

УДК 669.162.16

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННЫХ ЦЕХАХ УКРАИНЫ

А.А. Минаев, А.Н. Рыженков, С.Л. Ярошевский,
Ю.В. Коновалов, А.В. Кузин

ГВУЗ “Донецкий национальный технический университет”,
ЗАО “Донецксталь” - металлургический завод”

В Україні на виробництво чавуну щорічно потрібно близько 2,5 млрд. м³ дорогого природного газу, що в сформованих економічних умовах є малоефективним у порівнянні з технологією пилосудування. Показано, що в цей час в Україні створені передумови для швидкого та ефективного впровадження першого етапу технології з вдуванням у доменну піч пилосугільного палива в кількості до 120 кг/т чавуну

Внедрение пылеугольной технологии (ПУТ-технологии), в комплексе с улучшением качества кокса и реализацией других компенсирующих мероприятий, за последние 25 лет успешно осуществлено на 130 современных доменных печах, выплавляющих около 300 млн. т чугуна в год: по состоянию на 2007 г. в мире освоена технология плавки с вдуванием на 1 т чугуна до 200-260 кг пылеугольного топлива (ПУТ), замены им до 40-50 % кокса и сокращение расхода последнего до 250-300 кг. И это только начало: об этом свидетельствуют как теоретические соображения, так и динамика расходов ПУТ и кокса в развитых странах в последние 10-15 лет [1-3].

Теоретические соображения, отечественный и зарубежный промышленный опыт последних 20 лет показывают, что массовое внедрение ПУТ-технологии, одновременно с улучшением качества кокса, шихтовых и технологических условий – единственный, полностью подготовленный к внедрению вариант развития доменной технологии, который гарантирует значительное (20-40 %) сокращение расхода кокса, частичное или полное сокращение расхода природного газа, повышение эффективности как доменной технологии, так и черной металлургии в целом.

Основные положения теории полной и комплексной компенсации при замене части кокса пылеугольным топливом

Поскольку последствия вдувания дополнительных топлив можно рассчитать, то, очевидно, что одновременно с увеличением расхода топлива необходимо применять так называемые компенсирующие мероприятия, которые должны нейтрализовать негативное влияние комбинированного дутья на технологический режим.

Для оценки эффективности компенсирующих мероприятий введено понятие суммарного коэффициента замены кокса ΣK_3 дополнительным топливом [8, 9]:

$$\Sigma K_3 = (\Delta Q_{\text{к.д.т}} + \Delta Q_{\text{к.к.м}}) / \Delta Q_{\text{д.т}}, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{\text{к.д.т}}$ – экономия кокса в результате повышения расхода дополнительного топлива, кг/т чугуна; $\Delta Q_{\text{к.к.м}}$ – вследствие реализации компенсирующих мероприятий, кг/т чугуна; $\Delta Q_{\text{д.т}}$ – прирост расхода дополнительного топлива, кг/т чугуна.

Выполненные расчеты, а также опыт применения ПУТ на Донецком металлургическом заводе (ДМЗ) и за рубежом показывают, что при суммарном коэффициенте замены, равном 1 и более, по мере увеличения расхода ПУТ в технологическом режиме доменной плавки не происходит негативных изменений, которые бы ухудшали эффективность его использования. Следовательно, в этом случае обеспечена полная и комплексная компенсация негативного влияния дополнительных топлив на технологию плавки.

Для оценки достоверности расчета технологических режимов с вдуванием дополнительных видов топлива предложены т.н. определяющие параметры, превышение определенного уровня которых невозможно в сложившихся технологических условиях. Для оценки предельных значений этих параметров проанализировали среднегодовые данные по 57 доменным печам Европы за 2002 и 2004 гг., а также по 116 печам СССР 1989 г. [9]. Показано, что при достигнутых уровнях качества кокса и железорудного сырья, параметрах температурно-дутьевого режима в диапазоне расхода кокса 250-600 кг/т чугуна предельным значением для скорости газа в распаре является 25 м/с, рудной нагрузки – 6 т/т кокса, выхода горнового газа – 4,7 тыс. м³/т кокса, количества мелочи фракции 5-0 мм в железорудной шихте – 475 кг/т кокса, выхода шлака – 1100 кг/т кокса.

Определяющие параметры разделяют области реально осуществимых и маловероятных режимов доменной плавки с вдуванием ПУТ.

Расчеты технологических режимов с применением ПУТ выполнены по методике А. Н. Рамма [5].

Промышленный опыт использования ПУТ

Отечественный опыт. В Украине по инициативе директора ДонНИИчермета Н. И. Красавцева работа по вдуванию ПУТ начата в 1963 г. на Донецком металлургическом заводе (ДМЗ). Эта технология прошла этапы опытной и опытно-промышленной эксплуатации (1968-1978 гг.), а с 1980 г. на базе первой в Европе промышленной установ-

ки освоена¹ технология совместного вдувания в горн ПГ и ПУТ на обогащенном кислородом дутье (технология ПГ + ПУТ + O₂), обеспечившая увеличение доли замены кокса дополнительными топливами от 10-15 до 30-35 % (табл. 1) [8-10].

Таблица 1 -Технологические показатели работы печи № 2 (V = 1033 м³) ОАО ДМЗ

Показатель	21.12.02-01.01.03	02.01.03-30.03.03	31.12.04-07.02.05	08.02.05-08.03.05
Производство чугуна, т/сут	2046	2022	2178	2124
Расход кокса (сух.), кг/т чугуна	566	470	395	381
Расход, кг/т чугуна:				
агломерат ЮГОКа	487	634	709	718
окатыши ЛебГОКа	989	909	891	893
известняк и другие флюсы	192	188	151	112
Дутье:				
расход, м ³ /мин	2295	2152	1993	1978
давление, кПа	240	245	245	239
температура, °С	1085	1096	1094	1085
Расход на 1 т чугуна:				
кислорода, м ³	37	41	80	81
ПУТ, кг	0	96	131	138
природного газа, м ³	99	62	69	65
условного топлива, кг	701	661	620	608
Теоретическая темп. горения, °С	2036	2041	2031	2018
Колошниковый газ:				
давление, кПа	116	125	121	118
температура, °С	263	272	238	265
Степень использования СО	0,374	0,390	0,461	0,457
Выход шлака, кг/т чугуна	371	389	351	326
Содержание в шлаке, %:				
Al ₂ O ₃	6,78	6,40	5,85	5,86
MgO	3,42	3,34	7,11	6,27
S	1,78	1,78	1,69	1,71
Основность шлака CaO/SiO ₂	1,29	1,27	1,20	1,21
Содержание в чугуне, %:				
Mn	0,24	0,3	0,13	0,12
S	0,035	0,036	0,032	0,035

Результаты, полученные в 2005-2006 гг. на печи № 2 ОАО ДМЗ при отключении подачи природного газа, сопоставимы с мировыми

^{1 2} В освоении оборудования и технологии доменной плавки с применением ПУТ принимали участие В. В. Ноздрачев, В. Е. Попов, В. В. Брага, С. А. Иванов, А. И. Павличев, Е. Н. Складановский, мастера и газовщики доменных печей № 1 и 2 (ОАО ДМЗ), П. Д. Давиденко, Н. Г. Шаповалова и др. (Гипросталь), В. В. Кочура, З. К. Афанасьева, Т. А. Ивлева и др. (ДонНТУ).

аналогами: за 9 месяцев 2006 г. средний расход скипового кокса на весь выплавленный в этой печи чугуна составил 403,6 кг/т чугуна при отсутствии подачи газа и вдувании ПУТ в количестве 167,5 кг/т чугуна. За тот же период в доменных цехах Украины расход кокса составил 496,5 кг/т чугуна и ПГ более 80 м³/т чугуна. И это при худших в ОАО ДМЗ шихтовых и технологических условиях (табл. 2) [4].

Таблица 2 - Показатели работы печи № 2 ОАО ДМЗ за 9 мес 2006 г. и доменных цехов Украины [4]

Доменные цехи	Производство, тыс. т	Расходные коэффициенты, кг/т и м ³ /т чугуна				Суммарный расход условного топлива, кг/т чугуна
		кокс	ПГ	ПУТ	уголь	
ДМЗ	571,7	403,6	0	167,5	0	582,9
Украины (без ДМЗ)	2438,0	496,6	81,6	0	26,5	641,6
Разность		-93,0	-81,6	+167,5	-26,5	-58,7

Таким образом, эффективность применения комбинированного дутья на ДМЗ по сравнению с остальными предприятиями Украины увеличена более чем вдвое.

Зарубежный опыт. Современный уровень доменной технологии в мире представлен печами, достигшими в последние годы наиболее высокой эффективности использования ПУТ – доля замены кокса ПУТ в данных режимах составляет 35-46 % (табл. 3). Из табл. 3 и технической литературы следует, что к параметрам, определившим такой уровень технологии, относятся: уменьшение выходов колошниковых и восстановительных газов на 1 т чугуна до 1400-1600 и 650-700 м³ соответственно [9], а также снижение выхода шлака до 220-300 кг/т чугуна (см. табл. 3) [1, 9]; снижение доли мелочи в железорудной шихте до 5 % [1-3]; улучшение качества кокса по показателю горячей прочности (CSR) до 60-70 % [1-3]; повышение теоретической температуры горения до 2083-2193 °С (см. табл. 3) [9]; использование ПУТ высокого качества ($A^c = 7,5-8,5$ % и $S = 0,3-0,7$ %) [1-3].

В приведенных в табл. 3 технологических режимах все определяющие параметры ниже предельного уровня, что свидетельствует о работе печей в устойчивом и оптимальном режиме. Высокие расходы ПУТ и эффективность его использования при этих режимах достигнуты, прежде всего, за счет высокого качества шихты, топлива и техно-

Таблица 3 - Показатели работы доменных печей Европы и Китая с применением ПУТ

Показатель	Франция		Бель- гия	Нидерланды, Corus Ijmuiden		Гер- мания	Китай
	ARCELOR Dunkerque, № 4, 2005 г.	ARCELOR Dunkerque, № 6, 2005 г.	Sidmar Gent № А, 1997 г.	Corus Ijmuiden № 6 2005 г.	Corus Ijmuiden № 7 2005 г.	Thyssen Krupp Hamborn, № 9, 2005 г.	Baosteel, № 3 2003 г.
Объем печи (рабо- чий), м ³	3940	1335	1754	2328	3790	1833	4350
Производитель- ность, т/(м ³ · сут)	2,34	2,39	2,14	3,17	2,75	2,89	2,09
Топливо, кг/т чугуна:							
расход скипово- го кокса + орешка	289,2	306,0	294,0	274,3	289,7	311,0	273,0
ПУТ	195,8	177,0	193,0	233,2	233,0	178,2	219,0
Дутье:							
давление, кПа	455	307	386	426	475	366	406
содержание O ₂ , %	24,4	23,2	24,5	32,9	30,6	26,6	23,7
температура, °С	1181	1165	1204	1146	1236	1079	1248
Теоретическая тем- пература горения, °С	2083	2122	2189	2187	2193	2155	2092
Степень использова- ния СО	0,496	0,515	0,501	0,493	0,471	0,481	0,503
Выход шлака, кг/т чугуна	274	297	207	219	236	273	258
Содержание в шлаке, %:							
MgO	7,44	8,09	9,90	10,50	10,20	7,00	8,30
Al ₂ O ₃	11,91	11,80	11,50	15,70	16,40	12,00	15,00
Основность (СаО + MgO)/SiO ₂	1,37	1,41	1,44	1,47	1,47	1,37	1,46
Содержание в чугу- не, %:							
Si	0,48	0,41	0,38	0,41	0,44	0,40	0,28
S	0,019	0,013	0,31	0,032	0,032	0,038	0,020

логических условий плавки, что позволило удовлетворить требования полной и комплексной компенсации, несмотря на значительное сокращение расхода кокса.

Расчет эффективности использования ПУТ для доменных цехов Украины

В соответствии с реальными возможностями ОАО “Енакиевский металлургический завод”, учетом проектных данных введенной в эксплуатацию в 2007 г. доменной печи № 5 для обеспечения полной и комплексной компенсации при вдувании в горн ПГ и ПУТ в количестве 100-250 кг/т чугуна предложены следующие компенсирующие мероприятия: увеличение температуры дутья до 1200 °С, содержания кислорода в нем до 28 %, давления газа на колошнике до 180 кПа; сокращение расхода ПГ и последующий вывод его из состава дутья; повышение содержания железа в агломерате до 57 % при росте основности (CaO/SiO_2) до 1,5-2; уменьшение мелочи 5-0 мм в агломерате до 8 %, в окатышах – до 2 %; увеличение доли окатышей в шихте до 60-80 %; улучшение подготовки кокса к плавке: загрузка в печь скипового кокса, содержащего 90 % и более фракций 40-80 мм, а также 40-60 кг/т чугуна коксового орешка; стабилизация и оптимизация технологического режима на основе статистического исследования первичной информации.

Для приготовления ПУТ предложены угли с содержанием золы до 12 % и серы до 1,5 %: рядовой уголь Т (г. Донецк); антрацит АС (г. Луганск); газовый уголь Г (Кузбасс, Россия); смесь углей АС (70 %) и Г (30 %). В соответствии с набором компенсирующих мероприятий рассчитаны два режима технологии с вдуванием на 1 т чугуна 60-160 и 160-240 кг ПУТ.

Компенсирующие мероприятия для вариантов 1-го режима позволили снизить базовый расход кокса на 31-35,3 кг/т чугуна (6,2-7,1 %), повысить производительность печей на 10-15,6 %. При этом улучшились определяющие комплексные параметры плавки. Учитывая сложившиеся конъюнктуру и перспективы, для реализации 1-го режима рассмотрели, прежде всего, шихту на основе окатышей СевГОКа. В этом режиме наибольшую эффективность, при удовлетворительных значениях определяющих параметров, обеспечило использование ПУТ из угля Т (120 кг/т чугуна) и АС (100 кг/т чугуна) (табл. 4). Реализация рассмотренных вариантов обеспечит уменьшение расхода кокса на 1 т чугуна на 118,7-119,3 кг (23,8 %), ПГ – на 40-51,6 м³ (43,9-56,6 %), условного топлива – на 68,1-74 кг (10,8-11,7 %), себестоимости 1 т чугуна – на 73,5-75 грн, прирост производительности – на 10,2-11,3 % (см. табл. 4).

При расчете вариантов 2-го режима использование окатышей СевГОКа не рассматривали, поскольку получали превышающие пре-

Таблица 4 - Эффективность пылеугольной технологии для доменного цеха ОАО "Енакиевский металлургический завод"

Показатель	Базовый период	1-й режим		2-й режим	
		уголь Т	уголь АС	уголь Т	уголь 70 % АС + 30 % Г
Производительность печи, %	100	110,2	111,3	135,6	136,9
Расход на 1 т чугуна:					
кокса, кг	501,7	383,0	382,4	319,1	319,3
ПГ, м ³	91,1	39,5	51,1	0	0
ПУТ, кг	0	120	100	180	180
условного топлива, кг	631,24	563,1	557,2	505,8	506
Снижение себестоимости 1 т чугуна, грн	0	73,5	75	100	96,8
Экономия кокса, тыс. т/год	0	363,2	365,1	558,8	558,1
Экономия ПГ, млн. м ³ /год	0	157,9	122,4	278,8	278,8
Потребность угля для производства ПУТ, тыс. т/год	0	312,1	345,8	1089,4	1129,1
Снижение себестоимости чугуна от внедрения ПУТ-технологии, млн. грн/год	0	224,9	229,5	306	296,2

дельные значения выход шлака на 1 т кокса и скорость газа в распаре. Применение окатышей Центрального ГОКа в данном варианте компенсации обеспечило уменьшение расхода кокса на 73,1 кг/т чугуна (14,6 %) и условного топлива – на 77,4 кг/т чугуна (12,3 %), прирост производства – на 34,3 %.

Удовлетворительный уровень определяющих комплексных показателей обеспечен при вдувании в горн на 1 т чугуна 180 кг ПУТ, приготовленного из углей марок Т и АС + Г. Реализация этих режимов обеспечила снижение на 1 т чугуна расхода кокса на 182,4-182,6 кг (36,6 %), ПГ – на 91,1 м³, условного топлива – на 125,2-125,4 кг (19,9 %), себестоимости 1 т чугуна – на 96,8-100 грн, повышение производительности – на 35,6-36,9 % (см. табл. 4).

Из выполненных расчетов следует, что применение ПУТ в сочетании с комплексом компенсирующих мероприятий позволило повысить долю замены кокса дополнительными топливами до 23,8-36,6 %, что в 1,9-2,6 раза больше, чем при вдувании в горн ПГ + О₂.

На основании расчетов получили следующие средние для Украины показатели эффективности применения ПУТ:

Расход ПУТ (1-й этап освоения ПУТ-технологии)	120
Расход угля (угольной смеси) на производство 1 т ПУТ, т	1,1
Коэффициент замены кокса ПУТ, кг/кг	0,60

Коэффициент компенсации ПУТ-ПГ, м ³ /кг	0,5
Изменение производительности печи, %	0
Снижение себестоимости чугуна в результате освоения ПУТ-технологии, грн/т	60
Предполагаемое производство чугуна с применением ПУТ (2011-2012 гг.), млн. т	30,3
Потребность угля для приготовления ПУТ, млн. т в год	4,06
Предполагаемое годовое снижение:	
расхода кокса, млн. т	2,48
природного газа, млрд. м ³	1,90
себестоимости чугуна, млрд. грн	1,81

Окупаемость капитальных вложений, необходимых на строительство ПУТ-комплексов (первый этап) и реализации необходимых компенсирующих мероприятий, составит 2-3 года.

Освоение 2-го этапа ПУТ-технологии (150-200 кг/т чугуна) также эффективно, однако предопределяет необходимость внедрения дорогостоящих компенсирующих мероприятий – снижение выхода шлака до 300 кг/т чугуна, повышение температуры дутья до 1150-1200 °С; сокращение доли мелочи 5-0 мм в шихте до 5 %; значительное улучшение качества кокса и др. Реализация этих мероприятий невозможна без значительных дополнительных капитальных вложений, сопоставимых со стоимостью ПУТ-комплексов.

Перспективы внедрения ПУТ-технологии в доменных печах Украины

На основе 27-летнего опыта работы пылеугольной установки на ДМЗ, а также зарубежного опыта, некоторые металлургические предприятия Украины заключили контракты с зарубежными фирмами на поставку "под ключ" установок для производства и вдувания ПУТ. Поставщики оборудования гарантируют расход ПУТ до 150 кг/т чугуна. Эти "гарантированные" цифры подразумевают, однако, то, что сданное "под ключ" оборудование может надежно, без сбоев подать ПУТ в фурмы в количестве, обусловленном контрактом. На счет того, что доменные печи и технология "примут" эти 150 кг ПУТ, гарантии распространяются лишь при определенных условиях.

Разработанная на основе многолетней работы пылеугольной установки ДМЗ теория полной и комплексной компенсации негативного влияния ПУТ на технологию создает предпосылки для замены традиционного метода "проб и ошибок" методикой, учитывающей влияние вывода из шихты кокса и горения ПУТ на газодинамический режим, условия сгорания топлива, нагрев шихты и др., позволяющей рассчитать и внедрить необходимые компенсирующие меры для уст-

ранения нарушений. Такой количественный расчет определяет возможность сократить продолжительность освоения оптимального и наиболее эффективного режима с применением ПУТ от нескольких лет до нескольких месяцев.

Технологические условия доменных печей Украины значительно отличаются от зарубежных: повышенные приходы мелочи 5-0 мм с железорудной шихтой и выход шлака, высокие приходы с шихтой серы и щелочей, низкое качество кокса и др. [1–4, 9].

Тем не менее, созданная на ДМЗ технология обеспечила замену дополнительными топливами (ПГ + ПУТ) 30-35 % кокса, что не меньше, чем на большинстве современных зарубежных установок.

Из изложенного следует, во-первых, что заключенные на строительство ПУТ-комплексов контракты должны быть ориентированы на конечный результат – разработку стабильной и эффективной технологии с высоким расходом ПУТ. В связи с этим одновременно со строительством комплексов необходимо немедленно начать работу по расчету и оптимизации малококсовой технологии с применением ПУТ, выбору и внедрению соответствующих компенсирующих мероприятий. И сделать это необходимо до ввода в эксплуатацию пылеугольных комплексов.

Украина располагает по данному вопросу необходимым научным и промышленным опытом: теоретические основы теории полной и комплексной компенсации и на ее основе высокоэффективная ПУТ-технология созданы технологами ОАО ДМЗ и специализированной лаборатории ДонНТУ в 1980-2005 гг.

Что же касается пылеугольных комплексов, предлагаемых зарубежными фирмами, то они уже построены в 25 странах мира и эффективно работают.

Столь же эффективно работает и один из первых в мире Донецкий ПУТ-комплекс, модернизированный Гипросталью в 2002 и 2007 гг. Этот комплекс создан на базе отечественного оборудования, рассчитан на имеющиеся ресурсы и эксплуатацию силами предприятия. Опыт показывает, что по основным определяющим параметрам установка ОАО ДМЗ отвечает требованиям современных пылеугольных установок IV поколения: тонина помола и равномерность подачи ПУТ во времени и по фурмам, полнота сгорания ПУТ, количество вредных выбросов в атмосферу и др. И при этом стоимость данной установки существенно меньше зарубежных. Разработанные в Украине оборудование и технология полностью учитывают существенную и принципиальную специфику отечественных технологических условий.

Пока бóльшая часть металлургических предприятий Украины и России не приняли решения о строительстве ПУТ-комплексов.

В связи с этим, во-вторых, настоятельно рекомендуем тщательным образом изучить опыт освоения оборудования и технологии пылевдувания в ОАО ДМЗ, сопоставить достигнутые эффективность и стоимость затрат, изучить опыт работы печей № 1 и 2 в 2005-2007 гг. при полной замене природного газа ПУТ в типичных украинских технологических условиях, сопоставить эти результаты с условиями, в которых работают импортные установки. И вероятно, что Ваш выбор будет в пользу установки ОАО ДМЗ. Тем более, что она успешно работает в новых условиях уже более пяти лет. Благодаря применению ПУТ достигнуты оптимальные показатели работы печи и высокая экономическая эффективность плавки. То же самое и с меньшими затратами может получить и Ваше предприятие.

Выводы

1. Технология доменной плавки с вдуванием в горн природного газа, требующая ежегодно на реализацию в Украине 2,5 млрд. м³ газа, в сложившихся технологических условиях менее эффективна по сравнению с использованием ПУТ. Определяющий показатель, характеризующий преимущества ПУТ – возможность замены угольной пылью в 2-3 раза большего количества кокса.

2. В настоящее время в Украине на основе отечественного и зарубежного опыта созданы предпосылки для быстрого и эффективного внедрения технологии с вдуванием в горн угольной смеси: разработано и освоено в промышленных условиях оборудование для реализации процесса, внедрена технология плавки с вдуванием в горн на 1 т чугуна 100-170 кг ПУТ, подтвердившая высокую экономическую эффективность мероприятия и возможность исключения подачи или значительного сокращения расхода природного газа.

3. Опыт ОАО ДМЗ показывает, что освоение первого этапа реализации ПУТ-технологии при расходе топлива 100-150 кг/т чугуна и снижении расхода кокса до 350-400 кг/т чугуна для условий доменных печей Украины не представляется проблематичным. Для решения этой задачи достаточно, опираясь на отечественный и зарубежный опыт, а также с помощью теории полной и комплексной компенсации, рассчитать режимы плавки с вдуванием ПУТ на основе имеющихся или создаваемых в цехе компенсирующих ресурсов. В равной степени реализация данной технологии возможна на базе как отечественного, так и зарубежного оборудования.

Библиографический список

1. Использование вдувания пылеугольного топлива для оптимизации работы доменной печи / Б. Параманатан, Д. Плоой, М. Геердес и др. // Сталь. - 2005. - № 10. - С. 38-44.
2. Renliang Z., Kezhong G. Characteristic of 200 kg/t HM PCI and low cokerate of Baosteel // 59-th Ironmaking conference, March 26-29, 2000, Pittsburg, PA Proceedings. P. 321-326.
3. Савчук Н. А., Курунов И. Ф. Доменное производство на рубеже XXI в. // Новости черной металлургии за рубежом. Ч. II. Прил. 5. – М. : АО "Черметинформация", 2000. – 42 с.
4. Захарченко В. Н. Состояние и перспективы доменного производства Украины // Труды междуна. науч.-техн. конф. "Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна", г. Донецк, 18-21 декабря 2006 г. – Донецк: УНИТЕХ, 2006. С. 27-35.
5. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
6. Китаев Б. И. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
7. Бабий В. И., Иванова И. П. Длительность воспламенения и горения частиц пыли различных марок углей // Материалы III Всес. конф. "Горение твердого топлива". – Новосибирск: Наука, 1969. С. 82-92.
8. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. - М.: Металлургия, 1988. - 176 с.
9. Ярошевский С. Л. Кузнецов А. М., Афанасьева З. К. Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины. - Донецк: Норд компьютер, 2006. – 31 с.
10. Исследование технологии доменной плавки при вдувании в горн пылеугольного топлива, природного газа и дутья, обогащенного кислородом / А.Н. Рыженков, С.Л. Ярошевский, В.М. Замуруев и др. // Металлург. - 2006. - № 6. – С. 41-44.

15.04.08