

УДК 669.162.263.44.001.5

**Ю.С.Семенов¹⁾, И.Г.Муравьева¹⁾, В.Ф.Поляков¹⁾, С.И.Семькин¹⁾,
В.В.Горупаха¹⁾, А.В.Наследов¹⁾, П.Г.Прокопенко¹⁾, Н.М.Сапрыкин²⁾,
А.С.Хайбулаев²⁾**

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

*Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины¹⁾
ПАО «Енакиевский металлургический завод»²⁾*

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 чугуне. На основании полученных данных установлена возможность использования электрических сигналов для контроля тепловых процессов в горне доменной печи.

Ключевые слова: доменная печь, тепловые процессы, электрический 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 –

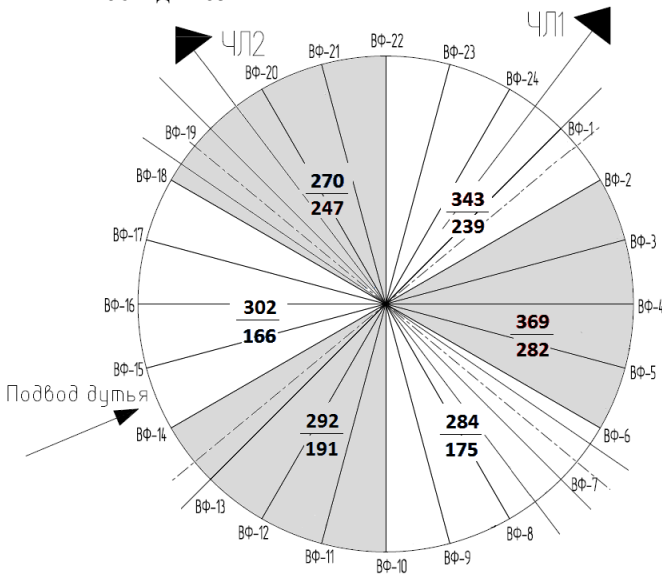
для управления процессом и улучшения его показателей, что может быть достигнуто, как за счет обеспечения ровности хода печи, так и интенсификации происходящих в агрегате процессов.

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 оснащенности 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 ($[Si]=0,62\pm 0,18\%$) 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.

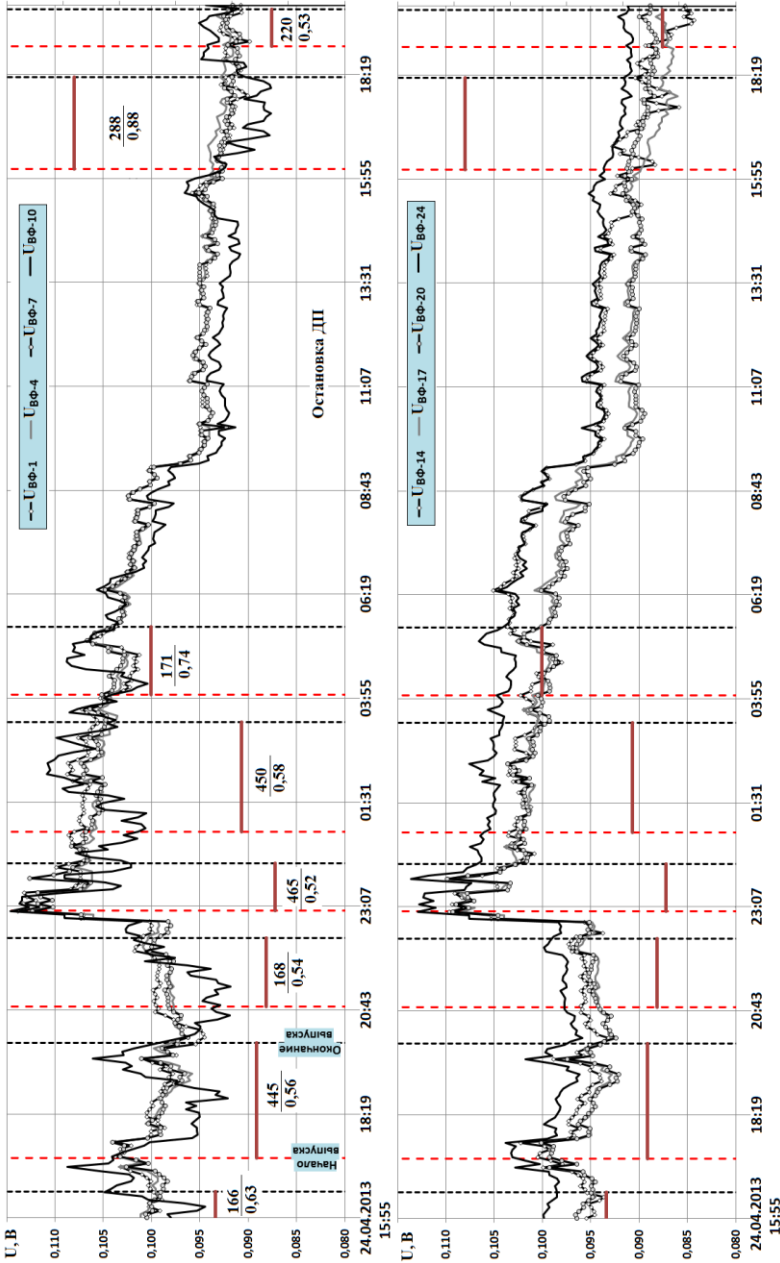


Рис.2. Изменение ЭП, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи на первом этапе эксперимента (горизонтальные линии – выпуск продуктов плавки, обозначения: числитель – масса выпуска, T, знаменатель – содержание кремния в чугуне, %)

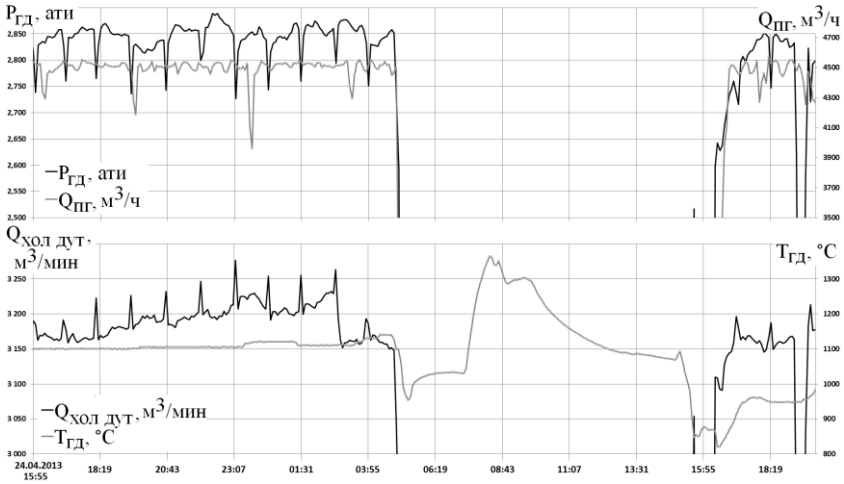


Рис.3. Изменение давления горячего дутья ($P_{ГД}$, атн), расхода природного газа ($Q_{ПГ}$, $M^3/ч$), расхода холодного дутья ($Q_{ХОЛ ДУТ}$, $M^3/МИН$) и температуры горячего дутья ($T_{ГД}$, $^{\circ}C$) в период регистрации ЭП

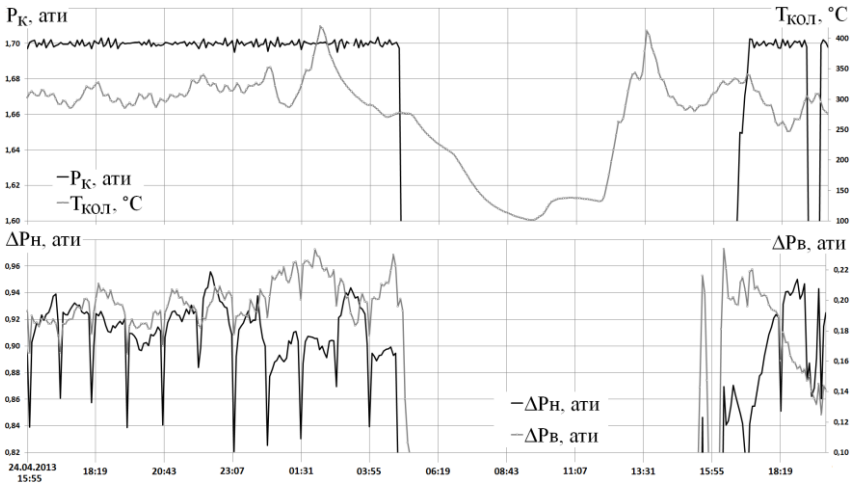


Рис.4. Изменение давления ($P_{К}$, атн) и температуры ($T_{КОЛ}$, $^{\circ}C$) колошникового газа, верхнего ($\Delta P_{В}$, атн) и нижнего ($\Delta P_{Н}$, атн) перепадов статического давления в период регистрации ЭП

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).

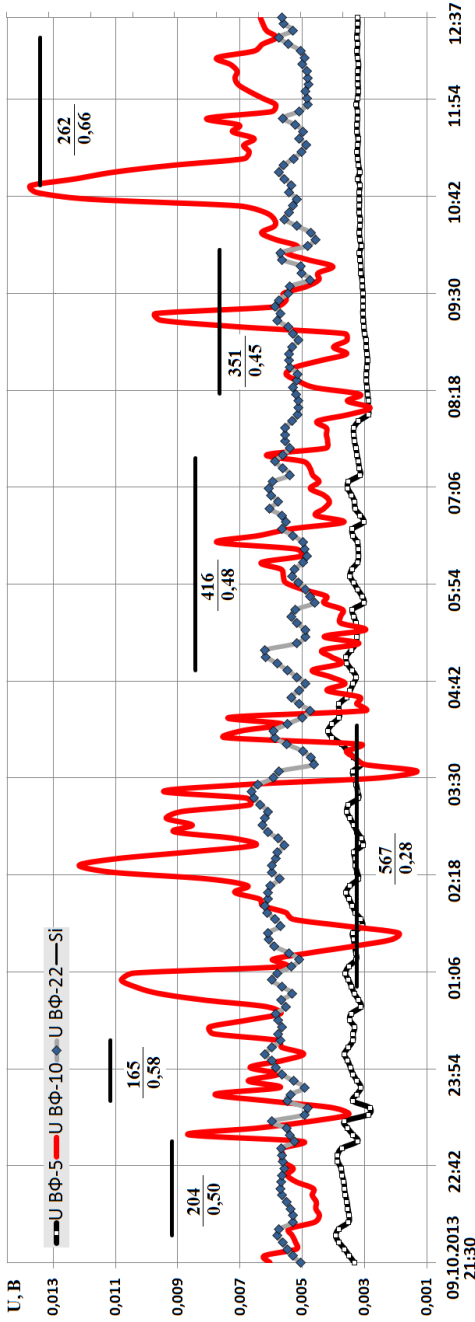


Рис.5. Изменение ЭП, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи на втором этапе эксперимента (горизонтальные линии – выпуск продуктов плавки, обозначения: числитель – масса выпуска, т, знаменатель – содержание кремния в чугунае, %)

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.

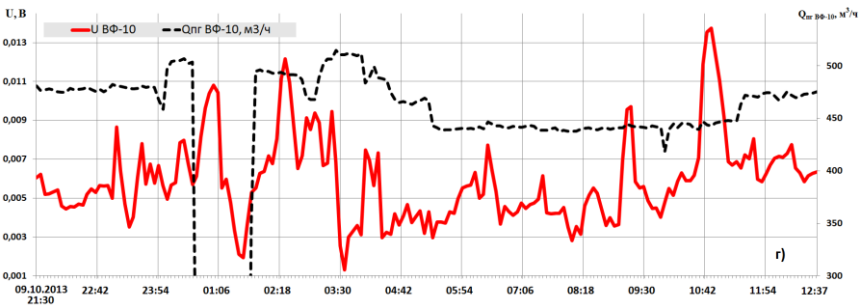


Рис. 6. График изменения ЭП между воздушной фурмой №10 и кожухом печи и расхода природного газа на воздушной фурме №10 ($Q_{гр\text{ вф-10}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$)

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.

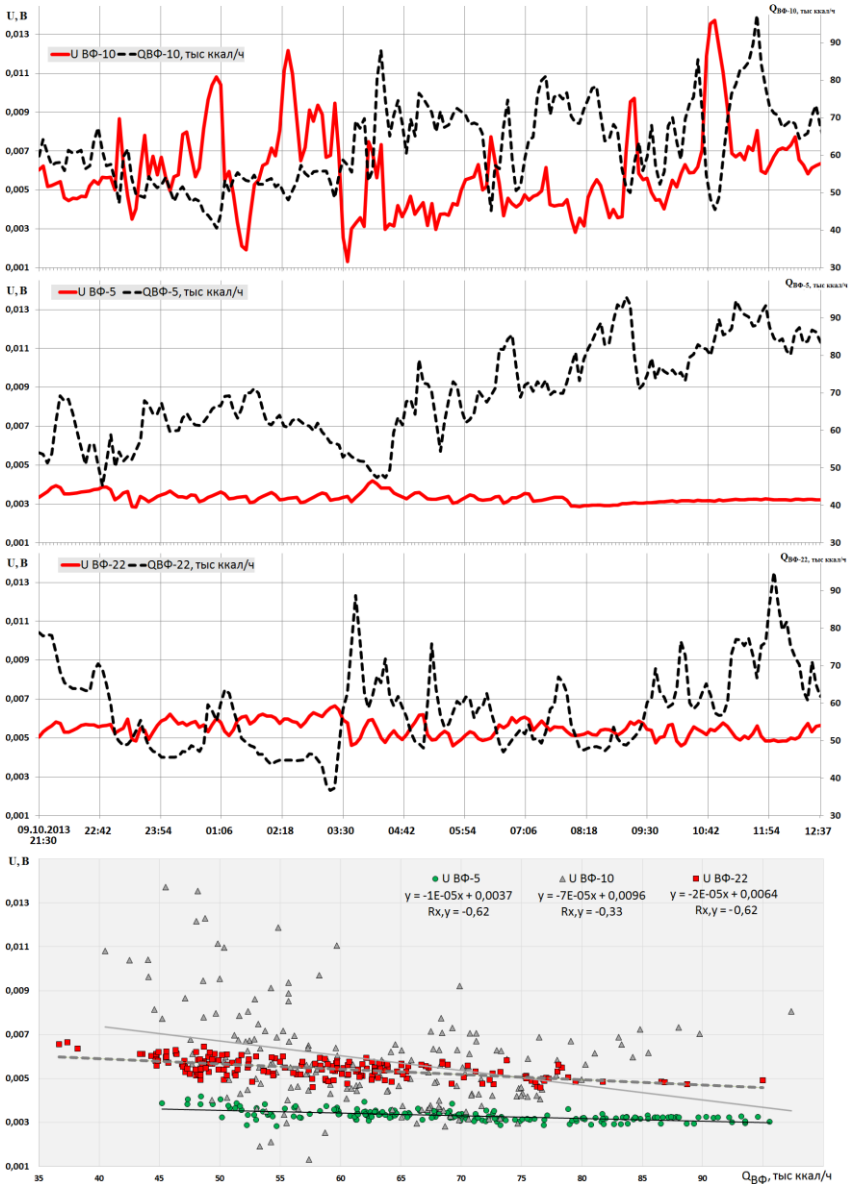


Рис. 7. Графики изменения ЭП, регистрируемых между фурмами и кожухом печи, и разности температур на входе и выходе из системы охлаждения холодильников, установленных в области контролируемых фурм

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 чугуна. 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 чугуна. 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 (ΔU) и содержанием кремния в чугуна (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.

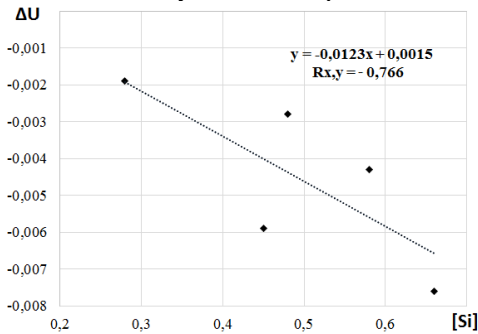


Рис.8. Связь между градиентом изменения разности ЭП и изменением содержания кремния в чугуна.

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 чугуна 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 магнезитом 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. 5–10.
 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*