

ПРОЕКТ 7.2

Розробка і реалізація у складі АСУ доменної печі, обладнаної безконусним завантажувальним пристроєм і сучасною системою вимірювання профілю поверхні засипу шихти, автоматизованих способів контролю, прогнозу і управління плавкою

УДК 669.162.21-52.008.6.083.133

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ В СОСТАВЕ АСУ ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ, ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВКОЙ

Академик НАН Украины **В.И. БОЛЬШАКОВ**, **И.Г. МУРАВЬЕВА**, **Д.Н. ТОГОБИЦКАЯ**, доктора техн. наук,
Ю.С. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук, **Е.А. БЕЛОШАПКА**, **Е.И. ШУМЕЛЬЧИК**, млад. науч. сотрудники
(Ин-т черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины)

Разработан и проходит опытно-промышленное опробование способ управления тепловым состоянием горна доменной печи, основанный на прогнозировании содержания кремния в чугуна с помощью стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, а также включающий возможность прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в условиях нестабильной работы печи с помощью разработанного целевого критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника.

Ключевые слова: горн доменной печи, тепловое состояние, содержание кремния в чугуна, способы контроля, прогноза и управления плавкой, комплексный критерий, футеровка металлоприемника

Продолжительность кампании доменной печи в значительной степени определяется стабильностью протекания процессов доменной плавки. В современных условиях, характеризующихся ухудшением качества шихтовых материалов как железосодержащих, так и кокса, уменьшением использования в дутье природного газа и заменой его топливными добавками, обеспечить стабильную работу печи можно на основе оперативного принятия управляющих воздействий на ход процесса. Основным условием обоснования принимаемых технологических решений по ведению доменной плавки является получение объективной информации о параметрах технологического процесса. Установка на доменных печах устройств измерения профиля поверхности засыпи позволила расширить возможности контроля процесса плавки. Опыт эксплуатации современной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» показал ее широкие технологические возможности, выходящие за рамки только контроля формируемой на колошнике поверхности засыпи шихты [1, 2]. Полученная профиломером информация может быть использована для прогноза процессов доменной плавки, а также принятия технологических решений по ее управлению.

Тепловое состояние доменной печи является одним из основных показателей доменной плавки,

определяющих расход топлива на выплавку чугуна, производительность печи и химический состав чугуна [3]. Поэтому оценка изменения теплового состояния доменной печи является важной задачей ведения процесса плавки. Одним из основных параметров, с помощью которого оценивают изменение теплового состояния печи, является содержание кремния в чугуна на выпуске из доменной печи. В связи с этим возможность оперативного прогнозирования содержания кремния в чугуна по ходу плавки является важным этапом к осуществлению регулирования теплового состояния доменной печи.

В Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины разработан способ прогнозирования содержания кремния в чугуна за 3 часа до выпуска его из печи, в основу которого положены установленные в результате экспериментальных исследований взаимосвязи изменения скорости опускания шихты в осевой зоне с содержанием кремния в чугуна [4, 5]. Как показали исследования, изменение скоростей в осевой зоне печи характеризуется временными участками с явно выраженными направленными изменениями в большую или меньшую сторону. Из анализа содержания кремния в чугуна на выпусках следует, что через 2–3 часа после определения среднечасовой скорости происходит адекватное изменению скорости изменение содержания кремния, причем увеличению (уменьшению) скорости соответствует уменьшение (увеличение) содержания кремния на выпуске через 2–3 часа.

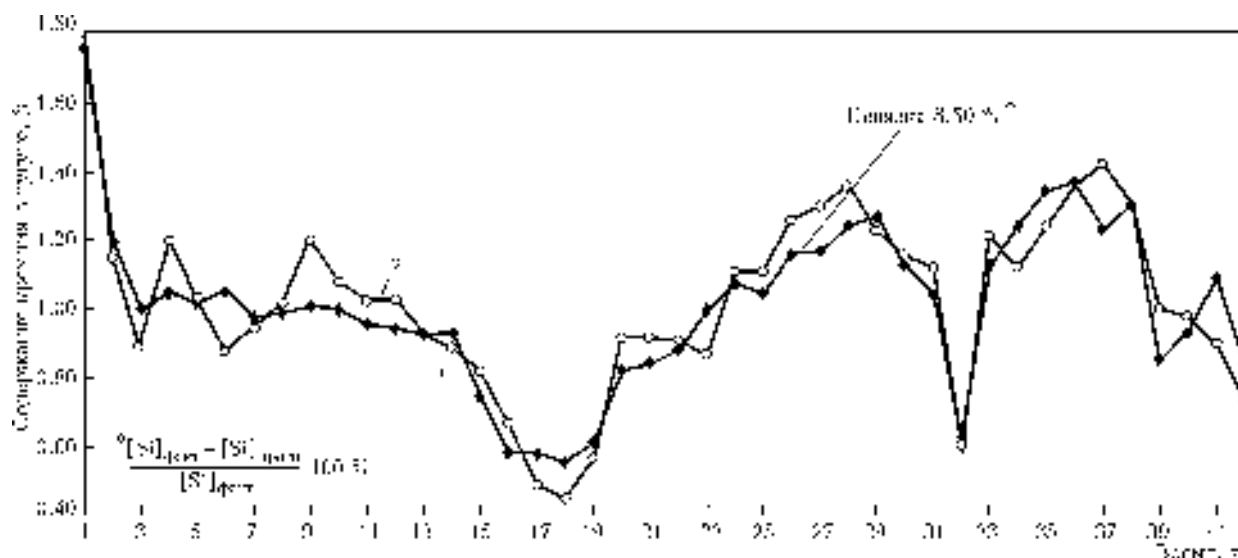


Рис. 1. Изменение прогнозируемых (1) и фактических (2) значений содержания кремния в чугуне на выпусках

В течение периода опробования способа в составе АСУ ДП № 9 его алгоритмы претерпели изменения. Так, изначально прогноз кремния был основан на расчете текущего значения содержания кремния на величину $\Delta[Si]_{\text{п}}^v$, представляющую изменения содержания кремния в чугуне на единицу скорости опускания шихты, принятую 0,001 м/мин и определяемую в зависимости от характерных диапазонов изменения скорости опускания шихты. Как показали результаты работы этого алгоритма, использование при прогнозировании содержания кремния в чугуне табличных значений коэффициентов $\Delta[Si]_{\text{п}}^v$ ограничивает получение достоверных данных при выходе величины Δv^{II} за установленные диапазоны. Поэтому следующим этапом развития способа прогнозирования явилось приведение табличных значений коэффициентов к функциональной зависимости $\Delta[Si]_{\text{п}}^v$ от Δv^{II} . Использование разработанного способа прогнозирования содержания кремния в чугуне в исследуемых периодах работы печи показало невязку прогнозируемых и фактических значений, составившую в среднем 20 %, что, по нашему мнению, является следствием влияния на прогнозируемое значение кремния ряда технологических показателей плавки,

влияние которых не отразилось на скорости опускания шихты.

Вследствие этого в рамках выполнения проекта программы «Ресурс» был усовершенствован способ прогнозирования содержания кремния в чугуне. В результате выполнения регрессионного анализа прогнозируемого содержания кремния в чугуне, которое является критериальным значением, и технологических параметров плавки, используемых в качестве регрессоров анализа, установлено, что на содержание кремния в чугуне за 3 часа до его выпуска, кроме скорости опускания шихты в осевой зоне колошника v^{II} , оказывают влияние: текущее содержание кремния в чугуне $[Si]_{\text{тек}}$, содержание пара в дутье (т/ч) $Q_{\text{п}}$, теоретическая температура горения T_f и средняя рудная нагрузка PH . Исходя из этого, прогнозируемое содержание кремния в чугуне предложено определять в соответствии с регрессионным выражением.

$$[Si]_{\text{прог}} = av_i^{\text{II}} + bT_f + c[Si]_{\text{тек}} + d(PH_j) + eQ_{\text{п}k} + f(r_{x,y} = 0,810), \quad (1)$$

где a, b, c, d, e, f – весовые коэффициенты, значения которых зависят от технологических условий плавки; $v_i, PH_j, Q_{\text{п}k}$ – скорость опускания шихты в осевой зоне колошника, средняя рудная нагрузка и содержание пара в дутье, соответствующие максимальным коэффициентам корреляции с текущим содержанием кремния в чугуне, которые определяются на основании построения взаимнокорреляционных функций.

Индексы i, j и k обозначают временные сдвиги, соответствующие максимальным коэффициентам корреляции параметров $v_i, PH_j, Q_{\text{п}k}$ с текущим содержанием кремния в чугуне, и составляют 3–8, 4–8 и 0–4 часа для v_i, PH_j и $Q_{\text{п}k}$ соответственно.

График, приведенный на рис. 1, иллюстрирует изменение «невязки» прогнозируемого и фактического значений содержания кремния в чугуне.

Как следует из рисунка, отклонение прогнозируемого значения содержания кремния отличается

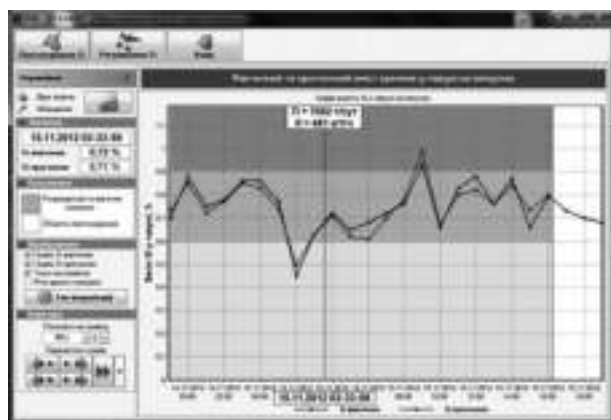


Рис. 2. Видеокادر "Прогноз [Si]"

от фактических его значений в среднем на $\pm 8,50\%$.

На основе усовершенствованного способа прогнозирования содержания кремния в чугуна за 3 часа до его выпуска разработано программное обеспечение и алгоритм реализации в составе АСУ ДП № 9 (видеокадр подсистемы прогноза кремния приведен на рис. 2), а также инструкция пользователя САК «Прогнозирование содержания кремния в чугуна на выпусках».

Критерии, по которым оценивают тепловое состояние горна доменной печи, свидетельствуют о произошедшем изменении и нарушении теплового равновесия. Для того чтобы нарушения равновесия не произошло, необходимо предупреждать нарушения теплового равновесия, изменяя рудную нагрузку (регулирование «сверху») или параметры дутья (регулирование «снизу»). Полученные результаты по использованию информации профилемера для прогнозирования содержания кремния в чугуна на выпусках позволили разработать способ регулирования теплового состояния доменной печи, предусматривающий обеспечение (восстановление) заданного теплового режима гола печи с помощью изменения рудной нагрузки, а также возможность теплового регулирования доменной плавки по отклонениям регулируемых параметров воздействием параметров дутья на нагрев горна. Выбор принятых регулирующих воздействий, в частности, влажности дутья, определяется относительно малой инерционностью их воздействия на нагрев горна доменной печи. Наибольший эффект от такого регулирования может быть получен в том случае, если установление регулирующих воздействий будет осуществляться на основе прогнозируемых отклонений нагрева горна от заданного уровня, определяемых с помощью разработанного в рамках выполнения проекта способа прогнозирования содержания кремния в чугуна, основанного на информации стационарной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике.

Для оценки текущего нагрева горна использовано содержание кремния в чугуна. Причем согласно технологической инструкции по ведению доменной плавки для условий ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» допустимый диапазон изменения содержания кремния в чугуна составляет 0,6–0,9 ед.

На основе статистического анализа представительной выборки параметров и показателей доменной плавки (47 суток) установлены следующие рекомендации по изменению рудной нагрузки в зависимости от диапазонов исходных значений содержания кремния в чугуна: для $[Si] < 0,5\%$ уменьшение рудной нагрузки на 1,16 т/т соответствует увеличению $[Si]$ на 0,76 %, для $[Si] = 0,50–0,59\%$ уменьшение рудной нагрузки на 0,62 т/т соответствует увеличению $[Si]$ на 0,59 % и для $[Si] = 0,60–0,80\%$ уменьшение рудной нагрузки на

0,55 т/т соответствует увеличению $[Si]$ на 0,37 %, а также рекомендации по изменению влажности дутья на единицу прогнозируемого изменения содержания кремния в чугуна: увеличение влажности дутья на 3,0 г/м³ соответствует уменьшению $[Si]$ на 0,36 %.

В настоящее время способ проходит опытно-промышленное опробование в условиях ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Одним из основных аспектов регулирования теплового состояния горна доменной печи является обеспечение сохранности футеровки и необходимой толщины гарнисажа. Именно состояние футеровки определяет техническое состояние горна, и как следствие, продолжительность срока службы доменной печи [6]. Возможность прогнозирования толщины футеровки особенно важна при возникновении нестандартных ситуаций, в частности, вывода печи на нормальный ход после ее аварийной остановки. Для осуществления прогноза необходима разработка целевого критерия воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи, который позволит контролировать составляющую теплового потенциала горна доменной печи, воздействующую на футеровку металлоприемника (комплексный критерий воздействия расплавов на футеровку металлоприемника). С точки зрения продления кампании доменной печи важным является наличие объективной информации, которая может быть получена с помощью комплексной системы мониторинга состояния горна. Такая система мониторинга состояния горна разработана Институтом черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины и реализована в составе АСУ ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» — система контроля теплового состояния системы охлаждения и остаточной толщины футеровки металлоприемника «Разгар» (далее система «Разгар») [7]. Она использует фактические данные, поступающие от установленных в металлоприемнике печи термопар, и рассчитывает фактическую толщину футеровки, что позволяет технологам принимать оперативные меры в соответствии с возникшей ситуацией.

Значительную опасность для сохранности футеровки горна и лещади доменной печи представляют периоды промывок, которые осуществляют в случаях загромождения горна, вызванного ухудшением в горне фильтрующей способности кокса из-за его низкой прочности либо аварийные ситуации, вызванные вынужденной остановкой печи по причине оползания гарнисажа шахты. Именно один из таких периодов работы ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» явился основой для исследований, направленных на установление взаимосвязи изменения содержания кремния в чугуна, принятого в качестве критерия теплового состояния горна доменной печи, с тепловыми нагрузками, определяемыми системой «Разгар».

Разработку комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприем-

ника осуществляли на основе установления функциональных зависимостей технологических параметров и показателей, определяющих тепловое состояние горна, от значения суммарных тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника и температур кладки, по которым рассчитывается остаточная толщина футеровки [8]. При разработке критерия оценки изменения тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади в зависимости от интенсивности изменения содержания кремния (комплексного критерия воздействия расплавов на футеровку металлоприемника) во внимание принимали следующие параметры и показатели плавки, контролируемые в АСУ ДП №9 и определяющие тепловое состояние низа доменной печи: $[Si]$ — среднесуточное содержание кремния в чугуне, ед.; $\Delta Q_{\text{сум}}$ — суммарные тепловые нагрузки на металлоприемник доменной печи, Вт; $V_{\text{к.г}}$ — выход колошникового газа, м³/мин; $O_{\text{сн}}$ — полная основность шлака $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$, ед.; $[C]/C_{\text{нас}}$ — отношение содержания углерода в чугуне к углероду насыщенному, ед; ρ — стехиометрия шлака, ед.; $D_{\text{гар}}$ — толщина гарнисажа, м.

Содержание углерода в чугуне рассчитывали по эмпирической формуле, полученной в нашем институте: $[C] = 4,6 - 0,27[Si] - 0,32[P] + 0,03[Mn] - 0,032[S]$, где $[Si]$, $[P]$, $[Mn]$, $[S]$ — содержание соответственно кремния, фосфора, марганца и серы в чугуне, %.

Надежность соотношений между расчетными значениями и основными показателями плавки оценивали с помощью взаимно корреляционных функций, описывающих в динамике характер взаимосвязей между значениями отдельных параметров и тепловыми нагрузками системы охлаждения горна и лещади. Определение параметров и показателей доменной плавки, которые могут быть аргументами в выражении критерия теплового состояния низа доменной печи, осуществляли путем установления тесноты взаимосвязи суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади последовательно с каждым из аргументов.

Для построения критерия использован известный метод группового учета аргументов, который разрабатывается академиком НАН Украины А.Г. Ивахненко и его школой уже более 40 лет и является типичным методом индуктивного моделирования и одним из наиболее эффективных методов структурно-параметрической идентификации сложных объектов, процессов и систем по данным наблюдений в условиях неполноты информации [9].

Основным параметром оценки теплового состояния низа доменной печи принято содержание кремния в чугуне, что послужило основанием для его использования в качестве аргумента в выражении критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника. Кремний с коэффициентом 0,83 определяет размер гарнисажа в ниж-

ней части доменной печи при нестабильном ходе печи, а с коэффициентом корреляции 0,70 — тепловые нагрузки на холодильники металлоприемника доменной печи.

Основываясь на выполненном обосновании выбора параметров для разработки критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и результатах анализа взаимной корреляции параметров теплового состояния низа доменной печи, в качестве аргументов критерия выбраны следующие параметры: $[Si]$, $V_{\text{к.г}}$, $O_{\text{сн}}$, $[C]/C_{\text{нас}}$.

С помощью метода группового учета аргументов получен критерий оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи в виде

$$K = 0,798[Si] + \frac{[C]/C_{\text{нас}}}{O_{\text{сн}}V_{\text{к.г}}} [2,024 - 0,938[Si]]. \quad (2)$$

Более высокие значения коэффициентов корреляции критерия с тепловыми нагрузками $-0,806$ и с толщиной гарнисажа $0,866$ по сравнению с их значениями, полученными при содержании кремния в чугуне с тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника $-0,70$ и с толщиной гарнисажа $0,78$, свидетельствуют о том, что использование предложенного критерия позволяет комплексно описать воздействие расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи.

На основе предложенного комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника для исследуемого периода работы ДП № 9 определена взаимосвязь суммарных тепловых нагрузок с критерием (рис. 3), а также зависимость толщины гарнисажа от критерия K (рис. 4). Исходя из представленной на рис. 4 зависимости могут быть определены граничные условия изменения комплексного критерия, ограничивающие негативное воздействие расплавов на футеровку металлоприемника и сохраняющие требуемую толщину гарнисажа ($0,2-0,3$ м), служащего защитой от теплового разгара и эрозионного разрушения. Как следует из рис. 4, граничные условия изменения комплексного критерия могут быть представлены в виде $1,0 \leq K \leq 1,2$. Полученные для условий нестационарной работы ДП № 9 граничные условия изменения комплексного критерия могут быть уточнены в результате дальнейших исследований.

Как показали результаты исследований, между толщиной гарнисажа и критерием существует достаточно тесная взаимосвязь, которая характеризуется коэффициентом корреляции $0,87$. На основе этой взаимосвязи может быть предложен следующий метод прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа. Метод основан на использовании разработанного ранее

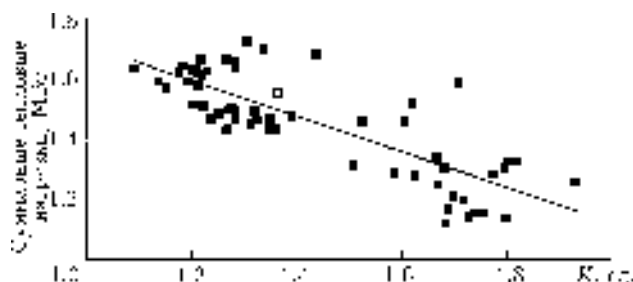


Рис. 3. Взаимосвязь суммарных тепловых нагрузок с критерием K при $R_{x,y} = -0,806$

способа прогнозирования содержания кремния в чугуне и включает [6]:

- прогнозирование содержания кремния в чугуне за 3 часа до выпуска и соответственно прогнозирование с высокой достоверностью 0,8 комплексного критерия оценки воздействия расплавок на футеровку металлоприемника;
- определение с достоверностью 0,87 (согласно зависимости, представленной на рис. 2) значения толщины гарнисажа металлоприемника;
- сопоставление прогнозируемого значения критерия с граничными условиями его изменения и принятие соответствующих технологических решений, направленных на дальнейший разогрев горна либо на его стабилизацию на достигнутом уровне.

Использование предложенного метода позволит избежать чрезмерных промывок, вызывающих избыточное расплавление гарнисажа, которое приводит к дальнейшему разрушению футеровки, а это в свою очередь уменьшает продолжительность кампании печи, а в критическом случае приводит к прорыву горна. Кроме контроля сохранности футеровки, установленные взаимосвязи содержания кремния в чугуне с тепловыми нагрузками системы охлаждения горна и лещади могут быть использованы при оптимизации массы промывочных порций кокса, что в итоге будет способствовать его экономии. Как показывает зависимость толщины гарнисажа от комплексного критерия, представленная на рис. 4, рациональной толщине гарнисажа, изменяющейся в диапазоне от 0,2 до 0,3 м, соответствуют минимальные значения критерия оценки воздействия расплавок на футеровку металлоприемника печи. При установившейся работе печи, когда футеровка металлоприемника не испытывает возмущений, приводящих к ее разрушению, предложенный критерий не может быть использован.

В перспективе предусматривается расширить метод регулирования теплового состояния горна доменной печи возможностью прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа.

Таким образом, при выполнении проекта для условий доменной печи, оснащенной стационарной системой измерения профиля поверхности засыпи

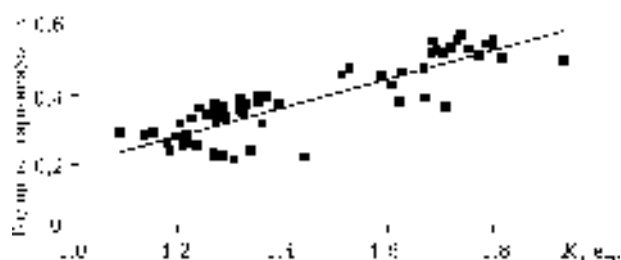


Рис. 4. Зависимость толщины гарнисажа от комплексного критерия $R_{x,y} = -0,866$

шихты, разработаны автоматизированные способы прогнозирования содержания кремния в чугуне (реализован в составе АСУ ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог») и способ управления тепловым состоянием горна, основанный на прогнозировании содержания кремния в чугуне и включающий возможность прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа, с помощью разработанного целевого критерия оценки воздействия расплавок на футеровку металлоприемника (способ проходит опытно-промышленное опробование). Реализация разработанных при выполнении проекта способов автоматизированного контроля и управления плавкой в составе АСУ ДП № 9 позволяет обосновать выбор управляющих воздействий на ход процесса, направленных на обеспечение ровного и стабильного хода доменной печи, и в итоге, на увеличение кампании печи.

1. *Использование информации профилера для выбора управляющих воздействий на ход доменной плавки* / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов и др. // Черн. металлургия. — 2006. — № 5. — С. 29–34.
2. *Муравьева И.Г.* Новые возможности автоматизированного управления ходом доменной печи // Металлургическая и горнорудная про-сть. — 2010. — № 3. — С. 126–129.
3. *Доменное производство* / А.Н. Похвиснев, В.С. Абрамов, Н.И. Красавцев, Н.К. Леонидом. — М.: ГНИЛ ЧЦ, 1951. — 707 с.
4. *Пат. UA 82305 С2 Украина.* Способ прогнозирования содержания кремния в чугуне / В.И. Большаков, С.Т. Шулико, И.Г. Муравьева и др. — Опубл. 25.03.08, Бюл. № 6, 2008.
5. *Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи* / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов и др. // Сталь. — 2009. — № 5. — С. 7–9.
6. *Савчук Н.А., Курунов И.Ф.* Доменное производство на рубеже XXI века // Новости черн. металлургии за рубежом. — 2000. — Ч. II. Приложение 5. — 42 с.
7. *Система контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГТМК «Криворожсталь»:* Теория и практика производства чугуна / Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.В. Панчоха и др. // Труды междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию КГТМК «Криворожсталь». — 2004. — С. 511–514.
8. *Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавок на футеровку металлоприемника доменной печи* / И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Е.А. Белошайка и др. // Системні технології. — 2012. — Вип. 2. — С. 63–74.
9. *Ивахненко А.Г.* Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. — Киев: Техніка, 1975. — 311 с.