

УДК 669.162.263

О.П. Онорин¹, Н.А. Спири², В.В. Лавров²,
И.Е. Косаченко³, В.Ю. Рыболовлев³

¹ОАО «Уральский институт металлов» (г. Екатеринбург)

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

³ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ОЦЕНКА ФОРМЫ ЗОНЫ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ МАСС ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Представлена характеристика математической модели, позволяющей оценивать расположение и форму зоны вязкопластичных масс железорудных материалов (зону когезии) в доменной печи, осуществлять диагностику ее рациональной конфигурации по реально доступной информации о работающей печи для базового периода, а также решать комплекс задач для проектного периода при изменении режимных параметров плавки. Приведены результаты моделирования для базового и проектного периодов.

Ключевые слова: доменное производство, математическое моделирование, теплообмен, вязкопластичное состояние, железорудные материалы, конфигурация зоны когезии.

SHAPE ESTIMATION ZONE VISCOPLASTIC MASS ORE MATERIALS IN THE BLAST FURNACE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING

Abstract. The characteristic of the mathematical model is presented, allowing to size up location and form of zone of viscous-plastic masses of iron-ore materials (plastic zone) in blast furnace, to carry out diagnostic of its rational configuration based on really accessible information on working blast furnace for the base period, and to solve complexity of problems for the design period with change in operating conditions of melting. Results of modeling for the base and the design periods are given.

Keywords: blast furnace production, mathematical modeling, heat exchange, viscous-plastic conditions (state), iron-ore materials, plastic zone configuration.

По современным представлениям, газопроницаемость столба шихты в доменной печи определяется положением и формой зоны вязкопластичных масс (зоны когезии), выше которой располагается слой шихты в кусковом состоянии, ниже – слой кокса со стекающим расплавом чугуна и шлака. Зона вязкопластичных масс представлена чередующимися слоями железорудного материала (ЖРМ) и кокса; только наличие слоев кокса (коковых окон) обеспечивает ее газопроницаемость. Слои ЖРМ, находясь в вязкопластичном состоянии, непроницаемы для газового потока. Наличие коковых окон в объеме этих масс подтверждается исследовани-

ями «замороженных» доменных печей. Об этом говорят и косвенные доказательства – загрузка в доменную печь предварительно смешанных рудных материалов с коксом, приводящая к разрушению коковых окон, увеличивает газодинамическое сопротивление зоны когезии и снижает производительность печи более чем в 1,85 раза.

На рис. 1 приведены возможные формы зон пластичности с отображением характера газовых потоков, пронизывающих эти зоны [1 – 3].

Из представленных форм зоны когезии наиболее благоприятной для получения высокой производи-

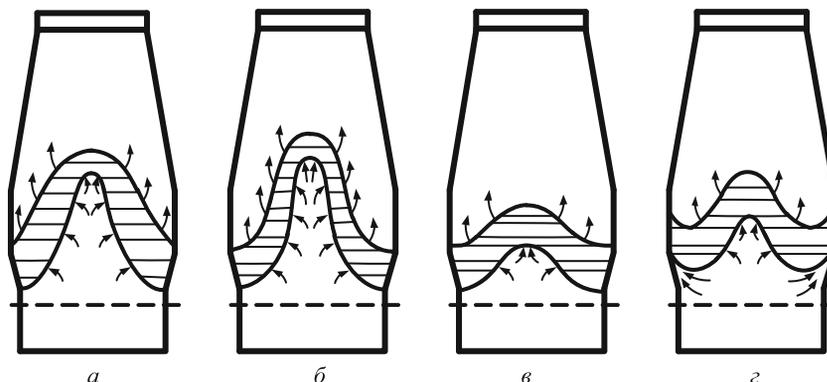


Рис. 1. Формы зоны вязкопластичных масс и характер газовых потоков в доменной печи:
а – «J-образная» с большим количеством коковых окон; б – суженная «J-образная» зона; в – горизонтальная расположенная зона пластичности; з – «W-образная» зона пластичности

ности печи и низкого удельного расхода кокса является форма суженная «Л-образная» (рис. 1, б), при которой достигается высокая стойкость огнеупорной кладки печи. Во всех других случаях показатели плавки остаются более низкими либо из-за малого количества коксовых окон и низкой вследствие этого газопроницаемости слоя, ограничивающей подачу дутья в печь, либо из-за близкого расположения кладки печи к выходящим из зоны пластичности горячим газам. Форма зоны пластичности и ее расположение в профиле печи определяются факторами, основными из которых являются распределение рудной нагрузки по сечению колошника, а также характеристики вязкопластичности железорудных материалов: температуры начала размягчения и расплавления (появление текучего шлакового расплава). Максимально возможная производительность может быть достигнута при наилучшей форме зоны пластичности, наименьшей толщине этой зоны, а также при хорошей фильтрации расплавов в зоне, расположенной ниже зоны пластичности.

Несмотря на расширение возможностей определения положения пластичной зоны в доменной печи, в том числе и с помощью математического моделирования [4 – 13], актуальными остаются вопросы создания методов оперативного контроля ее положения и оценки изменения в процессе плавки.

В основу разработки математических моделей доменного процесса положен известный принцип возмущенного-невозмущенного движения [14]. Модель доменного процесса условно можно разделить на две части: модель базового состояния и прогнозирующую модель (модель в малом). Модель базового состояния позволяет оценивать состояние процесса по фактическим усредненным показателям за базовый период работы печи. Прогнозирующая модель с использованием результатов, полученных с помощью модели базового состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения условий плавки [15, 16]. Главное внимание при разработке этой модели было уделено моделированию теплового, дутьевого, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки, особенности неравномерности распределения материалов и газов, и зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов не находили должного отражения в этой модели. Структура модели подсистемы моделирования расположения и конфигурации зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов представлена на рис. 2.

Для базового периода решается несколько последовательных задач.

Определение распределения рудной нагрузки по сечению колошника. Для этого используют данные результатов расчета моделей загрузки при использовании безконусных засыпных устройств, при отсутствии такой возможности задача решается по косвенным показателям – либо по распределению диоксида углерода,

либо температуры в поперечном сечении колошника. При этом приняты допущения, что распределение рудной нагрузки пропорционально содержанию диоксида углерода и обратно пропорционально распределению температур.

Определение скорости и расхода газа в кольцевых сечениях заплечиков и колошника печи. По данным измерений верхнего и нижнего перепадов давлений, а также полученном распределении рудной нагрузки производят расчет соотношения масс и объемов железорудных материалов и кокса, степени уравнивания (СУ) шихты газом, расходов и скоростей движения газа в кольцевых сечениях колошника печи. Для расчета скоростей фильтрации газа в кольцевых сечениях шахты используют уравнение Эгона, связывающее изменение сопротивления слоя шихты с параметрами шихты и газа. Обеспечивается расчет следующих показателей: объема кокса и ЖРМ в кольцевых сечениях; порозности слоя шихты в каждом кольцевом сечении зоны когезии и зоны фильтрации расплавов; скорости газа в расчетном сечении заплечиков; объемного расхода газа в кольцевых сечениях заплечиков; объемного расхода газа, проходящего через расчетные кольцевые сечения на колошнике; удельного выхода фурменного газа; средней скорости фильтрации газа в заплечиках. По мере движения шихты от колошника печи к фурменным зонам размер кусков шихты уменьшается. Учтено, что в зависимости от фракционного состава загружаемого кокса, размер кусков его, приходящего к фурмам, снижается в 1,14 – 1,40 раза.

Расчет толщины коксового окна в районе заплечиков, степени заполнения коксовой насадки шлаком, порозности коксовой насадки и порозности зоны когезии; расчет выхода, состава и свойств первичного шлака, их распределение по радиусу печи. Толщину коксового окна в районе заплечиков определяют по объему кокса в рассматриваемом вертикальном сечении заплечиков и площади поперечного сечения середины заплечиков.

Расчет теплообменных процессов в верхней и нижней зонах печи. Задавая теплотехнические характеристики используемых компонентов шихты, находят параметры, определяющие теплообменные процессы как в нижней, так и верхней зонах теплообмена с расчетом изменения температуры шихты и газа в нижней ступени теплообмена по кольцевым зонам.

Определение характеристик вязкопластичности ЖРМ: температуры начала размягчения (плавления) и расплавления (появления подвижного шлакового расплава). При наличии экспериментальных данных о характеристиках вязкопластичности применяемых ЖРМ в модели используют фактические, а не расчетные данные.

Определение расположения и конфигурации зоны пластичности. Используя модель расчета зоны пластичности по полям температуры шихты в кольцевых зонах низа печи, находят изотермы, соответствующие температурам начала размягчения и расплавления



Рис. 2. Структура подсистемы моделирования зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов

ЖРМ. По найденным значениям определяют расположение и конфигурацию зоны пластичности в профиле печи для базового варианта.

Выполнение диагностики рациональной конфигурации и расположения по высоте зоны вязкопластичных масс (зоны когезии).

Далее рассматриваются прогнозные варианты.

Вносят изменения в режимные параметры плавки: состав и свойства железорудного сырья, режим

загрузки печи, распределение рудной нагрузки по радиусу, дутьевые параметры (температура, влажность, содержание кислорода, расход природного газа) плавки, фильтруемость шлака, фракционный состав кокса и его характеристики прочности (M_{25} , горячая прочность, истираемость M_{10} и др.).

Рассчитывают весь комплекс параметров аналогично базовому режиму, осуществляют диагностику работы печи и выполняют расчеты по изменению про-

изводительности печи и удельного расхода кокса в прогнозном периоде с использованием корректировочных коэффициентов.

Необходимость блока «Настройка» в структуре модели, включающего подсистемы «Нормативно-справочная информация», «Настройка диагностики», обусловлена требованиями настройки модели на конкретные условия функционирования системы.

Основные формулы расчета комплекса указанных параметров приведены в работах [15 – 18].

Ниже приводится пример решения описанной задачи применительно к доменной печи № 10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). Основные показатели работы печи приведены в таблице.

Параметры работы доменной печи № 10 ОАО «ММК» в базовом периоде

Показатель	Значение показателя
Производство чугуна, т/сут	4555
Расход кокса (сухой скиповый), кг/т чугуна	474
Расход железорудных материалов, кг/т чугуна	1656
Доля окатышей в железорудной части шихты, кг/кг	0,25
Параметры дутья:	
расход, м ³ /мин	3450
давление, ат.	2,8
температура, °С	1150
содержание кислорода, %	28,42
расход природного газа, м ³ /т чугуна	85,5
Параметры колошниковога газа:	
давление, ат.	1,48
температура, °С	155
Состав газа, %:	
CO ₂	20,25
CO	25,1
H ₂	7,59
Состав чугуна, %:	
Si	0,64
Mn	0,34
S	0,022
C	4,74
Выход шлака, кг/т чугуна	325
Состав шлака, %:	
CaO	35,02
SiO ₂	36,18
Al ₂ O ₃	13,39
MgO	9,82
MnO	0,41
FeO	0,22

Железорудная часть шихты включала агломерат ММК и соколовские окатыши, химический состав которых приведен ниже:

Элемент	Содержание, %, элемента	
	в агломерате ММК	в окатышах ССГОКа
Fe	56,970	63,080
Mn	0,270	0,160
S	0,039	0,031
P	0,027	0,013
CaO	8,890	1,040
SiO ₂	6,070	5,100
Al ₂ O ₃	2,020	1,700
MgO	2,020	1,000
FeO	12,060	3,730
TiO ₂	0,260	0,300

Распределение диоксида углерода и расчетное изменение рудной нагрузки по сечению колошника приведены на рис. 3, а результаты расчетов расположения и конфигурации зоны вязкопластичных масс железорудных материалов представлены на рис. 4.

Толщина зоны когезии изменяется от 2,04 м в кольцевых сечениях с высокой рудной нагрузкой до 3,09 м в центральной части столба шихты. Это – значительная толщина и она обусловлена высоким значением температурного интервала плавления $\Delta t_{пл} = 379\text{ }^\circ\text{C}$ применяемых железорудных материалов. Вследствие высокого значения температуры расплавления (появления подвижного шлакового расплава) $t_p = 1477\text{ }^\circ\text{C}$ нижняя граница зоны пластичности опускается практически до зон горения. Формирование конечного шлака, когда в шлаковый расплав, вышедший из зоны пластичности, поступает зола сгоревшего кокса, происходит в этом случае в ограниченной зоне за малый промежуток времени. В базовом варианте настоящей работы распределение рудной нагрузки соответствовало форме изотерм и зоны пластичности (рис. 1, з), которая получила название «W-образной». Такая форма наблюдается в том случае, когда на печи устанавливается умеренно развитый периферийный и центральный потоки газа. При

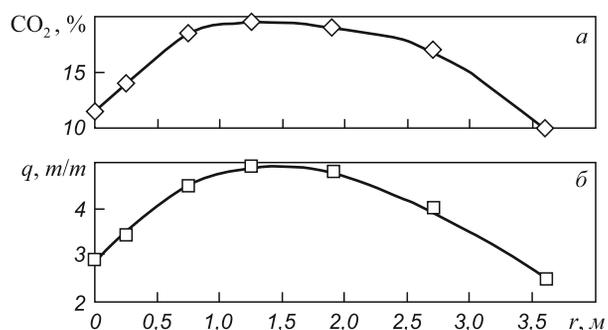


Рис. 3. Изменение содержания диоксида углерода (а) и рудной нагрузки q (б) по радиусу r колошника доменной печи № 10 ММК

указанной форме зоны пластичности невозможно получение высокой производительности, а также низкого расхода кокса, сложно уберечь и огнеупорную кладку от высокого теплового воздействия газами. Толщина коксового окна в районе заплечиков для рассматриваемой печи ориентировочно составляет 260 мм. Только часть коксовых окон является сквозными (всего 4 – 5 окон), а остальные являются практически непроводящими для газа, поскольку не имеют выхода в рабочее пространство печи.

Как видно из рис. 5, в верхней зоне печи шихта уравновешена газовым потоком до $SU = 33,17\%$ в районе рудного гребня и до $44,18\%$ в центральных участках столба шихты, где насыпная масса шихты минимальна при максимально допустимых 55% [15, 16]. В нижней зоне печи шихтовые материалы также не доведены до «кипящего» состояния – степень уравновешивания шихты газовым потоком в центральной зоне печи достигает $77,92\%$, и только наличие выше располагающегося слоя материалов обеспечивает состояние плотного слоя в нижней части печи. Сравнительно невысокие значения SU в верхней части печи обусловлены невысоким расходом газа (малым расходом дутья), движущегося через слой шихты. Это, в свою очередь, связано с высоким газодинамическим сопротивлением зоны пластичности (когезии). В связи с этим в прогнозных вариантах рассматривается изменение параметров, влияющих на газодинамическое сопротивление нижней зоны печи.

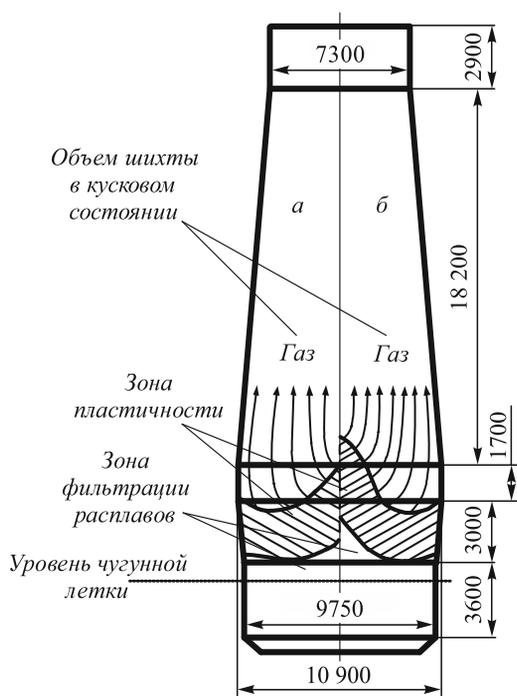


Рис. 4. Положение зоны пластичности в объеме доменной печи № 10 ММК при различной организации газораспределения: а – при изменении содержания диоксида углерода по радиусу колошника, принятого для базового варианта плавки; б – при изменении режима загрузки для прогнозного варианта

Определяющей в газодинамическом отношении зоной является низ печи – зона пластичности. На это указывают и расчеты по определению степени уравновешивания шихты газом в кольцевых сечениях печи для низа и верха столба шихты (рис. 5).

В качестве примера рассмотрено изменение размеров зоны когезии при выплавке чугуна с использованием только агломерата ММК, исключив из шихты окатыши. Безусловно, этот вариант плавки приводится только для показа влияния характеристик вязкопластичности на размеры зоны пластичности. Здесь не учитывается снижение содержания железа в шихте, неизбежность корректировки состава агломерационной шихты для поддержания требуемой основности шлака и т.д. на важнейшие показатели доменной плавки. Другие параметры плавки также не корректировались, т.е. оставались такими же, как в базовом периоде. Форма и расположение зоны пластичности при сопоставлении базового варианта (плавка агломерата ММК в смеси с соколовскими окатышами) с прогнозным, когда из шихты исключены окатыши, а плавка осуществляется только на агломерате ММК, показана на рис. 6. При переводе режима работы печи с выплавки рудной смеси агломерата ММК с соколовскими окатышами на выплавку чугуна из агломерата ММК с исключением неофлюсованных окатышей ССКОГа, как показывают расчеты, возможно увеличение минутного расхода дутья на 30% по сравнению с базовым вариантом.

На рис. 7 показано изменение содержания диоксида углерода и рудной нагрузки по сечению колошника, которое предполагало развитие осевого газового потока в проектном периоде. Сопоставление формы зон пластичности при умеренно развитом периферийном и осевом движении газового потока с газораспределением, когда раскрывается центральная зона печи, показывает, что зона пластичности смещается вверх в центральных участках шихты и несколько опускается вниз в кольцевых зонах с высоким значением рудной нагрузки. Это наглядно видно при построении расчетной конфигурации зон пластичности для базового и прогнозных вариантов (рис. 4, б).

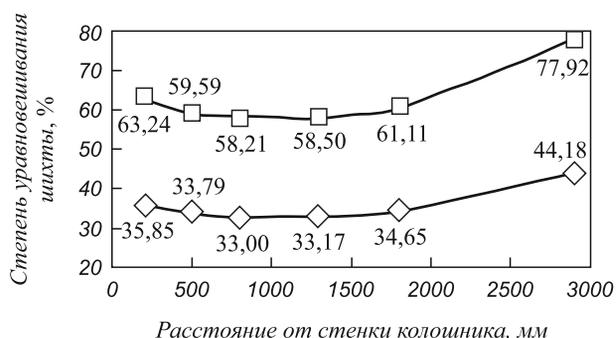


Рис. 5. Изменение степени уравновешивания шихты газом в кольцевых сечениях колошника: □ – низ печи; ◇ – верх печи

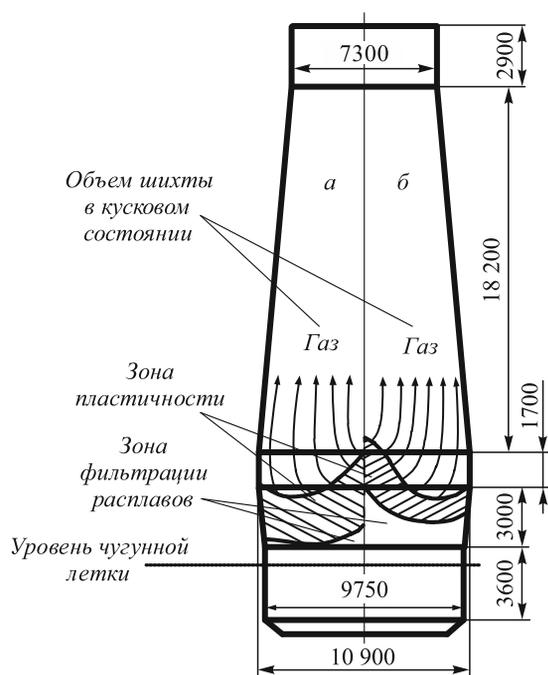


Рис. 6. Форма и размеры зон пластичности при плавке смеси агломерата ММК и соколовских окатышей (а) и при плавке только агломерата ММК с исключением из шихты окатышей (б)

При создании осевого газового потока, когда наблюдается поднятие зоны пластичности в центральной части печи, формируется дополнительный участок для прохождения газа в зоне пластичности, в которой возможно движение газа из нижней зоны (из зоны фильтрации расплавов) печи по сквозным коксовым окнам в зону потока шихты и газов (показано стрелками). Расчеты показывают, что возрастание числа проникаемых для газа коксовых окон позволяет в прогнозном периоде при такой же степени уравнивания шихты газом, как и в базовом, увеличить расход дутья, а значит, и увеличить производительность доменной печи на 5,4 %.

Выводы. Разработанная математическая модель позволяет оценивать расположение и форму зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи по реально доступной информации о работающей печи, осуществлять диагностику ее рациональной конфигурации, а также решать комплекс прогнозных задач при изменении режимных параметров плавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю.С. *Металлургия чугуна*. – М.: ИКЦ Академкнига, 2004. – 774 с.
2. *Blast furnace Phenomena and modeling* / Ed. By Yasuo Omori. Elsevier applied science. – London and New York, 1987. – 631 p.
3. Вегман Е.Ф. *Доменное производство: Справочное издание. Т. 1 Подготовка руд и доменный процесс*. – М.: Metallurgia, 1989. – 496 с.
4. Инада С., Кабаяси И., Исабэ М. // Тэцу то хаганэ. 1984. Т. 34. № 4. С. 59 – 64.
5. Хатига С., Оно Р., Фусэ К. и др. // Тэцу то хаганэ. 1986. Т. 36. № 3. С. 77 – 80.

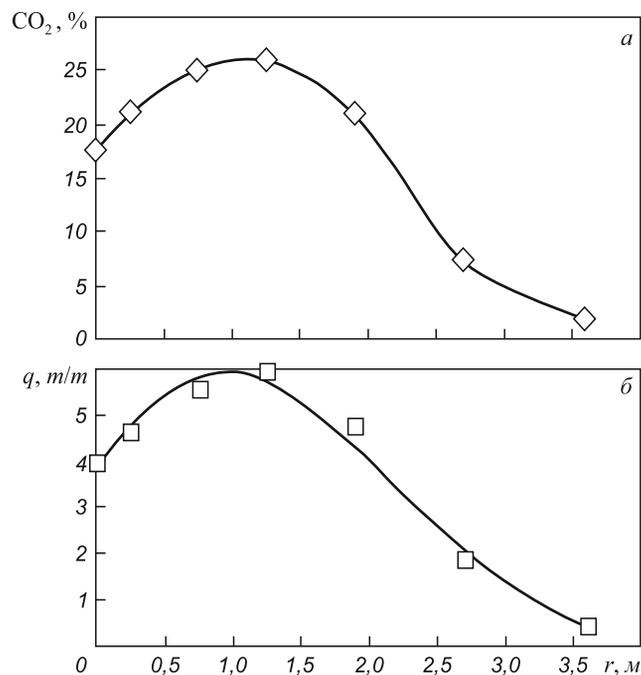


Рис. 7. Изменение содержания диоксида углерода (а) и расчетной величины рудной нагрузки q (б) по радиусу r колошника доменной печи в прогнозном варианте

6. Vecchida G., Giuli M. // *Revue de Metallurgie – CIT*. 1984. Vol. 81. № 5. P. 369 – 383.
7. Peters K.H., Alperer W., Bachhofen H.Y. et al. // *Stahl and Eisen*. 1984. Bd. 104. № 14. С. 59 – 62.
8. Yamamoto T., Shokyu T., Kanoshima H. et al. // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1982. № 10. P. 774.
9. Ohno Y., Kondo K., Fukushima T. // *Revue de Metallurgie. CIT*. 1983. № 10. P. 809 – 825.
10. Kyle I. *Proceeding Conference September 11 – 13. 1979. London. 1980. P. 403 – 415.*
11. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е. *Аналитические исследования доменной плавки*. – Днепропетровск: ЧМП «Экономика», 2011. – 206 с.
12. Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Гладков Н.А. // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2011. № 8. С. 38 – 44.
13. Добросок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1985. № 3. С. 145, 146.
14. *Теория и практика прогнозирования в системах управления* / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – Кемерово; М.: Издат. объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
15. *Компьютерные методы моделирования доменного процесса* / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев и др.; Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
16. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки* / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2011. – 462 с.
17. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. *Теплообмен в доменной печи*. – М.: Metallurgia, 1966. – 355 с.
18. *Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки* / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 1995. – 243 с.

© 2013 г. О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, И.Е. Косаченко, В.Ю. Рыболовлев
Поступила 22 января 2013 г.