

Исследования тепло-газодинамической работы в «сухой» зоне доменной печи и применение их результатов

Приведены результаты исследования тепловой и газодинамической работы «сухой» зоны доменной печи. Показана возможность совершенствования тепловой работы печи за счет более эффективного использования теплового и восстановительного потенциалов газового потока, его распределения с учетом величины внешних тепловых потерь, профиля шахты и конструкции системы охлаждения, свойств шихтовых материалов и расхода энергетических ресурсов. Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: доменная печь, теплообмен, газодинамика, тепловые потери, периферийная зона, настиль, инверсия, тепловой пограничной слой

Research results of the thermal and gas-dynamic operation of the blast furnace «dry» zone are presented. The possibility of improving the furnace thermal operation through a more efficient usage of heat and reduction potentials of the gas flow is shown considering the external heat loss value, profile of the shaft, the cooling system design, properties of charge materials and consumption of energy resources.

Key words: blast furnace, heat exchange, gas dynamics, heat losses, peripheral zone, crust, inversion, thermal boundary layer

Процессы теплообмена и газодинамики, протекающие в шахте доменной печи (ДП) и ее периферийной зоне определяют износ и профиль шахты, восстановительную работу газового потока и тепловую подготовку шихтовых материалов перед их поступлением в нижние высокотемпературные горизонты печи.

Научной и методологической базой изучения развития тепло-газодинамических процессов в «сухой» зоне ДП являются законы газодинамики и теплопередачи, реализованные в математической модели, разработанной д.ф.-м.н. В.К. Хрущев [1]. Анализ и прогноз показателей доменной плавки выполнялся с использованием теплоэнергетической модели И.Д. Семикина [2]. Для адаптации и проверки результатов расчетов в реальных условиях работы печи выполнены замеры температур кожуха брони, тепловых нагрузок водоохлаждаемых элементов и доменных печей в целом в период их работы, на остановках и в задувочный периоды. В последующем сотрудниками ИЧМ НАНУ реализована подсистема контроля внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие в составе автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» («АМКР») (рис. 1) [3]. Погрешность измерения тепловых потерь в системе водяного охлаждения ДП при ручном измерении составила 5-21 %, а в автоматизированном режиме 4-5 %.

Суммарные тепловые потери в системе охлаждения и расход кокса на их покрытие используются для контроля тепловой работы доменной печи. При увеличении/уменьшении величины внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие формируется

предупреждающий сигнал о разогреве / похолодании, «расстройстве» в тепловой работе печи (рис. 1).

Для установления характера этих изменений в автоматизированном режиме контролируются такие теплоэнергетические характеристики как тепловой дефицит, тепловая мощность и коэффициент использования теплоты топлива (КИТ). Тепловой дефицит позволяет контролировать затраты энергии на нагрев и напряженности процесса, тепловая мощность – количество теплоты, поступающей в печь и наращивании производства, КИТ – характер распределения и использования теплоты топлива.

Предупреждающий сигнал об увеличении (уменьшении) в течение часа, внешних тепловых потерь на 1 МВт реализован в подсистеме на основном видеокadre «Внешние Q» в виде предупреждающей надписи (рис. 1):

Расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь составляет 10-50 кг/т чугуна или 2-10 % от общего расхода кокса [2]. В шахте печи внешние тепловые потери составляют 20-50 % от их общей величины в ДП. Величина внешних тепловых потерь в шахте печи определяется развитием теплообменных процессов в противотоке газов и шихтовых материалов в «сухой» зоне шахты, с учетом ее конструкции и параметров работы системы охлаждения, газового потока, его распределения и свойств шихтовых материалов [1, 2].

С использованием тепло-газодинамической модели «сухой» зоны печи выполнены расчеты, их сопоставление с результатами экспериментальных и теоретических исследований [2, 4], показало хорошую сходимость.

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Результаты выполненных исследований позволили уточнить и дать количественную оценку влияния развития процессов теплообмена и газодинамики в шахте на тепло-газодинамические параметры работы ДП с учетом расхода и температуры шахтного газа, давления колошниково-го газа, порозности и крупности кусков шихты (табл. 1). Уменьшение расхода шахтного газа, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению количества теплоты, идущей на прогрев шихты, поэтому уменьшаются температура шихты и газа, скорость газового потока и перепад давлений (табл. 1). Увеличение температуры шахтного газа увеличивает количество теплоты поступающей в «сухую» зону. Это вызывает увеличение температур, тепловых потерь и физического объема газа, что является причиной увеличения скорости газового потока и перепада давлений (табл. 1).

Увеличение порозности шихты при прочих равных условиях приводит к увеличению доли свободного пространства для газа в печи, из-за чего уменьшается скорость газа и перепад давлений. Это приводит к тому, что газ отдает меньше теплоты шихте, поэтому прогрев шихты уменьшается, а потери теплоты с уходящим колошниковым газом увеличиваются (табл. 1). Увеличение крупности шихты при прочих равных условиях, в том числе и сохранении порозности, приводит к уменьшению площади контакта газа с шихтой, уменьшению суммарного объемного коэффициента передачи теплоты от газа к шихте, увеличению температуры колошниково-го газа, уменьшению потерь давления и увеличению скорости газа (табл. 1).

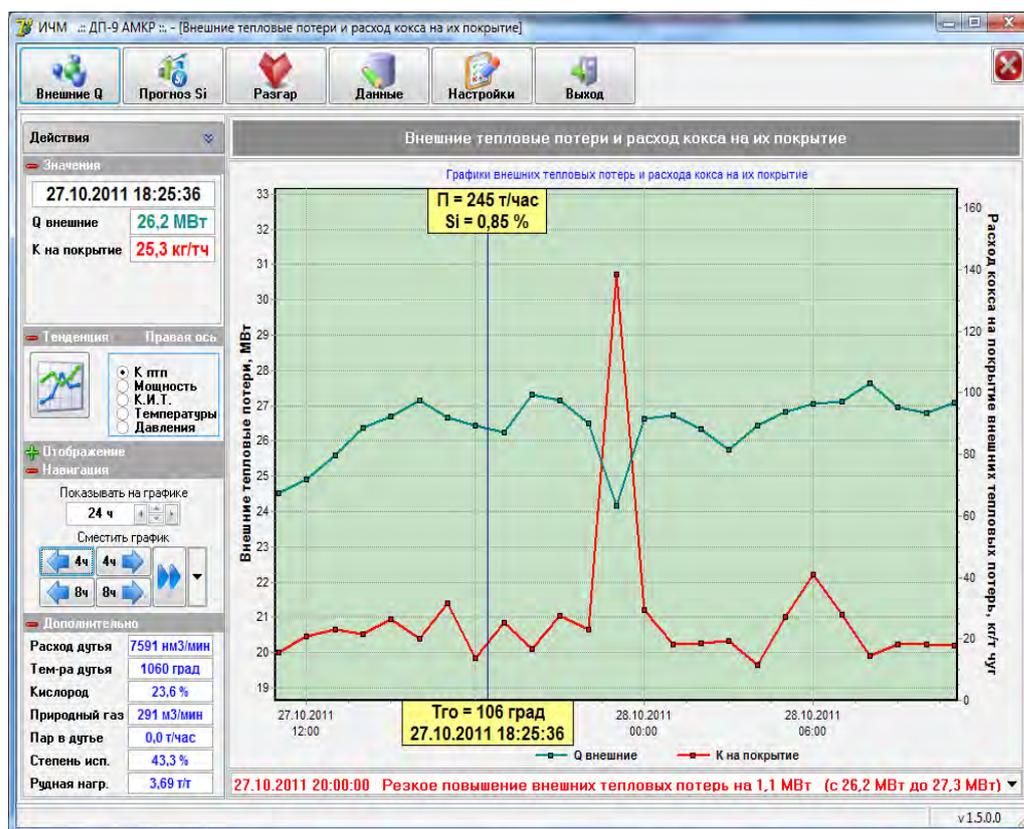
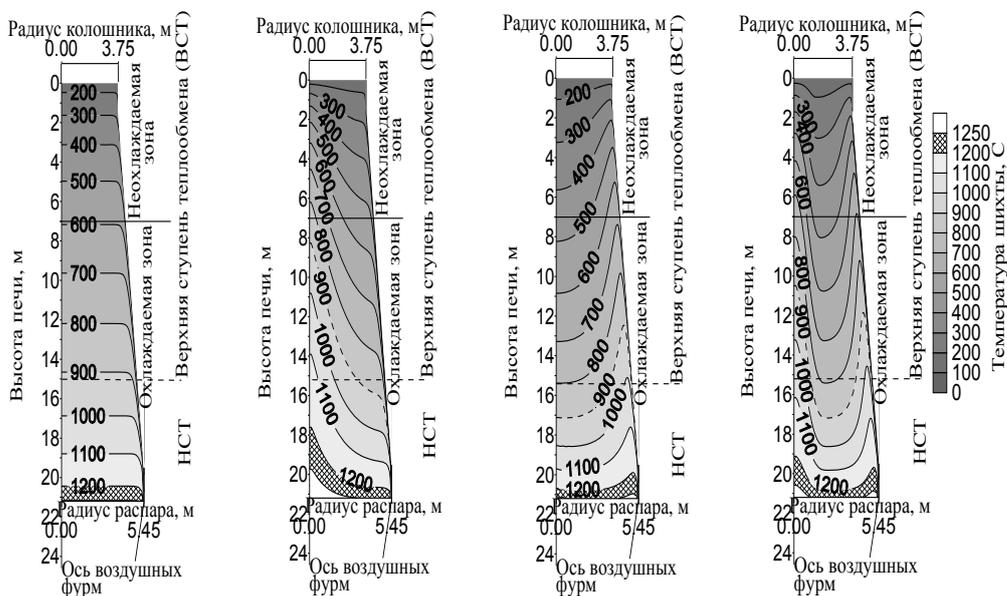


Рис. 1. Видеокادر измерения внешних тепловых потерь (—+— Q внешние) и контроля расхода кокса на их покрытие (—+— К на покрытие)



а – равномерное б – центральное в – периферийное г – фактическое
Рис. 2. Распределение изотерм шихты в шахте ДП объемом 2000 м³ при различном газораспределении

Расход шахтного газа на прогрев шихтовых материалов, давление и скорость газового потока оказывают большее влияние, чем его температура и свойства шихтовых материалов (табл. 1). Для условий работы ДП ПАО «АМКР» распределение газового потока при сохранении средней газопроницаемости шихты в горизонтальных сечениях и прочих равных условиях влияет на изменение средней по сечению или объе-

Таблица 1. Влияние параметров газового потока и свойств шихтовых материалов на теплогазодинамические параметры (+ увеличение; - уменьшение)

№	Факторы	Тепловые потери в шахте / температура шихты в шахте, %	Верхний перепад давления / перепад давления в шахте, %	Температура газа в шахте / на колошнике, %	Скорость газа в шахте / на колошнике, %
1	Уменьшение расхода шахтного газа со 100 % на:				
1а	10 %	-19/-20	-32/-24	-19/-32	-20/-28
1б	20 %	-56/-58	-66/-53	-57/-63	-50/-51
1в	40 %	-80/-79	-84/-79	-78/-66	-72/-64
2	Увеличение давления колошникового газа с $0,5 \times 10^5$ Па на:				
2а	$0,5 \times 10^5$ Па	+2/+3	-36/-32; -23'/-	+1/-1	-15/-26
2б	$1,0 \times 10^5$ Па	+3/+5	-54/-50 -37'/-	+2/-2	-28/-41
2в	$1,5 \times 10^5$ Па	+4/+6	-64/-61 -47'/-43 ¹	+3/-3	-39/-51
3	Увеличение температуры шахтного газа с 900 °С на:				
3а	100 °С	+12/+10	+6/+5	+11/+10	+6/+5
4	Увеличение средней порозности шихты с $0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ на:				
4а	$0,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$	-3/-4	-60/-58	-3/+2	-4/-32
4б	$0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$	-8/-9	-82/-80	-6/+4	-14/-49
4в	$0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$	-14/-15	-92/-90	-9/+7	-26/-58
4г	$0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$	-31/-28	-98/-98	-13/+21	-44/-68
5	Увеличение средней крупности куска шихты с 5 мм на:				
5а	5 мм	-0,4/-3	-26/-22	-2/+3	+5/+2
5б	25 мм	-8/-16	-70/-66	-10/+10	+11/+6
5в	45 мм	-15/-24	-82/-78	-13/+18	+13/+12
5г	75 мм	-24/-33	-88/-86	-14/+31	+14/+20

1 – по данным А.А. Томаша [5]

му температуры газа и шихты, давления и скорости газа на ~1-5 %, внешних тепловых потерь в шахте на ~10-20 %.

Результаты расчета распределения температур шихты в шахте ДП, соответствующие равномерному, центральному, периферийному и фактическому газораспределению, при прочих равных условиях, показаны на рис. 2. Граница верхней и нижней ступеней теплообмена (ВСТ и НСТ), которая соответствует средней температуре шихты 900 °С, показана на рис. 2 штриховой линией. Изотермы, выделенные на рис. 2 заштрихованной областью, показывают граничную зону с температурами 1200-1250 °С.

Выполненные исследования влияния газораспределения на закономерности развития теплообменных процессов в «сухой» зоне шахты показали, что экономически более выгоден вариант центрального газораспределения (рис. 2б) за счет уменьшения внешних тепловых потерь, что согласуется с выводами, полученными при анализе экспериментальных исследований печей с центральным и периферийным газораспределением. На основании выполненных расчетов с учетом развития процессов теплообмена в периферийной зоне ДП получено распределение температуры шихты от уровня засыпи по высоте шахты ДП на различных расстояниях от стенки (рис. 3а). Установлено, что ниже границы неохлаждаемой и охлаждаемой зон существует инверсия температурного поля - скачкообразное изменение температуры, обозначенное кружком А кривой 1 (рис. 3а), величина, которого зависит от параметров газового потока, его распределения, свойств шихтовых материалов, состо-

яния ограждения¹ [5], наличия выступов холодильных плит и тепловой работы системы охлаждения. Инверсия температурного поля может наблюдаться не только на стыке охлаждаемой и неохлаждаемой части шахты, но и в других зонах, где существуют интенсивные потери тепла. Например, кружками Б и В кривой 1 (рис. 3а) обозначены выступы холодильных плит. Иллюстрируемое на рис. 3а распределение температур способствует налипанию расплавов и образованию настывли в зоне инверсии температурного поля, особенно в районе границы охлаждаемой и неохлаждаемой зон, которая была выявлена на печи объемом 2000 м³ во время ее остановки и выдувки до 6-7 рядов холодильников шахты. Указанная настывль до выдувки была спрогнозирована при исследовании состояния ограждения ДП термографическим методом с использованием данных ручного замера температур кожуха и тепловых потерь в системе охлаждения печи (рис. 3б).

Для определения величины влияния системы охлаждения на поле температур в шахте печи, которое различно и зависит от конструкции, и параметров ограждения, работы системы охлаждения и теплогазодинамического режима работы печи, предложен метод определения границ периферийной зоны ДП.

Границы периферийной зоны в шахте ДП определялись с использованием теории теплового пограничного слоя [6]. Толщина теплового пограничного слоя в шахте печи определяется как слой возле стенки, в

¹ Ограждение доменной печи представляет собой многослойную стенку, состоящую из гарнисажа, футеровки, холодильника и кожуха печи

Таблица 2. Показатели тепловой работы ДП № 9 по зонам и печи в целом при остаточной толщине футеровки 50 %

Показатели	Зоны			
	периферийная	промежуточная	центральная	печь в целом
Размер зоны в шахте по радиусу, м	0,2 - 0,45	3,2 - 4,7	2 - 2,9	5,4 - 8,05
Тепловая мощность печи, МВт	155	871	167	1193
Усвоенная тепловая мощность, МВт	37	382	69	488
Мощность холостого хода, МВт	70	0	0	71
Внешние потери теплоты, МВт	30,7	0	0	30,7
Расход дутья по балансу, м³/мин	852	4784	918	6554
КИТ углерода кокса	0,478	0,478	0,457	0,475
КИТ углерода природного газа	0,157	0,157	0,118	0,151
Средняя величина КИТ	0,439	0,439	0,415	0,435
Тепловой дефицит чугуна, МДж/т чугуна	329	3369	611	4309
Расходы на 1 т чугуна:				
кокса, кг/т	52	365	71	488
кокса на покрытие тепловых потерь, кг/т	20	0	0	20
природного газа, м³/т	9	53	10	73
условного топлива, кг/т	63	427	83	573
Производительность, т/ч	38,1	316,8	53,1	408,0
Степень прямого восстановления железа rd по Павлову, %	1,8	33,8	47,8	32,7
Степень использования CO, %	41,4	41,1	30,1	39,6
Теоретическая температура фурменной зоны, °С	2110			

котором градиент изменения температуры по радиусу печи $dT/dr > 0,01$, где T – температура газа, r – радиус печи.

Результатами расчета тепло-газодинамических процессов в шахте печи установлено, что система охлаждения оказывает влияние на теплообмен в пристеночной зоне на переменную глубину порядка 200-700 мм. Для печей объемом 2000-5000 м³ по высоте это составляет в среднем ~3-10 % от радиуса печи. Определяющее влияние на изменение толщины теплового пограничного слоя в шахте и температуры шихты на ее стенке, температуры рабочей поверхности шахты, оказывают толщина футеровки, расход и температура шахтного газа, порозность и крупность кусков шихты. Температура и расход воды в системе охлаждения оказывают меньшее влияние на изменение толщины теплового пограничного слоя в шахте печи.

С использованием информации о размерах периферийной, промежуточной и центральной зон, величине внешних тепловых потерь и составе колошникового газа спрогнозированы технико-экономические показатели работы этих зон и печи в целом (табл. 2).

Размеры центральной зоны определялись с использованием информации о фактическом распределении состава колошникового газа по данным радиального отбора проб газа и изменению температур по радиусу колошника [7]. В расчетах принято допущение, что границей центральной зоны является точка, в которой градиент изменения радиального состава газа приближается к нулю или меняет знак. Это допущение позволило оценить средний состав колошникового газа по трем зонам печи: **центральной, промежуточной и периферийной.**

Результаты теплоэнергетического расчета пока-

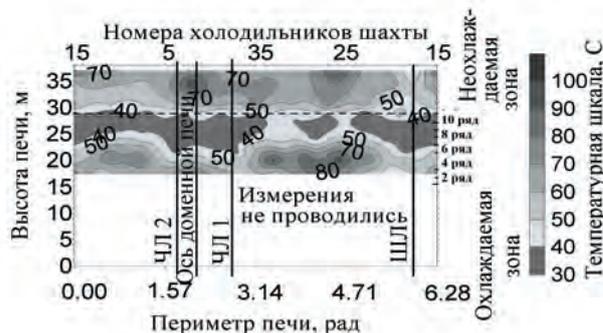
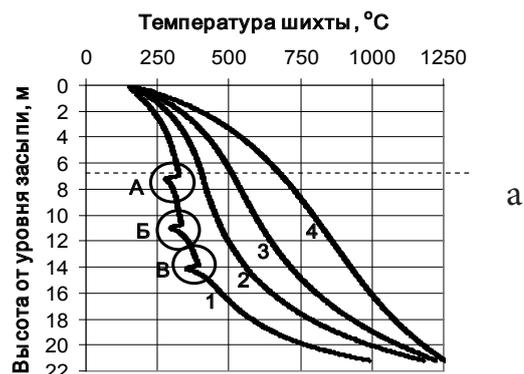


Рис. 3. Распределение температуры шихты по высоте шахты (а) ДП объемом 2000 м³ и ее термограмма кожуха (б) Расстояние от стенки в мм: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100; 4 – ось печи

зали, что основная доля производительности печи (~80-90 %) определяется тепловой работой центральной и промежуточной зоной печи, остальные ~10-20 % - периферийной зоной. При этом, расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь в центральной и промежуточной зонах, работающих в

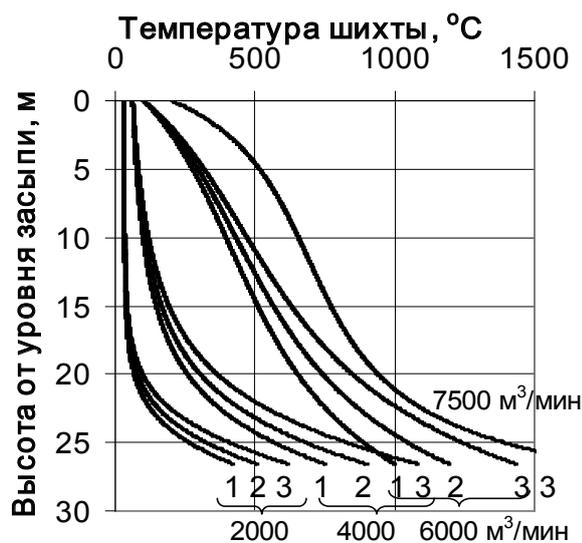


Рис. 4. Зависимость температуры шихтовых материалов в период задувки от расхода и температуры дутья (1 – 100; 2 – 500; 3 – 1000 °С)

адиабатном режиме, равен нулю, а в периферийной зоне достигает 4-10 % и более удельного расхода кокса по печи в целом и зависит от величины внешних тепловых потерь. В периферийной зоне степень прямого восстановления железа имеет низкое значение из-за недостатка теплоты и ее расхода на покрытие внешних тепловых потерь. Рациональное управление тепловой работой периферийной зоны ДП позволяет уменьшить тепловые нагрузки в этой зоне, что является резервом увеличения КИТ, усвоенной тепловой мощности, степени прямого восстановления железа, а, следовательно, и производительности на 7-8 %, и снижения удельного расхода кокса на 4-5 % по печи в целом.

Предложенные методы расчета тепловой и газодинамической работы доменной печи были успешно опробованы для обоснования и реализации тепло-газодинамического режима задувки ДП объемом 5000 м³ с применением нагретого азота (рис. 4) [8]. Эта технология позволяет эффективно прогревать шихтовые материалы по высоте печи в первую очередь за счет увеличения расхода дутья и во вторую – за счет повышения ее температуры, в сравнении с существующими технологиями задувок ДП на атмосферном дутье и на комбинированном с природным газом (рис. 4).

Выводы

Разработан и опробован метод прогноза протекающих теплообменных процессов между газовым потоком и шихтой в «сухой» и периферийной зоне печи.

Данный метод позволяет контролировать износ профиля шахты, принимать научно-обоснованные решения по изменению тепло-газодинамического режима работы печи для согласования газодинамической и тепловой работы низа и верха ДП, что особенно перспективно для разработки программы задувки.

Автоматизированная система контроля внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие в ДП позволяет увеличить эффективность оперативного управления ее тепловым режимом работы, стабильность качества выплавляемого чугуна, ресурс работы футеровки и холодильников ДП за счет своевременного обнаружения и оценки причин отклонений в тепловом и газодинамическом режиме работы печи.

С использованием теории теплового пограничного слоя предложен критерий и разработан метод определения границ периферийной зоны, и установлено, что ее толщина по высоте шахты от верха печи изменяется в диапазоне 200-700 мм.

Библиографический список

1. Моделирование теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А.Ф. Авцинов, А.В. Бородулин, С.Ф. Бугаев и др. // Сталь. - 1996. - № 8. - С. 4-9.
2. Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И., Орел Г.И. Домна в энергетическом измерении. - Кривой Рог: СП «Мир», 2004. - 412 с.
3. Перспективы использования теплоэнергетических параметров доменной плавки в составе АСУ ТП доменной печи / А.Л. Чайка, Д.В. Пинчук, С.В. Кетлер и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. - 2011. - Вып. 24. - С. 77-88.
4. Движение шихты и газов в доменной печи / S.P. Kinney // Домез. - 1930. - № 5(11). - С. 89-106.
5. Глинков М.А. Общая теория печей. - М.: Металлургия, 1978. - 264 с.
6. Теплопередача / Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.
7. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. - К.: Наукова думка, 2007. - 412 с.
8. Тепломассообмен в домнах большого объема при задувке и использование нагретого азота / А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, В.С. Листопадов и др. // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах: междунар. науч. - техн. конф., 7-9 сент. 2010 г.: сб. тр. - Мариуполь, 2010. - С. 237-244.

Поступила 28.11.2012