, выполненных на ДП № 9 [5] и приведенных в работах [6, 7]. Для получения взаимосвязей ЭП с технологическими параметрами и показателями работы ДП необходимым условием явился выбор для проведения эксперимента режима работы ДП

с нестабильным тепловым режимом плавки, что обусловило проведение следующего этапа исследований.

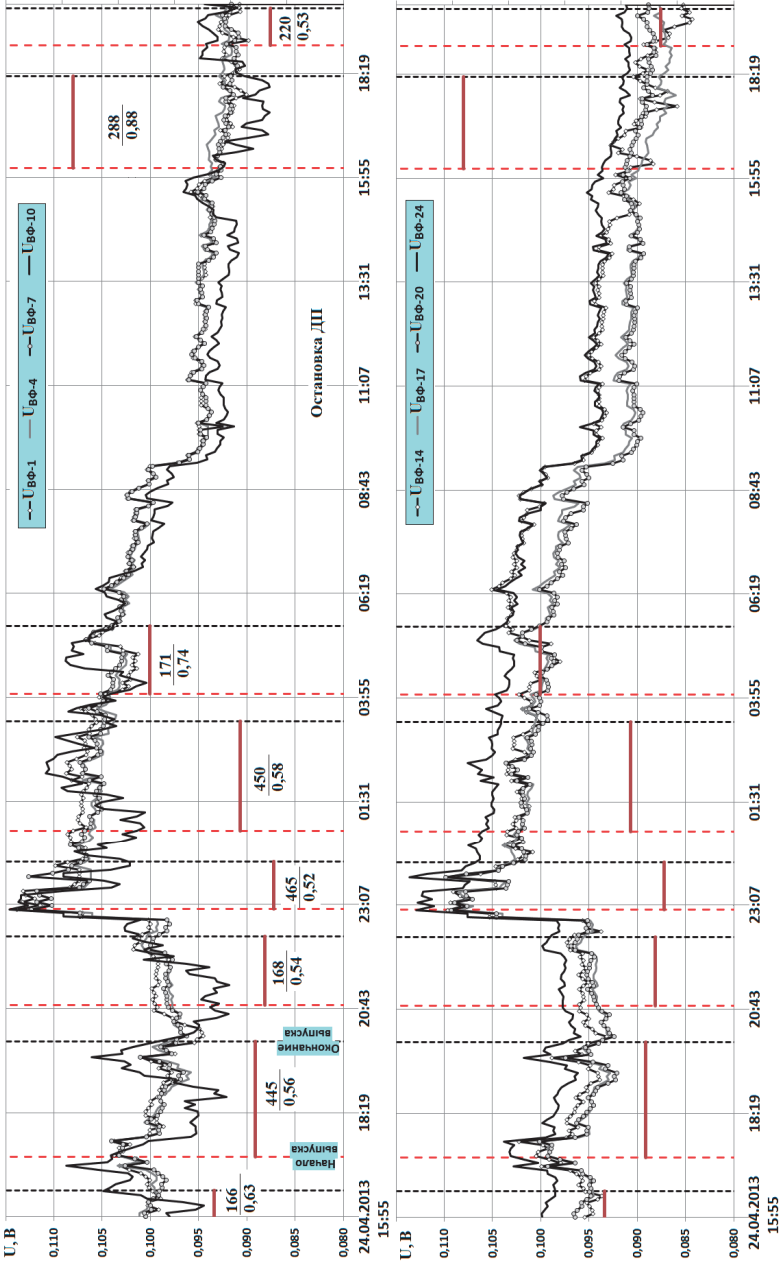


Рис.2. Изменение ЭП, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи на первом этапе эксперимента (горизонтальные линии – выпуск продуктов плавки, обозначения: числитель – масса выпуска, T, знаменатель – содержание кремния в чугуне, %)

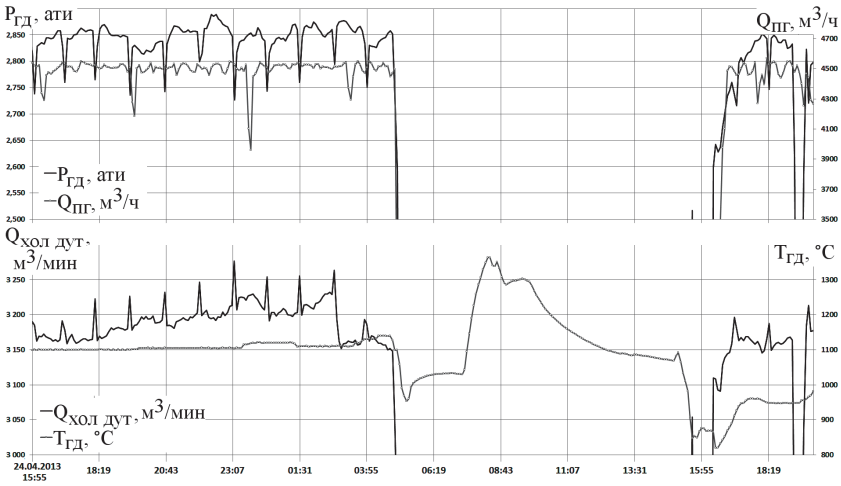


Рис.3. Изменение давления горячего дутья ( $P_{ГД}$ , ати), расхода природного газа ( $Q_{ПГ}$ ,  $М^3/ч$ ), расхода холодного дутья ( $Q_{ХОЛ ДУТ}$ ,  $М^3/МИН$ ) и температуры горячего дутья ( $T_{ГД}$ ,  $^{\circ}С$ ) в период регистрации ЭП

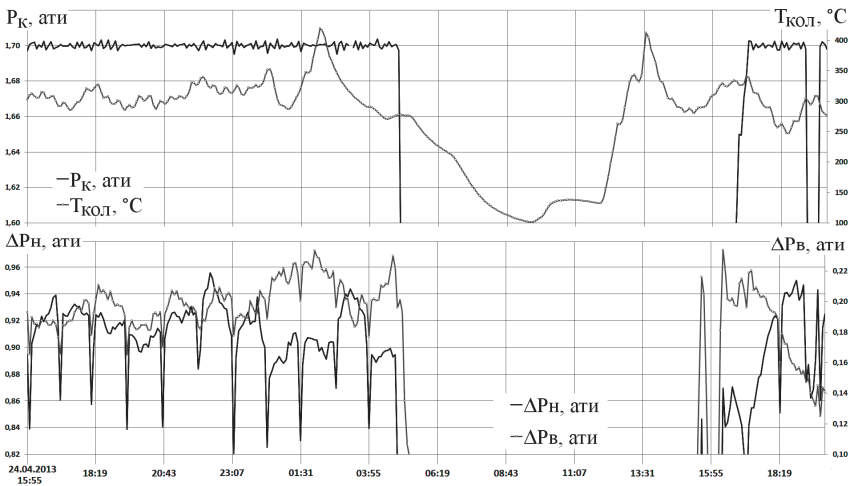


Рис.4. Изменение давления ( $P_{К}$ , ати) и температуры ( $T_{КОЛ}$ ,  $^{\circ}С$ ) колошникового газа, верхнего ( $\Delta P_{В}$ , ати) и нижнего ( $\Delta P_{Н}$ , ати) перепадов статического давления в период регистрации ЭП

Второй этап исследований выполнен в условиях работы той же печи, характеризующихся, в отличие от первого этапа исследований, нестабильным тепловым состоянием ( $[Si]$  изменялся от 0,28 до 0,66%) (рис.5).

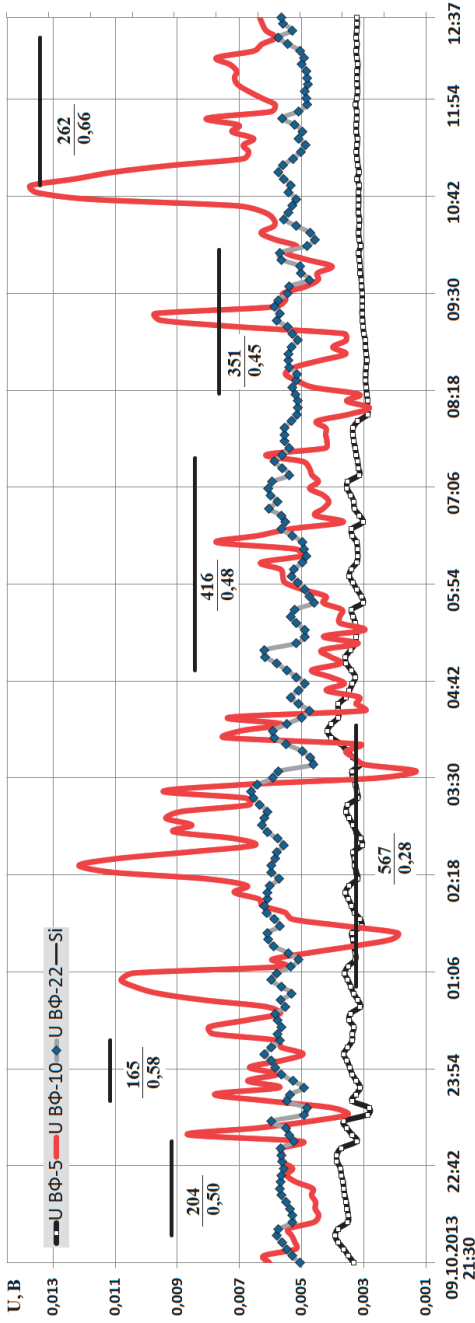


Рис.5. Изменение ЭП, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи на втором этапе эксперимента (горизонтальные линии – выпуск продуктов плавки, обозначения: числитель – масса выпуска, т, знаменатель – содержание кремния в чугунае, %)

Значения ЭП измерялись между тремя фурмами – 5-ой, 10-й, 22-ой, расположенными, в отличие от первого этапа, на более значительном расстоянии друг от друга, и кожухом печи.

Как следует из анализа графика, представленного на рис.6, изменения ЭП, регистрируемые между фурмами и кожухом доменной печи, связаны с расходом природного газа, что подтверждает установленную ранее в ходе выполнения исследований на ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» между ними связь [5]. Из рис.6 видно, что прекращение подачи природного газа на ВФ-10 способствовало увеличению ЭП между этой фурмой и кожухом. Связь ЭП с расходом природного газа может быть положена в основу разработки алгоритмов управления распределением природного газа по воздушным фурмам, что предусмотрено в дальнейших исследованиях.

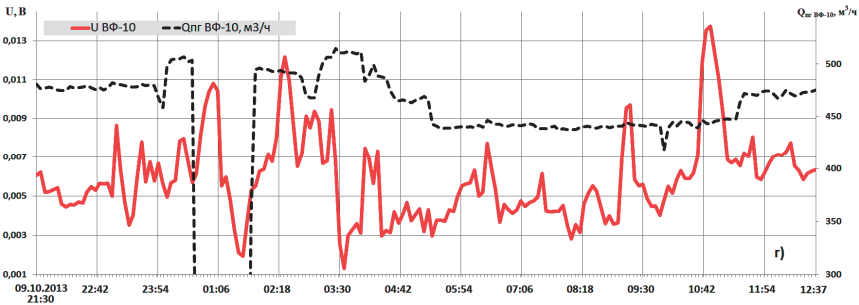


Рис.6. График изменения ЭП между воздушной фурмой №10 и кожухом печи и расхода природного газа на воздушной фурме №10 ( $Q_{гр\text{ вф-10}}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ )

Анализируя графики изменения ЭП следует отметить особый характер поведения ЭП на 10-ой фурме по сравнению с 5-ой и 22-ой фурмами. В отличие от регистрируемых на 5-ой и 22-ой фурмах, ЭП, регистрируемые на 10-ой фурме отразили возникновение электрического контакта от взаимодействия шлакового расплава с соответствующей фурмой. Поднятие уровня шлакового расплава в секторе 10-й фурмы, по нашему мнению, может свидетельствовать о перемещении тотермана при выпуске продуктов плавки в сторону этой фурмы, расположенной с противоположной стороны от чугунных леток (см. рис.1). Подтверждение этого предположения требует проведения дополнительных исследований.

ЭП, регистрируемые между кожухом и 5-ой и 22-ой фурмами, с достаточно высоким коэффициентом корреляции связаны с разностью температур на входе и выходе из системы охлаждения холодильников, установленных в области контролируемых фурм, расположенных в секторах с наибольшими температурами футеровки низа печи ( $r_{xy} = -0,62$ ) (рис.7). Наличие этой связи позволяет предположить, что по изменению ЭП можно судить об изменении содержания кремния в чугуне.

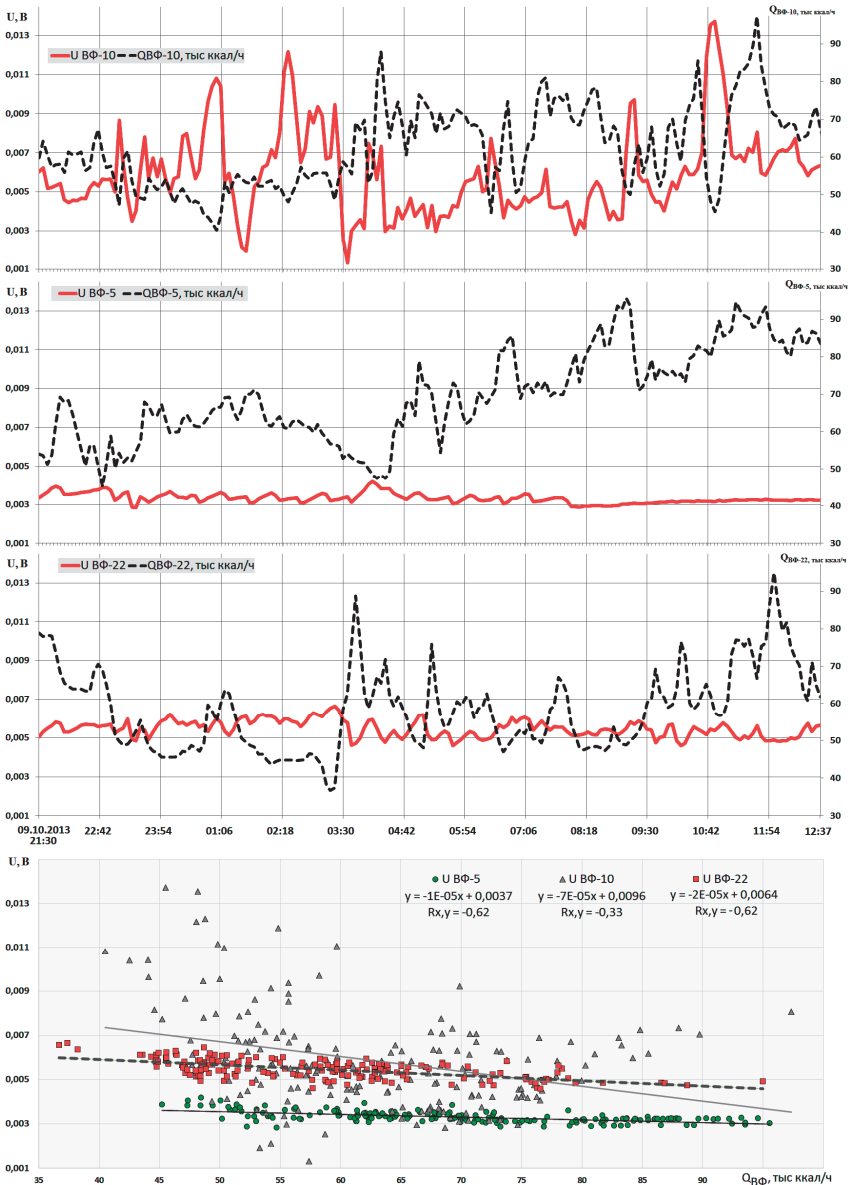


Рис.7. Графики изменения ЭП, регистрируемых между фурмами и кожухом печи, и разности температур на входе и выходе из системы охлаждения холодильников, установленных в области контролируемых фурм

Как следует из рис.5 и 7, ЭП на 5-ой и 22-ой фурмах имеют малый градиент изменения, что не позволяет установить связь изменения ЭП с



содержанием кремния в чугуне. В отличие от этих двух фурм, изменение ЭП на 10-й фурме характеризовалось значительной величиной градиента, что позволило использовать его для установления связей ЭП с содержанием кремния в чугуне. Как было сказано выше, значительное изменение ЭП на 10-й фурме явилось следствием контакта шлака с фурмой, еще одним подтверждением которого является нарушение связи ЭП с разностью температур на входе и выходе из системы охлаждения холодильников ( $r_{xy} = -0,33$ ).

Качественная зависимость, характеризующая связь между градиентом изменения разности ЭП ( $\Delta U$ ) и содержанием кремния в чугуне (см. рис.5) подтверждена количественно высоким значением коэффициента корреляции (рис.8). Установленная связь может быть использована для прогнозирования содержания кремния на момент начала времени выпуска либо через какое-то время после его начала, что позволит принимать управляющие воздействия по регулированию теплового режима плавки и тем самым будет способствовать уменьшению расхода кокса.

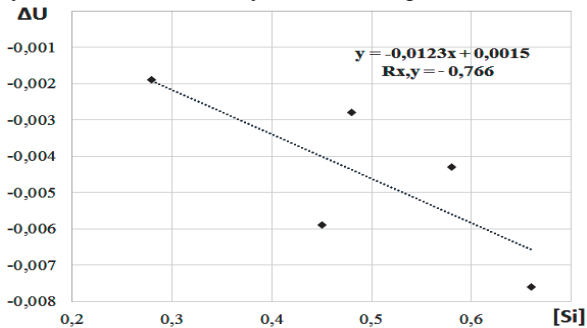


Рис.8. Связь между градиентом изменения разности ЭП и изменением содержания кремния в чугуне

**Заключение.** В результате выполненных исследований особенностей и характера изменений электрических потенциалов, регистрируемых между воздушными фурмами и кожухом доменной печи №3 ПАО «Енакиевский металлургический завод», установлена возможность использования электрических сигналов для контроля тепловых процессов в горне доменной печи. Выявленная связь уровня приращения сигнала ЭП и изменения содержания кремния в чугуне может быть использована для принятия управляющих воздействий по регулированию теплового режима плавки.

1. *Обзор исследований образования в доменной печи электродвижущей силы / И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.И. Семькин, и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ. – 2012. – Вып. 26. – С.108–119.*
2. *Исследование особенностей рафинирования железоуглеродистого расплава при наложении низковольтного электрического потенциала / С.И.Семькин.,*

- В.Ф.Поляков, Е.В.Семыкина, Т.С.Кияшко. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С.58–62.
3. *Семыкин С.И., Поляков В.Ф.* Применение электрического воздействия малой удельной мощности при кислородно-конвертерной плавке стали // *Сталь*. – 2014. – №9. – С.12–16.
  4. *Лабораторное* исследование процесса ковшевой десульфурации чугуна порошковой известью и гранулированным магнезиом при наложении на расплав низковольтного электрического потенциала / С.И.Семыкин, В.Ф.Поляков, Т.С.Голуб и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ. – 2014. – Вып. 28. – С.132-136.
  5. *Оценка* возможности использования электрических потенциалов, регистрируемых между фурмами и кожухом, для анализа процессов в горне доменной печи / В.И.Большаков, С.И.Семыкин, И.Г. Муравьева и др. // *Металлург*. – 2013. – №. 11. – С.29–35.
  6. *Дорофеев В.Н., Новохатский А.М.* О возникновении разности электропотенциалов на кожухе доменной печи // *Известия Вузов. Черная металлургия*. – 1984. – №1. – С.24–28.
  7. *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 КГГМК “Криворожсталь”, 2004. – С.534–537.

*Статья рекомендована к печати  
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

***Ю.С.Семенов, І.Г.Муравйова, В.Ф.Поляков, С.І.Семикін, В.В.Горупаха,  
О.В.Наследов., П.Г.Прокopenко, Н.М.Сапрыкін, А.С.Хайбулаев***

***Дослідження можливості використання електричних потенціалів у горні  
доменної печі для оцінки теплового стану***

Представлено результати експериментальних досліджень особливостей і характеру змін електричних потенціалів (ЕП), що реєструються між повітряними фурмами і кожухом доменної печі. Виявлено зв'язок рівня збільшення сигналу ЕП і змістом кремнію в чавуні. На підставі отриманих даних встановлено можливість використання електричних сигналів для контролю теплових процесів у горні доменної печі.

**Ключові слова:** доменна піч, теплові процеси, електричні потенціал, контроль, кремній

***Yu.S.Semenov, I.G.Muraveva, V.F.Poliakov, S.I.Semykin, V.V.Gorupaha,  
A.V.Nasledov, P.G.Prokopenko, N.M.Saprykin A.S.Khaibulaev***

***Study of possibility to use the electric potentials in the hearth of the blast  
furnace to evaluate the thermal state***

The results of experimental studies of the characteristics and nature of changes in electric potentials (EP), recorded between air lances and the casing of the blast furnace. The connection of the signal level increment EP and change in the silicon content in the iron. Based on these data, the possibility of using the electric signals for monitoring the thermal processes in the hearth of the blast furnace.

**Keywords:** blast furnace, thermal processes, electrical capacity, control, silicon