

А.С.Нестеров, А.Ф.Хамхотько, А.И.Белькова, А.С.Скачко

АКТУАЛИЗАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью работы является анализ сырьевых условий доменного производства Украины в сравнении с мировыми производителями. Выполнена актуализация базы данных «Железорудные материалы» банка данных «Металлургия», содержащей сведения о металлургических свойствах агломератов и окатышей и уточнены модели для их прогнозирования в современных условиях доменной плавки. Разработанные модели обеспечивают удовлетворительную точность прогнозирования свойств для практических целей.

агломерат, окатыши, свойства железорудных материалов, доменная плавка

Состояние вопроса. Одним из основных факторов повышения технико-экономических показателей доменной плавки является производство и использование в шихте высококачественного железорудного сырья, химический состав и свойства которого оказывают существенное влияние на параметры и качество продуктов доменной плавки. В настоящее время, в сырьевом сегменте мировой экономики произошли существенные изменения. Исчерпали себя месторождения богатых железных руд, чистых по примесным элементам. В промышленности в основном используют комплексные полиметаллические руды, при этом ограничиваться извлечением одного–двух элементов по повсеместно применяемым технологиям перестало быть возможным по ресурсоэкономическим соображениям. При плавке руд все большее значение приобретает «предыстория» руды. Недаром все большую популярность приобретает подход к качеству чугуна с точки зрения его «генетики», а понятие «генетические свойства металла» стало постоянно использоваться металлургами [1].

В конце XX века окончательно сформировался такой мировой рынок сырья, когда металлургические предприятия работают с 10 и более поставщиками, что существенно затрудняет оптимизацию технологических режимов переработки и плавки сырья. Несмотря на лидирующее место Украины по разведанным запасам железных руд, железорудная минерально–сырьевая база Украины отличается низким качеством и худшими условиями разработки по сравнению с аналогами в странах с рыночной экономикой [2].

Целью работы является анализ сырьевых условий доменного производства Украины в сравнении с мировыми производителями.

Изложение основных материалов исследования. Для оценки металлургической ценности железорудного минерального сырья европейскими потребителями действуют мировые стандарты (в настоящее время по железным рудам их 38) [2], по которым оценивают химический состав

и физические свойства. По химическому составу основными показателями качества продукции является содержание железа, кремнезема, фосфора, марганца, алюминия, серы, титана, кальция и магния, меди, фтора, натрия и калия, мышьяка, свинца и цинка. Не менее важны при этом показатели, определяющие физические, физико-химические и физико-механические свойства. Таким образом, важными требованиями к железорудному сырью являются химическая чистота рудного материала, способность обогащаться почти до мономинеральных концентратов, свободных от вредных примесей и соответствие содержания шлакообразующих оксидов к требованиям дальнейшей переработки. В работе [2] проанализирована минерально-сырьевая база и железорудная продукция горнодобывающих предприятий Украины и мира, которые разрабатывают месторождения в железисто-кремнистых формациях (табл.1, рис.1,2).

Таблица 1. Химический состав железорудного минерального сырья основных горнодобывающих предприятий Украины и мира

Страна, фирма	Химический состав, %										
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Основ- нов-	Na ₂ O	K ₂ O	P	S	MnO
Бразилия, Samarco	67,0	1,8	1,1	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,004	0,03
Австралия, Newman	66,7	2,8	1	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,044	0,06	0,1
Швеция, Malmbergt Greensberg	71,5 70,6	0,2 0,9	0,21	0,06	0,2	0,63 0,00	0,03	0,04	0,01	0,01	0,13
Канада, ОСМ	66,3	5,00	0,34	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,026	0,03
Fire lake	66,5	5,00	0,15	0,51	0,36	0,17	0,02	0,02	0,1	---	0,1
Kerol lake	65,8	4,44	0,15	0,53	0,38	0,2	0,00	0,00	0,008	0,005	0,1
Мавритания, Tielvs	65,7	8,15	0,18	0,41	0,2	0,07	0,14	0,13	0,01	0,032	0,02
Россия, ЛебГОГ	68,4	4,34	0,17	0,16	0,2	0,08	0,2	0,1	0,001	0,034	0,62
Кастамук.	67,6	5,73	0,26	0,17	0,17	0,06	0,07	0,06	0,015	0,371	---
Украина: ш.Гигант	65,7	7,1	0,19	0,15	0,34	0,07	0,22	0,1	0,018	0,04	0,05
ЮГОК	65,2	8,78	0,18	0,42	0,6	0,11	0,19	0,1	0,007	0,054	0,05
ЦГОК	65,6	7,2	0,25	0,19	0,38	0,08	0,09	0,08	0,007	0,04	0,04
СевГОК	64,5	9,64	0,35	0,17	0,39	0,06	0,13	0,1	0,012	0,023	0,03
ИнГОК	64,9	9,7	0,56	0,29	0,6	0,09	0,12	0,1	0,019	0,118	0,03
НКГОК	65,6	7,7	0,1	0,25	0,36	0,08	0,2	0,14	0,011	0,054	0,03

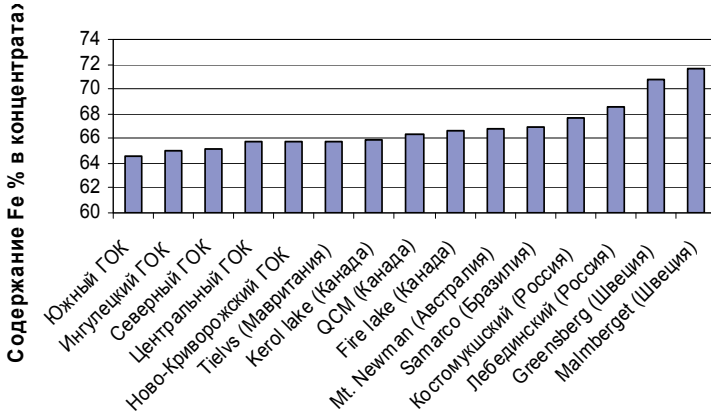


Рис.1. Содержание железа в концентратах железнорудных предприятий Украины и мира.

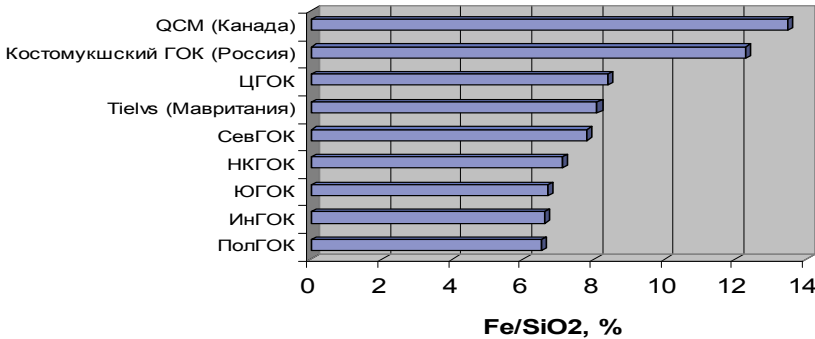


Рис.2. Оценка рейтинга качества концентрата железнорудных предприятий Украины и мира.

В настоящее время в Украине разведано более 50-ти промышленных месторождений железных руд, которые представлены тремя основными типами: богатыми мармитовыми и магнетитовыми рудами, железистыми кварцитами (магнетитовыми и окисленными), бурыми железняками (осадочными морскими в Керченском железнорудном бассейне, и переотложенными, которые образованы за счет первых двух типов руд, в Криворожском железнорудном бассейне). Из них эксплуатируются 23 месторождения, остальные – резервные, или не намеченные к освоению в ближайшее время. Ниже приведены химические составы железных руд и их концентратов для некоторых из месторождений (табл.2 и 3) [3], а также данные химических составов агломерата и окатышей на различных предприятиях Украины (табл.4,5).

Таблица 2. Химический состав железных руд

Месторождение	Содержание, %								
	Fe	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	S	П.п.
Керченское:									
коричневые руды	40,8	2,01	1,11	19,20	5,10	2,21	1,06	0,3	12,6
табачные руды	40,7	1,15	1,38	16,25	6,75	1,12	1,05	0,21	11,8
Криворожское	55,0	0,20	0,10	17,00	2,40	0,06	0,06	0,02	1,5

Таблица 3. Химический состав концентратов железных руд

ГОКи	Содержание, %									
	Fe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	S	TiO ₂
Ингулецкий	63,7	26,7	0,30	0,70	9,90	0,40	0,03	0,02	0,09	0,04
Южный	64,6	26,4	0,2	0,36	8,90	0,22	0,02	0,01	0,02	0,04
Ново-Криворожский	65,7	27,0	0,25	0,30	7,80	0,30	0,02	0,01	0,03	0,05
Центральный	64,8	19,4	0,25	0,10	8,40	0,70	0,02	0,06	0,03	0,06
Северный	65,2	26,7	0,50	0,30	8,50	0,20	0,02	0,01	0,03	0,04
Полтавский	64,8	27,4	0,30	0,55	8,80	0,30	0,03	0,01	0,05	0,04

Таблица 4. Химический состав доменного агломерата

Аглофабрики	Химический состав, %										
	Fe	FeO	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O	CaO/SiO ₂
Енакиевский МК	48,64	10,8	0,03	8,67	0,96	17,26	1,45		0,017	0,09	1,99
Азовсталь	52,8	12,6	0,23	7,98	0,87	13,8	1,53	0,075	0,017	0,08	1,73
ММК им. Ильича	52,6	15,4	0,16	9,6	0,94	12,5	1,45	0,073	0,019	0,08	1,30
ЮГОК	54,2	11,61		9,28	1,31	11,44	1,23	0,05	0,03		1,23
Запорожсталь	52,8	11,1		9,1	0,77	12,91	0,75				1,42

Таблица 5. Химический состав окатышей

ГОК	Химический состав, %										
	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	S	P	K ₂ O	CaO/SiO ₂
Полтавский	62,8	1,2	8,51	0,37	0,37	0,69		0,02	0,02	0,09	
Полтавский (Ф)	64,6	1,0	6,34	0,33	0,40	0,76		0,02	0,02	0,07	0,03
Северный	62,1	9,8	7,13	0,50	2,69	0,8	0,09	0,072	0,07	0,08	0,51
ЦГОК	63,8	3,4	4,75	0,44	2,90	0,7	0,08	0,92	0,09	0,08	0,50

Приведенные данные свидетельствуют о том, что содержание железа в концентратах горнодобывающих предприятий Украины ниже, чем в концентратах зарубежных горнопромышленных компаний. Конкурентоспособной в настоящее время на мировом рынке считается железорудная продукция, содержащая 67–68 % железа (при содержании кремнезема до 4–5 %) [4]. Что касается показателей украинского товарного концентрата, то их уровень, оставаясь практически неизменным за последние годы, по содержанию железа на 3–4 % ниже аналогичной импортной продукции; по содержанию кремнезема на 4–6 % выше, чем в продукции зарубежных производителей. Существенным отрицательным фактором использования концентрата при производстве агломерата и окатышей является высокое содержание влаги (более 9 %) и кремнезема. Поэтому отечественные производители производят агломерат и окатыши более низкого качества, что влечет за собой повышенные затраты по переделам, и, в конечном итоге, снижают конкурентоспособность как на рынке сырья, так и на рынке металлопродукции. Кроме того, качество отечественного железорудного сырья не соответствует уровню зарубежных конкурентов не только по содержанию железа, но и высокому содержанию диоксида кремния, повышенному содержанию оксидов натрия и калия, низкой основности и прочности окатышей.

Методика прогнозирования металлургических свойств железорудного сырья. Важность оперативной оценки металлургических свойств железорудного сырья и отсутствие на отечественных предприятиях соответствующих установок для испытания материалов обусловили работу по созданию в Институте черной металлургии базы данных «Железорудные материалы» [5] с целью обобщения результатов экспериментальных исследований и разработки моделей для прогнозирования свойств железорудных материалов, пригодных для широкого использования, в частности, для совершенствования методов управления производством высококачественного сырья и продуктов доменной плавкой.

База данных «Железорудные материалы» создана в 1990 г. в рамках развития банка данных «Металлургия» на основе накопленных в ИЧМ собственных экспериментальных данных и литературных публикаций других авторов. К 2001 году в базе собраны и систематизированы сведения о химсоставах и свойствах более 750 различных железорудных материалов (окатышей, руд, агломератов) с глубиной поиска 30 лет. В базу были введены 77 источников информации, в том числе данные о свойствах материалов в исходном состоянии (плотность, пористость, ударная прочность, истираемость, гранулометрия, сопротивление сжатию) и свойствах, характеризующих процесс восстановления (восстановимость, степень металлизации, размягчаемость, прочностные и теплофизические характеристики и др.).

Для актуализации базы данных «Железорудные материалы» к настоящему времени проанализирована данные об их составе и свойствах,

опубликованные за последние 12 лет в журналах «Сталь», «Известия ВУЗов Черная металлургия», «Металлургическая и горнорудная промышленность», Бюллетень «Черная металлургия» и «Металлург». Согласно разработанному стандарту представления экспериментальных данных в базе в виде паспортов соответствующей структуры подготовлено 12 паспортов (рис.3), включающих данные: о 60 химических составах и свойствах агломератов и окатышей, полученными на ряде предприятий стран СНГ, в частности, на ОАО «МК «Азовсталь», заводе им. Петровского, в условиях ОАО «НЛМК», Западно-Сибирского меткомбината [6–11] и др. При этом отбираются только источники информации, содержащие одновременно сведения о составе и свойствах материалов, что необходимо для последующего решения задач прогнозирования свойств.

Некоторые материалы о плавкости, прочности, восстановимости представлены в виде сопутствующих экспериментальным данным авторизированных моделей, описывающих зависимости этих свойств от компонентного химического состава. Недостаток таких уравнений заключается в том, что они обеспечивают достоверность и точность расчетов только в условиях конкретной выборки составов, использованных для их выводов, не учитывают структуру железорудных расплавов, и анализ их физического смысла затруднен. В значительной мере дискуссионный характер выводов анализа экспериментальных данных в подобных случаях обусловлен несовершенством применяемой методологии исследования взаимосвязи состава многокомпонентных систем с комплексом их свойств.

Созданная база данных явилась основой для последующей разработки моделей для решения задач прогнозирования свойств железорудных материалов на основе их химического состава с использованием физико-химических параметров межзатомного взаимодействия [5]. В соответствии с методикой прогнозирования свойств железорудных материалов ранее были созданы модели для расчета металлургических свойств агломератов и окатышей в зависимости от содержания в них Fe_2O_3 , FeO и параметров ρ и $\Delta\epsilon$, характеризующих структуру и свойства шлаковой связки системы в виде уравнений: Свойство = $f(\rho, \Delta\epsilon, \text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ [12]. При этом были использованы результаты определения на установках ИЧМ следующих металлургических свойств агломератов и окатышей всех окомковательных фабрик стран СНГ: прочность по выходу кондиционной фракции +5 мм (X_{+5} , %); истираемость по выходу класса 0,5–0 мм ($X_{0,5}$, %); степень восстановления ($R_{\text{св}}$, %) и металлизации ($\omega_{\text{св}}$, %) при 800⁰С (по ГОСТ 19575–84) и при 1050⁰С, усадка слоя (ΔH , %), перепад давления газового потока (ΔP , Па) при восстановлении слоя под нагрузкой (по ГОСТ 21707–76).

В результате пополнения БД «Железорудные материалы» новыми опубликованными экспериментальными данными с расширением диапазонов изменения химического состава и свойств ранее полученные уравнения для расчета свойств в настоящей работе были уточнены. Диапазон содержания компонентов и свойств изученных материалов приведены в

табл.6,7. Характеристики прогнозных уравнений для расчета свойств агломератов и окатышей представлены в табл.8. Точность прогноза свойств по новым уравнениям в сравнении с моделями авторов работы [12] представлена на рис.4 на примере показателей горячей прочности агломерата X_{+5} и усадки слоя ДН.

Документ 55(1)

КС = железорудный агломерат, обожженный сидеролезит, холодная прочность, сопротвление истиранию
 АВТОРЫ = Носов С.К., Крупин М.А., Меламуд С.Г., Бобров В.П., Волков Д.Н., Сухарев А.Г., Шацило В.В., Дудчук И.А.
 НАЗВАНИЕ = Способ производства железорудного агломерата
 ИЗДАНИЕ = Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень. - 2006. - №25. - с.556
 РЕФЕРАТ = Изобретение относится к области металлургического производства, в частности к способам получения агломерата для доменного передела. В шихту вводятся железосодержащие материалы, оборотные продукты металлургического производства, флюсы и твердое топливо, их смешивают, увлажняют, окомковывают и зажимают шихту продуктами горения газообразного и жидкого топлива и спекание при температурах 1320-1500 С.
 РЕФЕРЕНТ = Скачко А.С.
 ЭКСПЕРТ = к.т.н. Хамхотыко А.Ф.
 НАИМЕНОВАНИЕ (СЫРЬЯ, МИНЕРАЛА) = агломерат
 МЕСТОРОЖДЕНИЕ, ПРЕДПРИЯТИЕ = ОАО "Высокогорский горно-обогатительный комбинат"
 МЕТОДИКА = Холодная прочность определялась по ГОСТ 15137-77 (выход фракции +5 мм). Сопротивление истиранию определялось по ГОСТ 15137-77 (выход фракции -0,5 мм). Оценка восстановимости агломерата выполнялась при 800 оС по ГОСТ 19576-76
 ПРИМЕЧАНИЕ = P1 - прочность на удар по кл. более 5 мм по ГОСТ 15137-77. P2 - истирание по кл. менее 0,5 мм по ГОСТ 15137-77. P3 - мелочь 5-0 мм по ГОСТ 15137-77. P4 - выход кл. более 10 мм после восстановления по ГОСТ 19576-76. P5 - истираемость кл. менее 0,5 мм после восстановления по ГОСТ 19576-76. P6 - размер аемость кл. 0,5-5,0 мм после восстановления по ГОСТ 19576-76. S - степень восстановления при 800 оС по ГОСТ 19576-76. V - вязкость первичного доменного шлага при плавлении агломерата в доменной печи при 1400 оС, пуаз

Хим. состав и свойства агломерата, мас.%(16,6)

Fe	FeO	CaO	SiO2	MgO	Al2O3	S	CaO/SiO2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	S	V
55,1	13,6	8,9	7,7	1,8	2,5	0,060	1,16	62,9	6,2	8,7	12,0	26,2	35,0	52,8	6,0
55,0	13,3	8,6	7,5	2,4	2,5	0,050	1,15	63,0	5,7	8,8	14,5	19,0	31,2	53,0	5,5
55,1	13,1	8,5	7,4	2,6	2,4	0,048	1,15	63,2	5,5	8,6	15,0	16,5	28,7	54,0	4,6
55,1	13,1	8,5	7,4	2,6	2,4	0,048	1,15	60,0	6,7	8,6	14,0	19,2	34,0	54,0	4,6
55,1	12,8	8,2	6,9	3,1	2,5	0,046	1,19	64,0	5,7	8,5	20,0	15,5	25,0	57,0	4,5
55,1	12,5	8,0	6,7	3,7	2,5	0,045	1,19	64,0	5,3	8,5	23,0	15,0	27,0	43,0	15,0

Рис.3. Документ базы данных «Железорудные материалы»

Таблица 6. Диапазон содержания компонентов (в %)

Материал	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃
Агломерат	4-13	6-20	0,5-5	1-5,5	0-2,5	6-36	35-77
Окатыши	3-11	0,6-9,9	0-2,5	1-5,9	-	0,5-8,5	75-91

Таблица 7. Диапазон изменения свойств

Материал	X ₊₅ , %	X _{-0,5} , %	R ₈₀₀ , %	ω ₈₀₀ , %	ΔH, %	ΔP, Па	R ₁₀₅₀ , %	ω ₁₀₅₀ , %
Агломерат	18-89	2,5-27	13-47	4-37	8-44	6-69	43-91	26-88
Окатыши	36-99	1,0-36	27-75	5-64	14-60	0-1960	35-95	17-94

Таблица 8. Характеристики уравнений: Свойство = $A_0 + A_1 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + A_2 \cdot \text{FeO} + A_3 \cdot \Delta\epsilon + A_4 \cdot \rho$

Свойство	Коэффициенты уравнения					Коэффициент корреляции R	№ уравнения
	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4		
Агломераты							
X_{+5}	167,051	-1,629	-0,986	-1,907	4,535	0,78	1
$X_{-0,5}$	18,46	0,34	-0,044	3,25	-30,36	0,79	2
R_{800}	-16,197	0,909	0,307	0,241	-20,125	0,82	3
ω_{800}	-179,78	0,482	-0,01	-15,4	183,41	0,79	4
ΔH	203,6	-0,872	-1,518	-3,877	-156,563	0,67	5
ΔP	182,713	0,067	-0,236	-3,072	-220,985	0,69	6
R_{1050}	10,310	0,405	-0,187	4,923	66,021	0,68	7
ω_{1050}	-132,04	1,08	1,094	43,23	263,3	0,73	8
Окатыши							
X_{+5}	140,266	-0,121	-1,571	-8,360	-109,532	0,67	9
$X_{-0,5}$	-121,5	-0,195	-0,187	-4,84	208,9	0,78	10
R_{800}	-180,217	1,633	2,992	4,146	144,918	0,79	11
ΔH	125,870	-1,082	-3,361	-6,004	-13,383	0,65	12
ΔP	-158,713	1,153	5,850	-19,331	128,040	0,63	13
R_{1050}	148,948	-0,215	-0,883	10,293	-38,975	0,71	14

Примечание: Параметры $\Delta\epsilon$ и ρ рассчитаны без содержания Fe_2O_3 и FeO

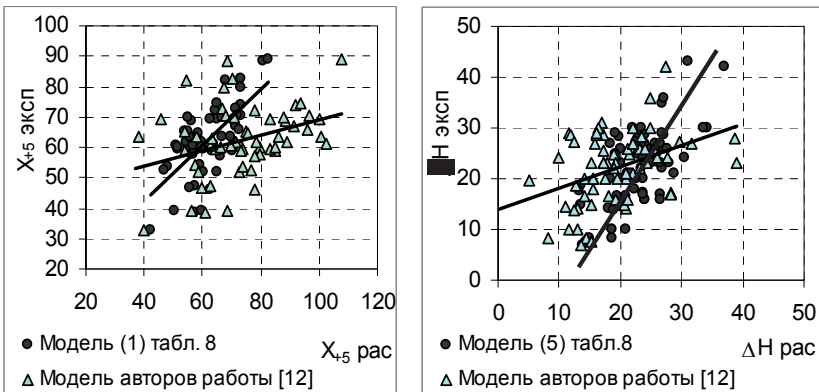


Рис.4. Связь между экспериментальными и рассчитанными показателями горячей прочности агломерата X_{+5} и усадка слоя ΔH по моделям авторов работы [12] и уравнениям (1) и (5), представленным в табл.8.

Заклучение. В целом разработанные модели обеспечивают удовлетворительную точность прогнозирования свойств для практических целей. Методика их расчета программно реализована и может быть использована для прогнозирования поведения железорудных материалов в процессе доменной плавки с целью выбора рационального состава шихты и оптимизации качества чугуна в современных нестабильных условиях работы доменных печей.

1. *Кулиш Е.А., Плотников А.В.* Геологические факторы экономической ценности железорудных месторождений. – К., 2005.– 292 с.
2. *Мазурок П.П., Плотников А.В.* Качественная характеристика железорудной минерально-сырьевой базы Украины и мира. // Сб.научн.трудов «Качество минерального сырья». Кривой Рог. – 2011. – С.94- 103.
3. *Чорна металургія.* Сировина, вогнетриви, продукція, розрахунки. Довідник спеціаліста. – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2008. – 372 с. (Рос. мовою).
4. *Колосов В.А.* Качество железорудного сырья – основа его реализации и стабильности для ее производителей. // Сб. научн. трудов «Качество минерального сырья». Кривой Рог. – 2011. – С.148–154.
5. *Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н.* База данных и модели для прогнозирования плавкости железорудных материалов. // Сталь. – 1998. – №9. – С.7–9.
6. *Особенности современных шихтовых условий в доменном цехе ОАО «ДМЗ им. Петровского».* /А.Я. Ткач, А.В.Шепель, В.А.Петренко и др. //Металл и литье Украины. – 2003. – № 5. – С.28–32.
7. *Влияние качества железорудного сырья и кокса на показатели работы доменных печей в условиях ОАО «НЛМК».* / И.Ф.Курунов, В.Н.Титов, В.Л.Емельянов и др. // Металлург. – 2010. – №1. – С.28-34.
8. *Фазовый состав и структурные особенности промышленного агломерата Череповецкого металлургического комбината «ОАО Северсталь».* / Т.Я.Мальшева, Т.Я.Деткова, И.В.Логинов, А.В.Горшколепова. // Металлург. – 2010. – № 5. – С.39-43.
9. *Долинский В.А., Пермяков А.А.* Особенности минерального состава и металлургические свойства высокоосновного магнезиального агломерата // Вестник горно-металлургической секции РАН (отделение металлургии): сб. науч. тр. – Новокузнецк, – 2006. – Вып.17. – С.64–72.
10. *Производство и проплавка агломерата повышенной основности, полученного с применением бразильской руды /* А.В.Дидевич, Н.С.Хлапонин, Н.И.Храпко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №1. – С.12–15.
11. *Мансурова Н.Р.* Влияние генезиса и основности шихты на минералогический состав и металлургические свойства агломерата: автореф. дис. на соискание научн степени канд. техн. наук – М., 2007. – 20с.
12. *Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Головки Л.А.* Информационное обеспечение и прогноз свойств железорудных материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.2. – Киев: Наукова думка. –1998. – С.93–100.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. Д.Н.Тогобицкой

О.С.Нестеров, А.Ф.Хамхотько, А.І.Белькова, О.С.Скачко

Актуалізація бази даних та моделей для прогнозування властивостей залізородних матеріалів

Виконано аналіз сировинних умов доменного виробництва України у порівнянні зі світовими виробниками. Актуалізовано базу даних «Залізородні матеріали» банку даних «Металургія», що містить відомості про металургійні властивості агломератів і окатишів, та розвинуто моделі для їх прогнозування в сучасних умовах доменної плавки. Розроблені моделі забезпечують задовільну точність прогнозування властивостей для практичних цілей.