

**2.6. СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ – ИНСТРУМЕНТ ПОЗНАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

**В.И. Большаков**, доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины

**И.Г. Муравьева**, доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
e-mail: [irinamuravyova@gmail.com](mailto:irinamuravyova@gmail.com)

**Ю.С. Семенов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
e-mail: [yuriy.semenov.isi@gmail.com](mailto:yuriy.semenov.isi@gmail.com)

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

Многофакторный процесс доменной плавки, сочетающей многообразие происходящих в печи процессов, изучается учеными разных стран уже более ста лет [1]. Значительное количество весомых факторов, влияющих на эффективность плавки, а главное - недоступность внутреннего пространства печи для наблюдения и прямых измерений при исследованиях, не позволяет контролировать ряд важных параметров, характеризующих особенности протекания процессов, а, следовательно, использовать их для управления работой агрегата.

Известно, что эффективность доменной плавки в значительной степени определяется распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи [2]. Для реализации рационального распределения шихты необходимо знание зависимостей формирования поверхности засыпи от изменения параметров распределения материалов и хода печи, скоростей опускания шихты по сечению колошника, формы и положения в печи основных элементов структуры столба шихтовых материалов, определяющих газодинамические процессы в печи. До создания современных средств измерения профиля его оценка осуществлялась лишь расчетным путем при большом количестве упрощающих допущений.

Значительным шагом в процесс познания доменной плавки стали исследования, выполненные в последнее десятилетие сотрудниками Отдела технологического оборудования и систем управления ИЧМ под руководством академика НАНУ В.И. Большакова. Базой для них явилась установка на ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» современной, не имеющей мировых аналогов, радиолокационной системы контроля профиля поверхности засыпи шихты на колошнике [3, 4].

До исследований, выполненных в ИЧМ, функции профиломеров (в основном, установленных на зарубежных доменных печах) ограничивались контролем поверхности засыпи шихты в доменной печи. Получаемая ими информация, как правило, использовалась для адаптации математических моделей распределения шихты на колошнике, как в составе экспертных систем управления доменной плавкой, так и вне зависимости от других моделей для оценки программ загрузки [5–12]. Практически отсутствовало использование информации профиломеров в автоматизированных системах управления доменной плавкой. Выполненные в ИЧМ исследования позволили расширить возможность контроля процессов, протекающих в доменной печи, и разработать новые способы прогноза и управления плавкой с использованием профиломеров [3, 13–18].

Ранее выполненные исследования позволили установить, что формирование поверхности засыпи шихты зависит как от параметров режима загрузки, так и хода печи. Процессы, протекающие в объеме печи, вызывают различное поведение шихтовых материалов в кольцевых зонах по радиусу колошника, результатом чего является опускание образованного после выгрузки профиля поверхности засыпи с различными скоростями в этих зонах [19]. Это положение явилось основанием

использования скорости опускания поверхности шихты для косвенной оценки протекающих в объеме печи процессов, а также оценки положения элементов структуры столба шихты. Основываясь на взаимосвязи параметров поверхности засыпи шихты с технологическими параметрами доменной плавки, разработаны новые методы контроля, прогноза и управления процессами [3, 13 - 18].

**Метод прогнозирования содержания кремния в чугуне.** На основе экспериментальных исследований установлено, что изменение содержания кремния в чугуне от выпуска к выпуску (как критерия теплового состояния доменной плавки) тесно взаимосвязано с изменением средней скорости опускания шихты в осевой зоне печи за цикл загрузки печи. Это позволило использовать изменение скорости опускания шихты в осевой зоне печи в качестве критерия, с помощью которого можно прогнозировать содержание кремния в чугуне. Разработанный на основе этой связи метод прогнозирования содержания кремния в чугуне претерпел ряд совершенствований по мере получения с помощью профилимера новых знаний о процессах плавки [14, 15]. Так, в первоначальном толковании метод основывался на использовании регрессионного выражения, учитывающего транспортное запаздывание входящих в него параметров (теоретической температуры горения кокса, скорости опускания поверхности шихтовых материалов в осевой зоне колошника, средней рудной нагрузки и содержания пара в дутье при условии постоянной естественной влажности), которое определялось путем построения их взаимно корреляционных функций (ВКНЦ-функций). Первые положительные результаты использования метода показали достаточно высокую степень достоверности прогноза. Однако, продолжительная работа метода в составе АСУ ДП № 9 позволила выявить ряд его особенностей, понижающих степень достоверности прогноза кремния. В этой связи выполнен анализ построенных для различных периодов ВКНЦ-функций содержания кремния в чугуне и скорости опускания шихты в осевой зоне печи, в результате которого установлено, что при одной и той же интенсивности плавки транспортное запаздывание параметров «верха» печи может быть различным. Объяснением этому может являться тот факт, о котором говорили многие исследователи, что кремний не всегда является показателем теплового состояния низа доменной печи. Именно особенности поведения ВКНЦ-функций определили время (в среднем, 3 часа до выпуска), за которое согласно первой редакции способа осуществляется прогноз содержания кремния в чугуне. Такой временной интервал определяет ограничения выбора управляющих воздействий, т.к. предупредить нарушения теплового состояния за промежуток времени, соответствующий трем часам, возможно только регулированием теплового состояния «снизу», т.е. изменением параметров дутья.

Последующее совершенствование метода прогнозирования содержания кремния в чугуне заключалось в учете транспортного запаздывания параметров, характеризующих возмущающие воздействия «сверху» (скорость опускания поверхности шихтовых материалов в осевой зоне колошника, средняя рудная нагрузка), которое определялось временем пребывания материалов в печи. Усовершенствованный метод позволил с достаточно высокой степенью достоверности прогнозировать содержание кремния в чугуне в существенно различающихся технологических условиях плавки за время, соответствующее времени пребывания шихты в печи (5 - 10 часов). Учет в качестве транспортного запаздывания времени пребывания шихты в печи открывает возможности регулирования теплового состояния печи с помощью управляющих воздействий «сверху», т.е. параметрами загрузки, не исключая при этом возможности регулирования теплового состояния «снизу» – параметрами дутья.

**Способ оценки стабильности опускания шихты на колошнике печи.**

Известно, что высокие показатели доменной плавки могут быть достигнуты при рациональном распределении газового потока в столбе шихтовых материалов, способствующем равномерному опусканию материалов в шахте доменной печи. Один из основных признаков нормальной работы печи - ровный ее ход, главной составляющей которого является стабильное и устойчивое опускание шихты с неодинаковой, но постоянной (стабильной) скоростью в различных сечениях колошника [20–22]. Стабильность опускания шихты по сечению печи определяется различной степенью влияния следующих факторов: дутьевого режима, плавления шихты, связанного с химическими и физическими свойствами шихтовых материалов, распределения их и формирования газового потока по сечению печи, состояния профиля печи, выпуска продуктов плавки и т.д. Следовательно, скорость опускания шихты в различных сечениях колошника и ее колеблемость во времени отражают суммарное воздействие всех вышеуказанных факторов на стабильность схода шихты по сечению печи и могут быть использованы для определения степени ровности хода печи, выраженной в виде коэффициентов нестабильности опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника.

Стационарная система измерения профиля поверхности засыпи шихты позволила усовершенствовать разработанный ранее в ИЧМ при освоении радиоизотопного профилемера на доменной печи объемом 2002 м<sup>3</sup> АК «Тулачермет» способ оценки ровности хода печи по «плавности» опускания шихты в отдельных кольцевых зонах и всему сечению колошника [18, 23]. Предложено осуществлять оценку изменения колеблемости скорости опускания шихты на колошнике по величине среднеквадратичного отклонения ( $\sigma_n$  – СКО) скоростей в различных зонах колошника и по всему его сечению после выгрузки каждой порции шихтовых материалов, образующих цикл загрузки. На основе рассчитанных средних за цикл в каждой кольцевой зоне значений –  $\sigma_m^{V_{ш.пф.лп.2п.ц}}$  и по сечению колошника –  $\sigma_m^{V_{ш.пф-ц}}$  определяются коэффициенты нестабильности опускания шихты на уровне колошника для каждой зоны из выражения:

$$K_{3m} = \left| 1 - \frac{\sigma_{ср}^{V_{3m}}}{\sigma_{ср}^{V_k}} \right|$$

и всего сечения колошника:

$$K_k = \frac{\sum^m K_{3m}}{m},$$

где  $K_{3m}$  – коэффициент нестабильности опускания шихты в кольцевой зоне сечения колошника, ед.;

$K_k$  – коэффициент нестабильности опускания шихты по всему сечению колошника, ед.;

$m$  – количество зон колошника;

$\sigma_{ср}^{V_{3m}}$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты в кольцевой зоне за цикл загрузки, м/мин;

$\sigma_{ср}^{V_k}$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения скорости опускания шихты по сечению колошника за цикл загрузки, м/мин.

Уменьшение величины коэффициентов  $K_{3m}$ ,  $K_k$  и выполнение условия  $K_{3m}$ ,  $K_k \rightarrow \min$  указывает на уменьшение степени нестабильности опускания шихты в отдельных зонах и по всему сечению колошника для конкретных условий плавки.

Предложенные коэффициенты нестабильности опускания шихты в печи позволили уточнить величину нормы выхода колошникового газа. Ограниченная диапазоном 48–50 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup> рациональная величина нормы выхода колошникового газа для условий ДП № 9 Криворожстали [24] была установлена и предложена для существовавших ранее сырьевых условий и технологических параметров доменной плавки. Обоснование этой величины основывалось на том, что оптимальные газодинамические условия в шахте доменной печи, при которых выравнивается газораспределение по сечению печи (увеличивается количество и восстановительная способность газа, проходящего через «гребень» рудных материалов), а также сохраняется устойчивость слоя шихты на колошнике (исключается переход шихты во взвешенное состояние) достигаются при скорости газа 0,8–0,9 м/с на полное сечение колошника и обеспечиваются фактическим расходом газа  $V_{кр}^{SkPk} = 48–55$  м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>2</sup> сечения колошника при установленном давлении колошникового газа  $P_k$ . В соответствии с нормой выхода колошникового газа при изменении параметров дутьевого режима плавки устанавливалось давление под колошником.

Приведенный на рис. 1 график иллюстрирует изменение коэффициентов нестабильности опускания шихты при работе ДП №9 с различной интенсивностью плавки. Как следует из его рассмотрения, прямо пропорциональная зависимость величины выхода колошникового газа от коэффициентов нестабильности опускания шихты, свидетельствующая о нормальной работе печи, наблюдалась в период производства 8090 т/сутки (рис. 1,б).

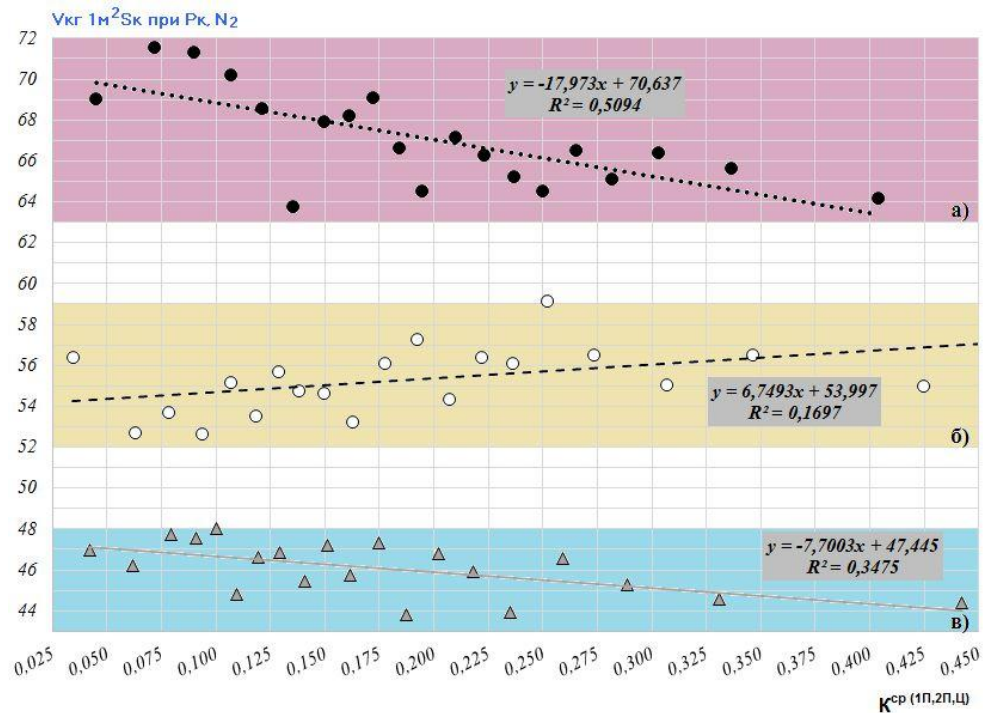


Рис. 1. Изменение величины выхода колошникового газа в зависимости от коэффициентов нестабильности опускания шихтовых материалов

*Современные средства автоматизированного контроля – инструмент познания процессов доменной плавки*

Обратно пропорциональная зависимость изменения величины выхода колошникового газа от коэффициентов нестабильности опускания шихты (при производствах 6122 и 9757 т/сутки), характеризовала нерациональный газодинамический режим плавки в эти периоды работы печи, при котором ухудшение стабильности опускания шихты сопровождалось уменьшением выхода колошникового газа (рис. 1,а и рис. 1,в). Это позволяет предположить, что показатель ровности хода печи, выраженный коэффициентами нестабильности, может быть использован для оценки эффективности установленного режима работы печи, для чего необходимо определить его количественные взаимосвязи с технологическими параметрами.

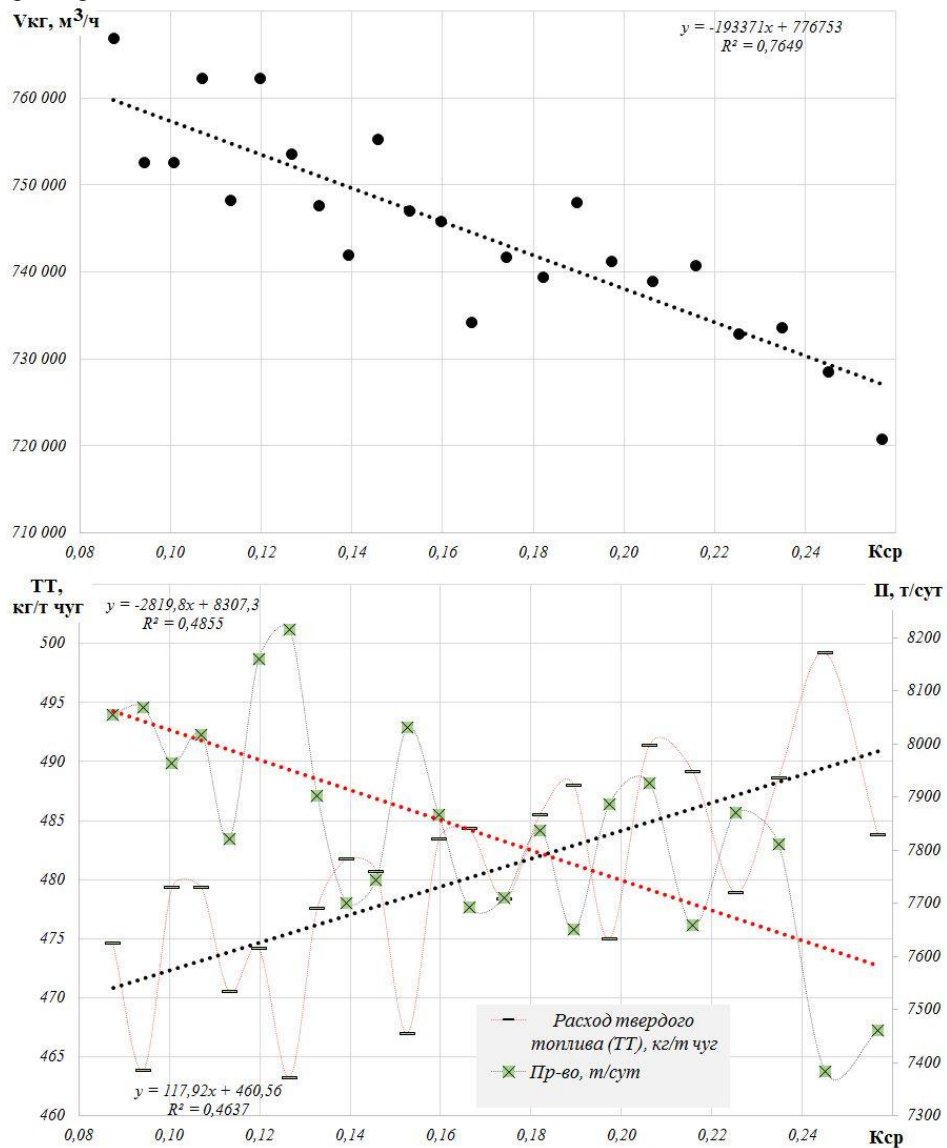


Рис.2. Изменение величины выхода колошникового газа и твердого топлива в зависимости от коэффициентов нестабильности опускания шихтовых материалов

Выполненные исследования позволили уточнить величину нормы выхода колошникового газа для современных сырьевых и технологических условий плавки на ДП № 9, которая при согласованных параметрах «верха» и «низа» печи (как следует из рис. 1,б) может быть ограниченной диапазоном 52 - 59 м<sup>3</sup>/мин·м<sup>2</sup>. Верхняя граница рационального диапазона изменения нормы выхода колошникового газа, по нашему мнению, может характеризовать предел регулирования режима работы печи воздействием на доменную плавку «снизу», т.е. изменением расхода дутья и его согласованием с давлением газа под колошником.

Основным показателем, характеризующим распределение шихтовых материалов и газового потока по радиусу сечения колошника, является величина рудной нагрузки в равновеликих кольцевых зонах радиуса [1]. Определение с помощью стационарной системы контроля профиля поверхности засыпи шихты высот слоев железосодержащих материалов и кокса априори не может позволить рассчитать рудные нагрузки в зонах сечения колошника в связи с неопределенностью насыпного веса материалов, который по данным исследований изменяется в процессе выгрузки на динамически нестабильную исходную поверхность засыпи. Поэтому, для оценки радиального распределения материалов по сечению колошника может быть использован показатель, в частности, определяемый отношением высот слоев железосодержащих материалов и кокса, образованных за цикл загрузки. Основанием для такого утверждения явились исследования, в результате которых для нескольких периодов работы печи установлены связи показателя распределения, определяемого отношением высот слоев с распределением доли CO<sub>2</sub> в радиальном газе, которое является одним из основных технологических параметров, контролируемых в ходе плавки и характеризующих изменение радиального распределения шихты и газового потока в печи. Результаты исследований показали, что на основе рассчитанных по данным профиломера коэффициентов нестабильности может быть выполнена оперативная оценка целесообразности изменения режима работы печи, а с помощью показателя распределения – отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса, определены возможные пути достижения заданного распределения шихтовых материалов. Оба положения требуют в дальнейшем проведения исследований с целью получения количественных взаимосвязей рассчитываемых параметров с технологическими показателями плавки.

***Метод определения положения пластичной зоны в доменной печи.***

Выполненные разными авторами исследования факторов, влияющих на движение столба шихтовых материалов в печи, показали, что размягчение и плавление материалов могут быть причиной периодических колебаний как абсолютных, так и относительных скоростей опускания шихты на колошнике доменной печи, по которым можно оценить положение пластичной зоны [21, 25–29, 30]. Это явилось предпосылкой для исследований динамики скоростей опускания поверхности шихтовых материалов в зонах сечения колошника ДП № 9, в результате которых установлен нестабильный характер их изменения во времени. Установлена периодичность проявления максимальной величины среднеквадратичного отклонения скорости, по которому оценивается ее вариация, характерная для каждой зоны сечения колошника. Принято, что расстояния от воздушных фурм, рассчитанные для временных интервалов между максимальными среднеквадратичными отклонениями (СКО) скорости, превышающими среднее их значение, и средними за эти интервалы скоростями опускания шихты в каждой зоне могут характеризовать положение пластичной зоны по высоте и радиусу доменной печи. При этом отклонения положения пластичной зоны в каждой из зон по радиусу доменной печи определяется с помощью выражения:

$$H_{nl} = V_{cp_{max}} \cdot t_{max}$$

где  $H_{nl}$  – расстояние от уровня воздушных фурм до границы пластичной зоны, м;  $V_{cp_{max}}$  – среднее значение скорости опускания шихты за периоды между циклами с максимальными СКО скорости, превышающими среднее его значение, м/мин;  $t_{max}$  – временной интервал между циклами, характеризующимися максимальными СКО скорости по отношению к среднему его значению, мин.

Усредненные за выбранный период работы печи отклонения положения пластичной зоны в контролируемых сечениях по радиусу печи характеризуют, собственно, положение зоны, которое она занимала, в среднем, в исследуемом периоде работы. Выбор временного интервала, за который осуществляется усреднение отклонений положения пластичной зоны, учитывает время запаздывания изменения параметров доменной плавки в результате внесения управляющих воздействий, например, изменения состава шихты или программы загрузки. Такая инерционность связана с изменением структуры столба шихтовых материалов, которая, при внесении управляющих воздействий на нее, проявляется по истечении определенного времени, соответствующего проплавке шихты, занимающей рабочий объем печи. В среднем, этот промежуток времени может составлять от 5 до 10 часов, в зависимости от интенсивности плавки. Для того, чтобы реформированная структура столба стабилизировалась, необходима работа печи в этих условиях в течение не менее 8-ми часов. С учетом этих факторов, для определения положения пластичной зоны должен быть проанализирован период, продолжительностью не менее двух суток. В качестве примера на рис. 3 представлено положение линии плавления для нескольких периодов работы печи, определенное с помощью предложенного метода [16, 17]. Подтверждением достоверности и возможности использования предложенного метода для определения положения пластичной зоны явились установленные взаимосвязи положения линии плавления при различных технологических условиях плавки с характерными для них технологическими параметрами процесса.

#### ***Разработка комплексных критериев оценки процессов плавки.***

Исследования ИЧМ последнего пятилетия охарактеризовались развитием нового подхода к оценке процессов доменной плавки. Отделом технологического оборудования и систем управления совместно с отделом физико-химических проблем металлургических процессов предложены методические подходы к разработке комплексных критериев оценки процессов доменной плавки. Целесообразность таких подходов основывается на мнении известных ученых – металлургов, в частности, по мнению Е.И. Райха [31], «комплексные показатели имеют достоинство, которое не позволяет заменить их статистической совокупностью составляющих их аргументов: кроме своей наглядности и технологической осмысленности, комплексные показатели представляют собой определенный вид взаимозависимости многих переменных, которую трудно (а иногда – невозможно) заменить эквивалентной корреляционной системой, вычисленной с соблюдением принципа суперпозиции». Возможность создания таких показателей связана с оснащением доменных печей современными системами автоматизированного контроля, в частности, разработанными ИЧМ на основе научных знаний, полученных в результате фундаментальных исследований в области совершенствования технологии доменной плавки. Принятая для разработки

критериев методология заключается в разработке показателя оценки процесса и дальнейшем преобразовании показателя в критерий.

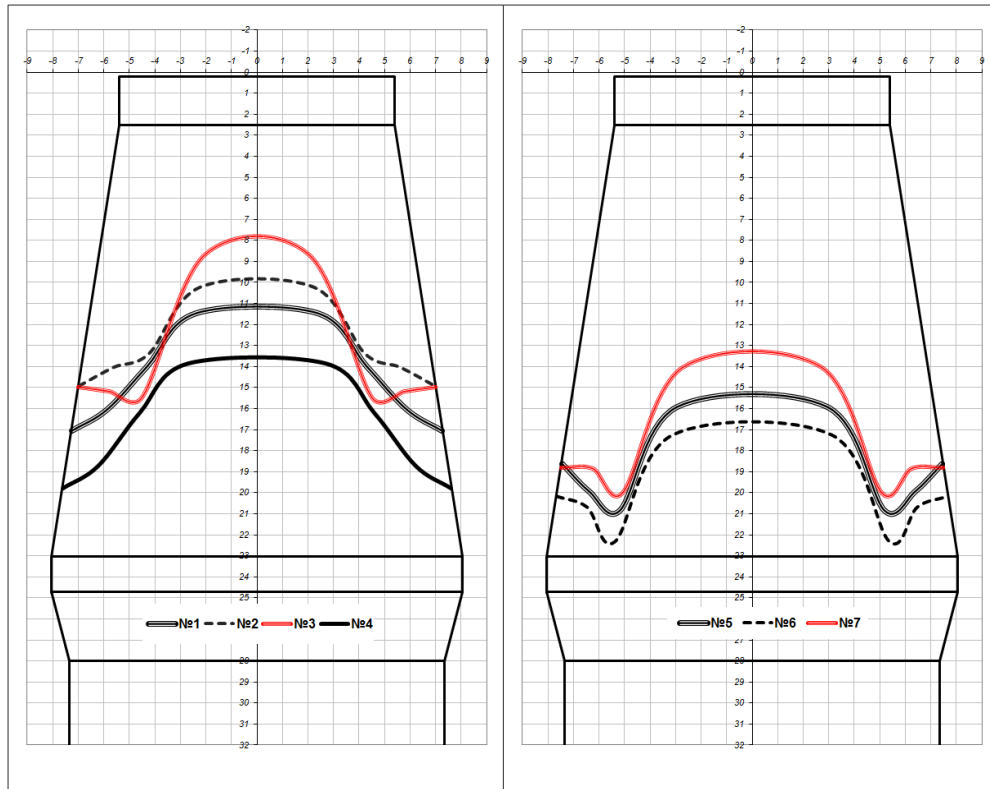


Рис. 3. Конфигурация и положение линии плавления в доменной печи для ряда исследуемых периодов ее работы

Для определения толщины пластичной зоны в настоящее время разрабатывается оригинальный метод, основанный на определении с помощью, разработанной в ИЧМ математической модели распределения компонентов шихтовых материалов в зонах сечения колошника и последующего прогнозирования изменения их физико-химических свойств в высокотемпературных зонах печи.

В статье остановимся более подробно на разработке двух критериев – оценки теплового состояния доменной плавки и газодинамического режима, обеспечение стабильности которых является необходимым условием высокой технико-экономической эффективности доменной плавки. Разработка показателя теплового состояния доменной печи основывалась на анализе параметров и показателей доменной плавки ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и обосновании выбора из них параметров, которые использованы в качестве аргументов показателя теплового состояния доменной печи, который осуществлялся на основе анализа их корреляционных зависимостей с содержанием кремния в чугуне. Для корреляционного анализа параметры, характеризующие «верх» и «низ» печи, принимаются с учетом транспортного запаздывания, которое соответствует времени пребывания шихтовых материалов и формирования жидких продуктов плавки в печи ( $\tau_{ин}$ ), зависящему от интенсивности плавки. Величина  $\tau_{ин}$  используется в качестве временного сдвига между дутьевыми параметрами и параметрами загрузки.



Как показал анализ, наибольшую тесноту связи с кремнием имеют следующие технологические параметры плавки:  $\psi_{TT}$  – относительное содержание массы твердого топлива в общей массе шихтовых материалов, загружаемых за период одного часа, (%);  $V_{ц}$  – скорость схода шихты в центральной зоне доменной печи, м/мин;  $V_{cp}$  – средняя скорость схода шихты в доменной печи, м/мин (остальные скорости исключаем из-за их тесной взаимосвязи друг с другом);  $Q_{хд}$  – расход холодного дутья, м<sup>3</sup>/мин;  $Q_{nz}$  – расход природного газа м<sup>3</sup>/мин;  $T_{кол}$  – температура колошникового газа, °С. Эти параметры отражают химическое тепло, образуемое в результате протекания восстановительно-окислительных реакций.

Помимо параметров, имеющих достаточно тесную связь с содержанием кремния в чугуне и отражающих количество тепла, образующегося в результате химических реакций, тепловое состояние печи, как было показано выше, определяет также физическое тепло, вносимое в печь с дутьем и характеризуемое следующими параметрами:  $T_{гд}$  – температура горячего дутья;  $\omega_{O_2}=(\omega+0,5\varphi)$  – полное содержание кислорода в дутье (вместе с кислородом, вносимым паром). Эти параметры не имеют связи с содержанием кремния в чугуне, но отражают тепловое состояние печи.

В обобщенном виде критерий может быть представлен произведением трех аргументов, первые два из которых характеризуют химическое и вносимое в печь физическое тепло, третий – отражает контролируемые с помощью автоматизированных систем параметры распределения шихты и газового потока:

$$K_t = f(F_1, F_2, F_3),$$

где  $F_1$  – комплекс технологических параметров, характеризующих вносимое в доменную печь физическое тепло,  $F_2$  – комплекс параметров, характеризующих химическое тепло,  $F_3$  – комплекс параметров, характеризующих распределение шихтовых материалов и (или) газового потока.

Критерий оценки теплового состояния доменной плавки определяется как среднее геометрическое аргументов, обработанных с использованием специальных математических методов (нормирования и логит-преобразования):

$$K_t = \left[ F(\psi_{TT-\tau}) \cdot F\left(\frac{1}{\omega_{O_2}}\right) \cdot F\left(\frac{1}{V_{cp-\tau}}\right) \cdot F\left(\frac{1}{V_{ц-\tau}}\right) \cdot F\left(\frac{1}{Q_{хд}}\right) \cdot F\left(\frac{1}{Q_{nz}}\right) \cdot F(T_{кол}) \cdot F\left(\frac{1}{Q_{гд}}\right) \right]^{1/8},$$

Представленный на рис. 4 график свидетельствует о тесной связи предложенного критерия теплового состояния доменной плавки с содержанием кремния в чугуне ( $R_{x,y}=0,824$ ). Как следует из рассмотрения графика, с помощью критерия с большей достоверностью ( $R_{x,y}=0,879$ ) может быть выполнена оценка теплового состояния плавки в периоды работы печи с содержанием кремния, изменяющегося в диапазоне 0,6–1,2 ед. (выделенный участок). Этот участок графика включает также регламентированное технологической инструкцией по ведению доменной плавки на ДП №9 значение кремния, изменяющееся в диапазоне от 0,6 до 0,9 ед.

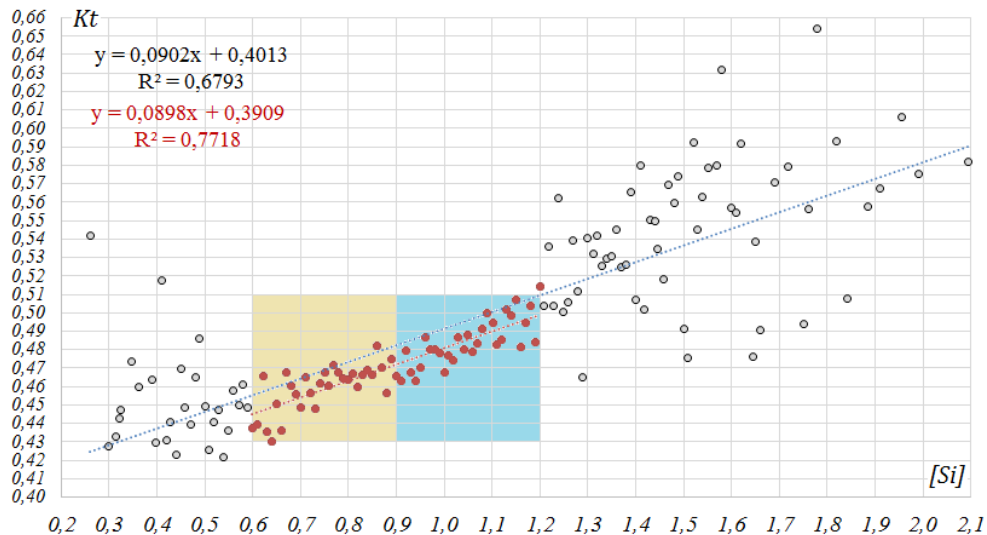


Рис.4. Зависимость критерия теплового состояния доменной плавки от содержания кремния в чугуна.

Особенностью разработанного критерия оценки теплового состояния доменной плавки является возможность на его основе прогнозировать содержание кремния в чугуна. Представленный на рис. 5 график иллюстрирует высокую достоверность прогноза кремния за время, соответствующее интенсивности плавки, т.е. время пребывания шихты в печи, что открывает возможности оперативного регулирования ходом плавки «сверху» изменением программы загрузки шихты.

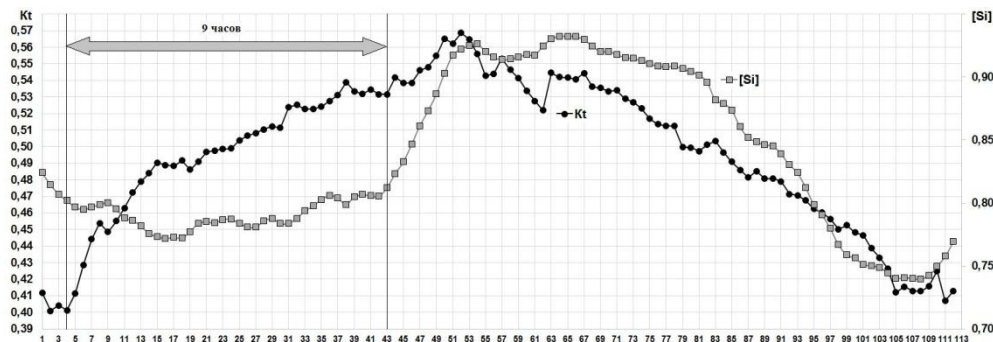


Рис.5. Изменение критерия оценки теплового состояния доменной плавки и содержания кремния в чугуна в исследуемом периоде работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Ровность хода печи обеспечивается созданием благоприятных условий для движения газового потока через столб опускающихся шихтовых материалов. Для оценки газодинамического режима печи предложен комплексный критерий, формализующий особенности распределения шихтовых материалов на колошнике и движение газового потока через столб шихты. Выбор параметров, использованных в качестве аргументов критерия оценки газодинамического режима печи, осуществлялся на основе анализа их корреляционных зависимостей с производительностью печи.

Для определения критерия оценки газодинамического режима плавки на основе принятой методологии получено выражение:

$$K_{gd2} = [F(Q_{x\partial}) \cdot F(V_{ш}^{II})]^{1/2},$$

где  $Q_{x\partial}$  – расход холодного дутья, м<sup>3</sup>/мин

$V_{ш}^{II}$  – скорость опускания шихты в центральной зоне печи, м/мин.

Представленный на рис. 6 график иллюстрирует тесную связь предложенного критерия оценки газодинамического режима печи  $K_{gd2}$  ( $r_{x,y}=0,942$ ) с величиной среднесуточного производства.

На основе принятой методологии разработан критерий оценки эффективности осевой коксовой отдушины. Известно, что распределение газового потока в печи определяется сформированными в процессе загрузки шихтовых материалов элементами структуры столба шихты. В современных условиях плавки для обеспечения ровного хода печи «раскрывают» центральную часть столба шихты, т.е. формируют осевую отдушину, которая в значительной мере определяет радиальное распределение железорудных материалов и кокса. Формирование осевой отдушины рациональной величины обеспечивает стабильность газопроницаемости шихты и ровность ее схода в различных шихтовых и дутьевых условиях.

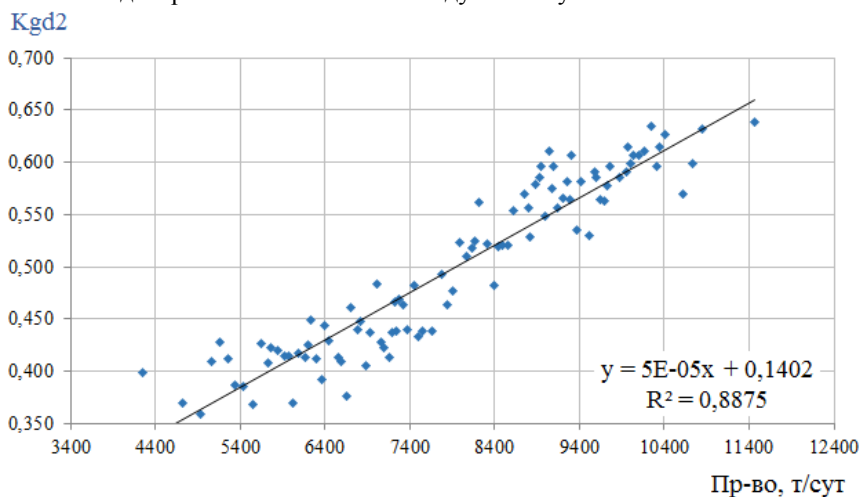


Рис.6. Изменение критерия оценки газодинамического режима плавки в зависимости от производства

Правильно организованная осевая отдушину в значительной мере обеспечивает повышение степени использования тепловой и химической энергии газового потока и, как следствие, уменьшение расхода кокса. Для формирования осевой коксовой отдушины на доменных печах, оборудованных БЗУ, используется выгрузка кокса в осевую зону печи. В ряде случаев, в частности, при ухудшении качества используемого кокса, размеры формируемой программой загрузки осевой коксовой отдушины не позволяют обеспечить достаточную газопроницаемость столба шихты, для чего требуется выгрузка порций дополнительного кокса в центральную зону печи. Для оценки эффективности осевой коксовой отдушины на основе

предложенного методического подхода разработан соответствующий критерий, представленный выражением:

$$K_0 = \left( F(N_{\text{КОКС}}^{\text{Ц}}) \cdot F\left(\frac{1}{N_{\text{КОКС}}^{\text{2П}}}\right) \right)^{1/2}$$

где  $N_{\text{КОКС}}^{\text{Ц}}$  и  $N_{\text{КОКС}}^{\text{2П}}$  – высоты слоев кокса в центральной и центрально-промежуточной зонах печи.

Обоснованием того, что оценки величины коксовой отдушины могут быть использованы высоты слоев, определяемые в зонах 2П и Ц, является близость значений площадей участков колошника, заключенных между границами этих зон и осью печи, которые составляют, соответственно, 21,4% и 2,8%, что согласуется с приведенными в литературе данными о площади осевой коксовой отдушины, которая может изменяться в пределах от 3 до 25 % площади колошника.

Установлено, что для периодов работы печи, характеризующихся осевым ходом и высокой эффективностью плавки, определяемой высоким производством и низким расходом топлива, критерий эффективности осевой коксовой отдушины изменяется в диапазоне 0,56–0,60 ед. (рис. 7).

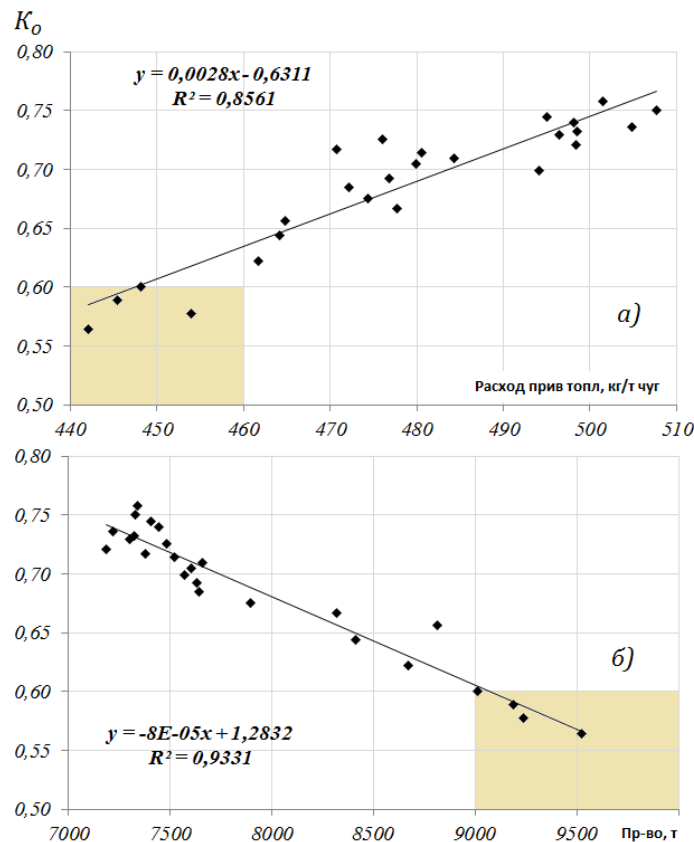


Рис.7. Изменение критерия оценки эффективности осевой коксовой отдушины в зависимости от расхода топлива (а) и суточного производства (б)

На основе принятой методологии разработан также критерий оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи. В стадии разработки

находится критерий оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи. Разработанные критерии оценки процессов являются основой функционирования разрабатываемой в настоящее время интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, что отличает ее от известных модельных систем [32]. Согласование критериев, установление оптимальных диапазонов их изменения, анализ характерных для исследуемых периодов работы печи технологических параметров и показателей плавки, выходных данных автоматизированных систем контроля, позволят осуществлять диагностику хода печи с выявлением факторов, вызывающих его нарушения, а также обосновывать принятие управляющих воздействий на ход доменной плавки. Выполняются также исследования, направленные на разработку критериев оценки процессов плавки для доменных печей, оснащенных альтернативными автоматизированными системами контроля процессов. Для этих же условий разрабатываются новые способы контроля и управления доменной плавкой, что особенно актуально в современных нестабильных шихтовых условиях ведения процесса выплавки чугуна.

Интерес с точки зрения познания процессов, происходящих в доменной печи, представляет цикл экспериментальных исследований, направленных на оценку возможности использования электрических потенциалов, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи, для анализа процессов в горне печи [33]. Исследованиями ряда авторов [34, 35] установлено, что в доменной печи в условиях отсутствия каких-либо внешних физических воздействий формируется природное электрическое поле, основой чего является 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 доменной печи мощных источников дутья и движением шихты в процессе ее проплавления. Результаты выполненных на наиболее оснащенной современными системами автоматизированного контроля ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» экспериментальных исследований показали принципиальную осуществимость метода контроля электропотенциалов и возможность использования их значений для анализа условий работы доменной печи. Установленные связи величин 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 разработки на этой основе способов управления ходом печи необходимо установить количественные связи изучаемых параметров, что требует проведения дальнейших экспериментальных исследований. 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 [36]. Установлена связь уровня приращения сигнала, регистрируемого на фурме электропотенциала, в зависимости от изменения содержания кремния в чугуне, которая может быть использована для принятия управляющих воздействий по регулированию теплового режима плавки. Полученные результаты экспериментальных исследований носят характер предварительной оценки возможности использования информации об электропотенциалах, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи. Положительный характер этих результатов свидетельствует о перспективности развития исследований в этом направлении, тем более, что предложенный метод контроля

электропотенциалов отличается простотой реализации в составе АСУ доменных печей.

#### **Источники информации**

1. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Монография. 2-е издание / Товаровский И. Г. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768 с.
2. Большаков В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В. И. Большаков – К.: Наук. думка, 2007. – 412 с.
3. Большаков В. И. Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов. – Днепропетровск: Пороги, 2013. – 364 с.
4. Доменное производство «Криворожстали». Монография под ред. чл.-корр. НАНУ В.И.Большакова / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков, Н.Г.Иванча, А.В.Кекух, Г.П.Костенко, В.С.Листопадов, Н.М.Можаренко, И.Г.Муравьева, А.С.Нестеров, Г.И.Орел, А.В.Сокуренько, Д.Н.Тогобицкая, В.А.Шеремет, С.Т.Шулико, Ф.М.Шутылев. ИЧМ НАНУ, "Криворожсталь". Дн-ск, Кр. Рог. 2004. – 378 с.
5. Контроль работы доменной печи с использованием радиоизотопного профилемера / [Шулико С. Т., Воронин Г. Ю., Бузоверя М. Т., Хомяков Э. С.] – Металл и литье Украины, 1994. – № 9–10. – С. 6–8.
6. Integrated Use of Burden Profile Probe and In-Burden Probe for Gas Flow Control in the Blast Furnace / [F. Bordemann, W.H.Hartig, H.-I.Grisse et al.] – Ironmaking Conference Proceedings, 1995. – № 54. – P.259–270
7. Эволюция современного доменного производства и внедрение прогрессивных инженерных решений / [Кармайкл Я., Тирьон К., Гоффин Р. и др.] – Сталь, 2006. – №12. – С. 8–14.
8. Технологические аспекты работы доменных печей с БЗУ “Paul Wurth” / [Тахаутдинов Р. С., Ушаков С. Н., Сединкин В. И. и др.] – Сталь, 2008. – №11. – С. 15–17.
9. Курунов И. Ф. Новые средства контроля и управления доменным процессом (по материалам 4–го Европейского конгресса по коксохимическому и аглодоменному производству) / Курунов И. Ф. – Сталь, 2001. – №8. – С. 58–62.
10. Друкентанер Г. Система оптимизации работы доменной печи «VAIRON” – экспертная система / Друкентанер Г., Шюрц Б., Шалер М. – Черные металлы, 2000. – №6. – С. 64–72.
11. The Fully Automatic Blast furnace – only a Vision? / [G.Brunnbauer, B.Rummer, H.Nograting et al.] – Ironmaking Conference Proceedings, 2001. – №3. – P.677–688
12. Инкала П. Опыт эксплуатации экспертной системы в управлении доменными печами в фирме «Раутаруукки» / Инкала П., Карппинен А., Сеппянен М. – Сталь, 1994. – №9. – С. 7–12.
13. Муравьева И.Г. Новые возможности автоматизированного управления ходом доменной печи / И. Г. Муравьева. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2010. – №. 3 – С. 126–129.
14. Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.Т. Шулико, Е.И. Шумельчик // Сталь, 2009, № 5. – С. 7–9.
15. Патент UA 99056 С2 на изобретение. Способ прогнозирования содержания кремния в чугуна / Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шумельчик Е. И., Пинчук Д. В. – заявл. 18.04.11; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13, 2012 г.

16. Патент на изобретение Украина, UA 91799 С2. Способ определения положения пластичной зоны в доменной печи / Большаков В. И., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Семенов Ю. С., Гладков Н. А., Пинчук Д. В., Дмитренко К.А. – заявл. 30.06.09; опубл. 25.08.10, Бюл. № 16, 2010 г.
17. Метод оперативного контроля положения пластичной зоны в доменной печи / [Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Гладков Н. А., Белошапка Е. А., Наследов А. В.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2011. – № 8. – С. 38–44.
18. Метод оценки газодинамического режима доменной плавки, основанный на информации радиолокационного профилемера / [Муравьева И.Г., Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Пинчук Д.В.] – «Известия вузов. Черная металлургия», 2012. –№. 3, С. 24–29.
19. Методика определения скоростей опускания шихты по сечению колошника доменной печи //В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.Т. Шулико, Е.И. Шумельчик /Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008, №2. – С. 114 – 118.
20. Жеребин Б. Н. Практика ведения доменной печи / Жеребин Б. Н. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.
21. Пыжов В. Т. Характер схода шихты в доменной печи / Пыжов В. Т. –Известия вузов. Черная металлургия, 1984. – №4. – С. 5–9.
22. **Готлиб А. Д., Доменный процесс** / Готлиб А. Д. – Гостехиздат УССР, 1958. – 165с.
23. Контроль работы доменной печи с использованием радиоизотопного профилемера / [Шулико С. Т., Воронин Г. Ю., Бузовера М. Т., Хомяков Э. С.] – Металл и литье Украины, 1994. – № 9–10. – С. 6–8.
24. А.с. СССР 827545. Способ ведения доменной плавки / Некрасов З. И., Бузовера М. Т., Хомич И. Т. / Опубликовано 07.05.81, бюллетень №17.
25. 4. Теплотехника доменного процесса / [Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Суханов Е. Л., Овчинников Ю. Н., Швыдкий В. С.] – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
26. Гуденау Г. В. Влияние пластичной зоны на распределение газового потока в доменной печи / Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. – Черные металлы, 1979. – № 22. – С. 7–13.
27. Клемперт В. М. Контроль и управление газораспределением доменной печи / Клемперт В. М., Френкель М. М., Гришкова А. А. – М: Металлургия, 1993. – 142с.
28. Работа доменной печи в форсированном режиме / [Гришкова А. А., Клемперт В. М., Федулов Ю. В., Быльева Л. П.] – Сталь, 1987. – № 9. – С. 17–22.
29. Никитин Г. М. Формирование вязкопластичной зоны – как способ эффективного управления доменным процессом: диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.16.02 / Геннадий Михайлович Никитин. – Екатеринбург. – 1996. – 306 с.
30. Аналитическое исследование положения пластичной зоны и связи ее параметров с движением поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи. / [Большаков В. И., Товаровский Й.Г., Муравьева И. Г., Семенов Ю.С.] – Теория и практика металлургии, 2011. – №.1-2 – С.3–8.
31. Автоматический контроль и регулирование теплового режима доменной плавки: Труды второй научно-технической конференции молодых исследователей черной металлургии, 15 – 18 октября 1968 г. / Е. И. Райх. – М.: Металлургия, 1971. – С. 96– 99.
32. Экспертные системы управления доменной плавкой/ **Большаков В.И.**, Тогобицкая Д.Н., Можаренко Н.М., Иванча Н.Г., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И.] –

- Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия», Москва, 2015. – № 9. – С. 25–32.
33. Экспериментальная оценка возможности использования электрических потенциалов, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи, для анализа процессов в горне / [Большаков В. И., Семькин С. И., Муравьева И. Г., Поляков В. Ф., Семенов Ю. С., Голуб Т. С., Дудченко С. А., Прокопенко П. Г., Костюк Ю. Б.] – Металлург, 2013. – №. 11 – С. 29 – 35.
34. Обзор исследований образования в доменной печи электродвижущей силы / [Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Семькин С. И., Белошапка Е. А., Голуб Т. С., Дудченко С. А.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2012. – Вып. 26.
35. Дорофеев В.Н., Новохатский А.М. О возникновении разности электропотенциалов на кожухе доменной печи / Известия Вузов. Черная металлургия, 1984, №1. – С. 24 – 28.
36. Исследование возможности использования электрических потенциалов в горне доменной печи для оценки теплового состояния / [Ю.С. Семенов, И.Г. Муравьева, В.Ф. Поляков, С.И. Семькин, В.В. Горупаха, А.В. Наследов, П.Г. Прокопенко, Н.М. Сапрыкин, А.С. Хайбулаев] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2015. – Вып. 30.