

УДК 662.6/9:669.162.2

В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Сохацкий,
А.А.Жеребецкий, В.Н.Диментьев*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ПОЛЕЗНЫМ ОБЪЕМОМ 3000 М³

*Институт черной металлургии НАН Украины
ПАО «Алчевский металлургический комбинат»

Выполнены исследования и анализ эффективности технологии применения пылеугольного топлива (ПУТ) на доменной печи большого объема. Показана необходимость комплексного подхода к освоению технологии доменной плавки, технической модернизации всего агломерационного и доменного комплекса, индивидуального подхода к освоению ПУТ на разных доменных печах.

Ключевые слова: доменная печь, пылеугольное топливо

Введение. Переход отечественного доменного производства на технологию работы с ПУТ вызван необходимостью уменьшения себестоимости чугуна и требованиями по уменьшению потребления Украиной природного газа. Для печей сопоставимого объема эффект от применения ПУТ зависит от того насколько полно технология ведения доменной плавки учитывает и использует технические и сырьевые условия комбината. Если не удастся достичь компромисса в получении максимального эффекта от перехода на технологию работы с ПУТ с наименьшими затратами в модернизацию производства и качества сырья, то технико-экономические показатели печи могут резко ухудшиться по причине преждевременного износа ее холодильников и кожуха (рис. 1) [1-5].

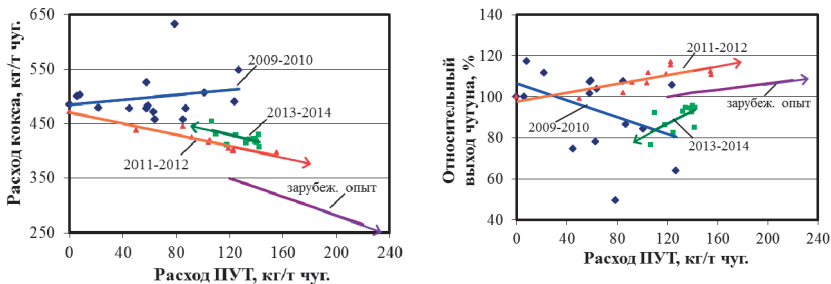


Рис. 1 Показатели работы ДП№1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат» («АМК») в 2009-2014 гг.

Изложение основных результатов исследований.

Опыт освоения ПУТ в 2009-2014 году на второй по величине доменной печи Украины ДП№1 ПАО «АМК», полезным объемом 3000 м³, показал, что больший объем печи позволяет увеличить эффект от перехода

на технологию работы с ПУТ в сравнении с печами малого объема. Однако больший объем доменной печи повышает требования к ее технической оснащенности, конструкции системы охлаждения и качеству сырья [1-3]. В июне 2014 года ДП №1 остановлена на расширенный капитальный ремонт второго разряда, который предусматривает реализацию новых технических решений в конструкции печи, загрузочном оборудовании и системе охлаждения.

Аналитические и экспериментальные исследования динамики выхода холодильников ДП №1 из строя, изменения тепловых нагрузок по высоте и периметру печи, тепловых потерь в системе охлаждения показали, что основными причинами уменьшения ресурса работы заплечиков, маратора и низа шахты ДП №1 являются изменения в тепловой и газодинамической работе при переходе на технологию доменной плавки с ПУТ [1-3]:

- увеличение тепловых нагрузок на систему охлаждения печи, особенно на фурменный пояс, горн, заплечики и низ шахты;
- ухудшение ровности хода печи в связи с увеличением рудной нагрузки на кокс на 25%, особенностями сжигания ПУТ в фурменном очаге и уменьшением газопроницаемости столба шихты;
- увеличение производства и степени прямого восстановления железа, количества первичного шлака и содержания в нем монооксида железа;
- увеличение окружной неравномерности в тепловой и газодинамической работе печи.

Влияние последствий перехода ДП №1 на технологию доменной плавки с ПУТ на горение холодильников приведено на рис.2.

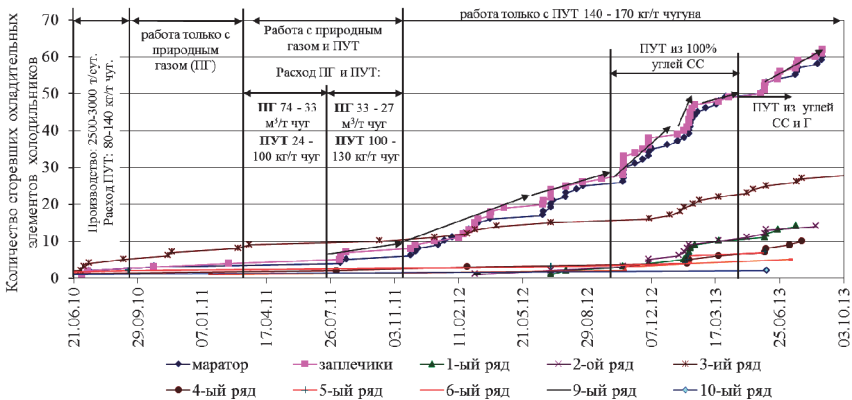


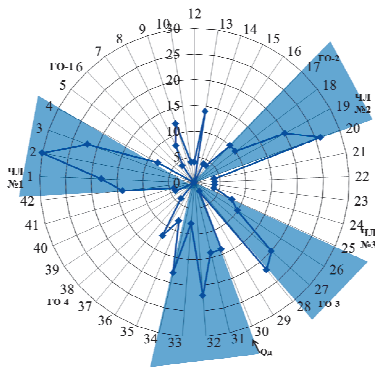
Рис. 2 Динамика горения охлаждаемых водой трубок холодильников заплечиков, маратора и шахты ДП №1.

Количество вышедших из строя водоохлаждаемых элементов печи увеличивалось при увеличении окружной неравномерности и величины

температурно-тепловых нагрузок в нижней части печи, особенно на заплечики и фурменные приборы с увеличением расхода ПУТ (рис.3). Тепловые нагрузки на одну фурму увеличились со $130 \div 190$ до $160 \div 240$ кВт, неравномерность их распределения увеличилась более чем в полтора раза. Средняя величина внешних тепловых потерь при работе с природным газом составляла 14 МВт, при работе с ПУТ и с природным газом – 20, только с ПУТ – 23 МВт [1-3].

Увеличение тепловых нагрузок на заплечики и горн, усиление окружающей неравномерности их распределения требует пересмотра технологических и технических решений, принимаемых при разработке рационального режима загрузки печи, параметров и состава дутья, выбора конструкции системы охлаждения, холодильников, фурм и профиля печи, автоматизированных средств контроля за тепловой и газодинамической работой печи, переходящей на технологию работы с ПУТ [1-3].

Сгоревшие холодильники шахты и заплечиков



Горение фурменных приборов, шт.

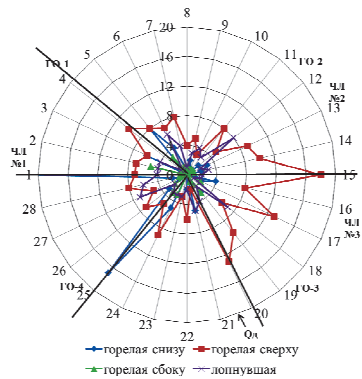


Рис. 3 Окружная неравномерность выхода из строя холодильников и фурм с накоплением (сумма) 2010-2014 год. Сектора, обозначенные цветом и линиями, соответствуют большим потерям давления на фурмах (расходу дутья) и горению холодильников

Для оценки эффективности применения программ загрузки доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ), используется разработанная ИЧМ НАНУ методика, которая включает следующие экспериментальные и аналитические исследования [1-2, 4, 6-8]:

- определение траекторий потока шихтовых материалов;
- определение времени движения материалов по трактам загрузочного устройства;

- исследование особенностей процессов загрузки и выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ;
- определение расходных характеристик шихтовых затворов (ШЗ) бункеров БЗУ;
- определение профиля поверхности засыпи, формируемой при выгрузке материалов из различных угловых положений лотка, и шахты доменной печи бесконтактными средствами контроля;
- расчет траектории движения, радиальной и окружной неравномерности распределения шихтовых материалов.

Разработанный в ИЧМ способ расчета окружного распределения шихтовых материалов (ОРШ), позволил оценить его неравномерность, формируемую на ДП №1 ПАО «АМК», оснащенной БЗУ «Азовмаш» (рис. 4). Как видно из рис. 4, ОРШ характеризовалось существенным смещением максимума среднерадальных рудных нагрузок в сторону по направлению к ГО1-ГО2. При этом, железорудные материалы распределены по окружности достаточно равномерно, а кокс, в свою очередь, имеет количественное смещение в сторону по направлению к ГО4 (рис. 4). Доля незамкнутых колец шихтовых материалов на ДП №1 составляет около 28,9% от общего количества оборотов, что в ~2,5 раза больше, чем на других исследованных ИЧМ доменных печах схожего объема. Это объясняется особенностями системы управления БЗУ ДП №1, отсутствием алгоритма коррекции расходной характеристики шихтовых затворов, низкой скоростью изменения угла наклона лоткового распределителя и т.д.

Актуальным и малоизученным является вопрос выбора рационального марочного состава углей для приготовления ПУТ, при решении которого должна учитываться не только конъюнктурно-экономическая ситуация, но и технологические условия в конкретном доменном цехе, техническое оснащение и состояние доменных печей, энерготехнологические связи доменного производства с другими переделами [1-3, 5].

Опыт освоения технологии доменной плавки на доменных печах ПАО «АМК» показал, что от химического состава ПУТ зависят не только технико-экономические показатели тепловой работы доменной печи, но и ресурс работы холодильников и кожуха доменной печи [1-3]. С использованием теплоэнергетической модели доменной плавки выполнены оценочные расчеты влияния содержания углерода, водорода, кислорода, азота, серы и золы на показатели тепловой работы печи без изменения параметров и состава дутья, и при поддержании постоянной температуры в фурменной зоне за счет изменения расхода ПУТ (табл.1). Наиболее сильное влияние на развитие теплообменных и восстановительных процессов по высоте печи, изменение производства и расхода кокса в доменной печи оказывает содержание углерода и водорода в ПУТ. Остальные элементы (кислород, азот, зола и сера) являются «балластом» в его составе. Их увеличение в составе ПУТ приводит к уменьшению углерода и водорода и, соответ-

венно, влияет на показатели тепловой работы печи. Расход кокса увеличивается, а производство может как увеличиваться, так и уменьшаться за счет изменения количества углерода топлива, сгораемого на фурмах.

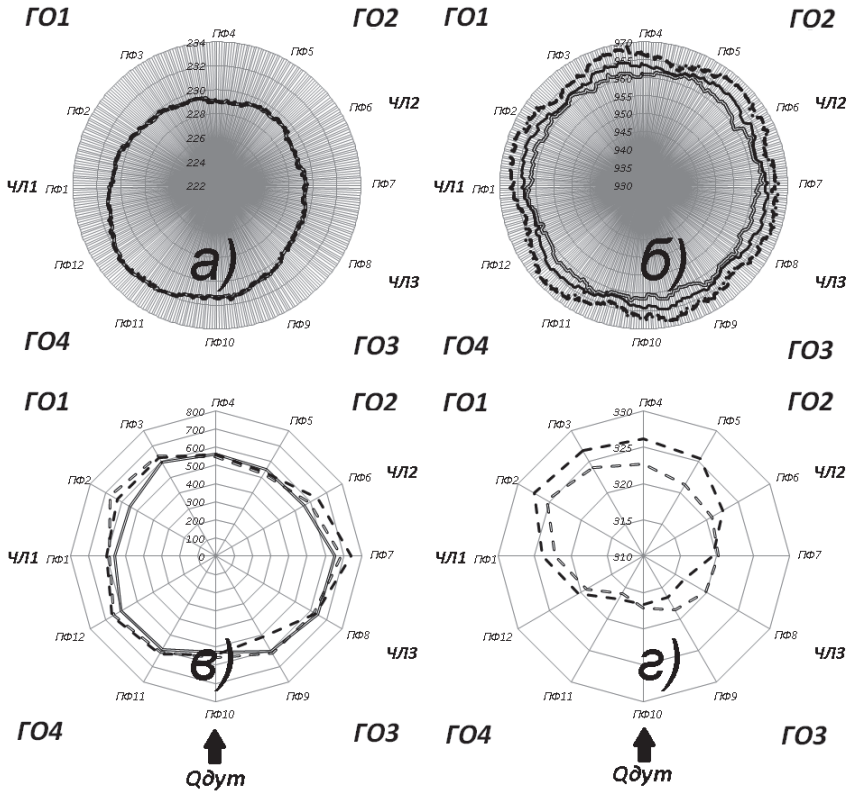


Рис.4 Расчетное распределение кокса (а), железорудных материалов (б), температур периферийных (в) и колошникового газа (г) по окружности печи.

Производительность доменной печи и степень прямого восстановления оксидов железа увеличивается при увеличении содержания углерода, азота, золы и серы в ПУТ. Увеличение содержания водорода и кислорода в ПУТ приводят к уменьшению производства и степени прямого восстановления оксидов железа (табл. 1).

Расход кокса уменьшается при увеличении содержания в ПУТ углерода и водорода и уменьшении кислорода, азота, золы и серы (табл. 1).

Результаты расчета показали, что при изменении химического состава ПУТ, поддержание температуры в фурменной зоне на постоянном уровне может как улучшить, так и ухудшить технико-экономические показатели доменной плавки. Наибольшее влияние на изменение температуры фур-

менной зоны оказывает содержание водорода и углерода в химическом составе ПУТ.

При увеличении/уменьшении водорода в ПУТ и поддержании на постоянном уровне температуры фурменной зоны за счет уменьшения/увеличения расхода ПУТ производство доменной печи и расход кокса увеличиваются/уменьшаются, а расход условного топлива, напротив, уменьшается/увеличивается (табл. 1).

Увеличение/уменьшение содержания углерода в ПУТ при поддержании на заданном уровне температуры фурменной зоны за счет увеличения/уменьшения расхода ПУТ уменьшает/увеличивает производство и расход кокса и увеличивает/уменьшает расход условного топлива (табл. 1).

Таблица 1. Влияние изменения химического состава ПУТ на показатели тепловой работы печи*

Показатели	Увеличение содержания в ПУТ на 1%					
	C	H ₂	O ₂	N ₂	зола	S
КИТ С ПУТ в:						
• зоне расплава, %	+0,5/ +0,5	-2,7/ -2,7	-0,6/ -0,6	-0,2/ -0,2	-0,2/ -0,2	0,0/ 0,0
• нижней ступени теплообмена, %	+0,5/ +0,5	-2,1/ -2,1	-0,7/ -0,7	-0,1/ -0,1	-0,2/ -0,2	0,0/ 0,0
• печи в целом, %	+0,5/ +0,5	-1,5/ -1,5	-0,8/ -0,8	-0,03/ -0,03	-0,2/ -0,2	0,0/ 0,0
Средняя величина КИТ в:						
• зоне расплава, %	+0,1/ -0,005	-0,6/ +0,1	-0,1/ -0,04	+0,03/ +0,02	+0,04/ +0,001	+0,1/ 0,0
• нижней ступени теплообмена, %	+0,1/ -0,01	-0,4/ +0,2	-0,1/ -0,1	+0,1/ +0,04	+0,04/ +0,02	+0,1/ 0,0
• печи в целом, %	+0,1/ -0,01	-0,3/ +0,3	-0,2/ -0,1	+0,1/ +0,1	+0,04/ +0,003	+0,1/ 0,0
Усвоенная тепловая мощность в:						
• зоне расплава, %	+0,9/ -0,04	-4,0/ +0,9	-0,7/ -0,3	+0,3/ +0,2	+0,3/ +0,01	+0,6/ 0,0
• нижней ступени теплообмена, %	+0,4/ -0,04	-1,6/ +0,8	-0,5/ -0,3	+0,2/ +0,2	+0,2/ +0,01	+0,3/ 0,0
• печи в целом, %	+0,3/ -0,04	-0,7/ +0,8	-0,4/ -0,3	+0,2/ +0,2	+0,1/ +0,01	+0,2/ 0,0

Тепловой дефицит чугуна в:						
• зоне расплава, %	0,0/ 0,0	-0,1/ 0,0	0,0/ 0,0	+0,01/ 0,0	+0,01/ +0,02	+0,02/ 0,0
• нижней ступени теплообмена, %	+0,2/ +0,1	-1,5/ -0,1	-0,2/ -0,1	+0,1/ +0,1	+0,1/ +0,02	+0,1/ 0,0
• печи в целом, %	+0,1/ +0,1	-0,9/ -0,1	-0,1/ -0,04	+0,1/ +0,1	+0,1/ +0,01	+0,1/ 0,0
Удельные расходы:						
• кокса, %	-0,4/ -1,6	-0,6/ +0,8	+0,4/ +0,7	+0,2/ +0,2	+0,3/ +0,2	+0,2/ 0,0
• ПУТ, %	-0,2/ +3,4	+0,1/ -4,0	+0,4/ -0,7	-0,1/ +0,1	-0,1/ +0,5	-0,2/ +1,1
• условного топлива, %	-0,1/ +0,1	+0,5/ -0,2	+0,03/ -0,03	-0,05/ -0,03	-0,03/ +0,01	+0,04/ +0,1
Производительность:	+0,1	-0,2	-0,03	-0,03	+0,01	+0,1
количество чугуна, полученного от восстановления железа водородом и оксидом углерода, %	-0,1/ -0,1	+1,6/ +0,7	-0,1/ -0,1	-0,05/ -0,04	-0,1/ -0,03	-0,05/ 0,0
количество чугуна, полученного из железа, восстановленного твердым углеродом и оксидом углерода, выделяющимся при прямом восстановлении оксидов железа, %	+0,3/ +0,04	-1,7/ +0,2	-0,3/ -0,2	+0,1/ +0,1	+0,1/ +0,02	+0,2/ 0,0
общее количество чугуна, %	+0,2/ -0,1	-0,1/ +0,9	-0,4/ -0,3	+0,1/ +0,1	+0,1/ -0,01	+0,2/ 0,0
rd, %	+0,2/ +0,1	-1,7/ -0,1	-0,2/ -0,1	+0,1/ +0,1	+0,1/ +0,02	+0,1/ 0,0
Температура фурменной зоны, С	+5	-28	-3	+1	+2	+3

* числитель - при переменной температуре фурменной зоны - при постоянной температуре фурменной зоны за счет изменения расхода ПУТ

Компромиссным и рациональным вариантом, позволяющим увеличить производство чугуна не допуская увеличения энергетических затрат в целом по комбинату и увеличения газодинамической напряженности, тепловых нагрузок на низ шахты в условиях ее неудовлетворительного состояния является совместное уменьшение температуры дутья и увеличение содержания O_2 в дутье (на каждые 50^0C уменьшения температуры дутья необходимо увеличивать содержания O_2 в дутье на 1%) при под-

держании постоянной температуры в фурменной зоне за счет увеличения расхода ПУТ.

По результатам исследований, выполненных ИЧМ НАНУ на ДП №1 ПАО «АМК» и доменных печах сопоставимого объема Украины (ПАО «АМКР») и России (ОАО «НЛМК», «ЗСМК», «ТМК» и др.), предлагаются следующие малозатратные рациональные мероприятия по совершенствованию средств автоматизированного контроля параметров работы доменных печей [4, 5]:

1. Для получения информации о характере газораспределения, необходимой для обоснованного выбора параметров матрицы загрузки, следует обеспечить отбор проб радиального колошникового газа [1-5].

2. Для получения информации о тепловых нагрузках на холодильники и кожух, расстройках в тепловой работе периферийной зоны и печи в целом, следует установить термпары на сливных водоводах системы охлаждения печи и контролировать общие тепловые потери в ее водяном охлаждении [5, 9].

3. Для более достоверной оценки изменений в газодинамической и тепловой работе печи рекомендуется включить в состав АСУ ТП расчет и тренды изменения скорости колошникового газа [10].

4. Для предупреждения расстройств в тепловой работе печи и использования ПУТ для регулирования теплового состояния печи целесообразно контролировать расход ПУТ по фурменным приборам, плотности и других параметров потока ПУТ, подаваемого в печь.

5. Для усовершенствования контроля процесса истечения шихтовых материалов из бункеров БЗУ, в т.ч. для более точного определения продолжительности времени выгрузки порций в печь, необходимо оснащать бункера радарными и радиоизотопными или виброакустическими датчиками [1-4].

Для печей, переходящих на технологию работы с ПУТ, целесообразно пересмотреть и улучшить технические решения в конструкции фурм, системы охлаждения, холодильников, футеровки и профиля печи [1-3]. С целью уменьшения прогара фурм целесообразно использовать фурмы с керамическим стаканом или с другим теплоизоляционным и противоабразивным покрытием, применять фурмы с двухконтурным охлаждением водой высокого давления с целью уменьшения тепловых нагрузок на них. Холодильники должны обладать высокой теплоотводящей способностью [3, 5].

Доменные печи среднего и большого объема целесообразно оснащать бесконусными загрузочными устройствами, которые обеспечат наибольший эффект при переходе на технологию работы с ПУТ с увеличенными рудными нагрузками на кокс. Оснащение доменных печей БЗУ будет способствовать целенаправленному формированию рационального распределения шихтовых материалов, согласованного с дутьевым и теплогазодинамическим режимом плавки, что позволит повысить технико-экономические показатели печи и ресурс работы ее системы охлаждения (запечников и шахты).

Выводы. Увеличение эффективности доменной плавки с ПУТ на доменных печах Украины среднего и большого объема лимитирует неудовлетворительное техническое состояние шахты, газодинамика верхней

(«сухой») зоны печи и гидродинамическая работа низа печи (коксовая насадка). По результатам накопленного сотрудничества Института опыта для решения этих проблем необходимо выполнить следующие мероприятия:

- модернизация конструкции загрузочного устройства;
- совершенствование конструкции системы охлаждения и профиля печи;
- увеличение мощности воздуходувных машин и кислородного цеха;
- улучшение качества шихтовых материалов и разработка согласованных с ним режимов загрузки печи;
- применение научно-обоснованного выбора химического состава ПУТ и согласование с ним дутьевого режима,
- улучшение средств автоматизированного контроля тепловых потерь в системе охлаждения, восстановительной, тепловой и газодинамической работы газового потока, окружной неравномерности распределения ПУТ и дутья по фурмам.

Для сохранения и, по возможности, увеличения эффективности доменной плавки при изменении химического состава ПУТ необходимо изменять параметры и состав комбинированного дутья.

Подготовка смесей углей с высоким содержанием водорода и углерода позволит уменьшить расход кокса. При увеличении содержания водорода в ПУТ, как и при применении совместно с ПУТ природного газа, уменьшаются тепловые нагрузки в зоне заплечиков и распара, увеличивается стабильность газодинамического режима ведения доменной плавки за счет уменьшения прямого восстановления железа и увеличения косвенного восстановления, уменьшения количества первичного шлака и содержания в нем монооксида железа.

Анализ данных экспериментальных и статистических исследований показал, что при переходе исследуемой печи на технологию вдувания ПУТ фактор распределения шихтовых материалов оказывает существенное влияние на тепло-газодинамическую работу печи по окружности. Поэтому формирование рационального распределения шихтовых материалов по окружности печи является актуальным в условиях использования технологии вдувания ПУТ.

1. *Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³, с применением пылеугольного топлива / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 4. – С.36-40.*
2. *Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Сохацкий // Металл и литье Украины. – 2013. – № 10. – С. 5-10.*
3. *Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, А.А.Сохацкий, Г.В.Панчоха // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 3.*

4. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. – К.: Наука думка, 2007. – 412 с.
5. *Домна в энергетическом измерении* / Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И., Суцещ С.П. – Днепродзержинск: ДГДУ, 2006. – 542 с.
6. *Большаков В.И., Лебедь В.В., Жеребецкий А.А.* Новая методика предпусковых исследований на доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. - №3. – С.86-90.
7. *В.И.Большаков, В.В.Лебедь, А.А.Жеребецкий.* Исследование поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи во время ее остановки. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. - №6. – С. 58-61.
8. *Совершенствование* контроля истечения шихтовых материалов из бункеров бесконусного загрузочного устройства доменной печи объемом 3000 м³ / *В.И.Большаков, В.В.Лебедь, А.А.Жеребецкий, А.В.Акушевич, Д.Б.Остапенко.* // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2013. - № 6–С. 90-93.
9. *Патент 104228 Україна, МПК С 21 В 721.* Спосіб контролю ходу доменної печі / *В.І.Большаков, О.В.Бородулін, О.Л.Чайка, О.І.Швачка.* – № а201209096; заяв. 24.07.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. №8. -8 с.
10. *Корнилов Б.В., Лычагин Н.Н., Чайка А.Л.* Исследование газодинамической работы колосника // *Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сб. докл. междунар. научно–практ. конф.* 18–21 сент. 2012 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – с. 99-107.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И.Г.Муравьевой*

В.І.Большаков, О.Л.Чайка, В.В.Лебедь, О.А Сохацький, А.О.Жеребецький, В.Н.Діментьев

Вплив технології застосування пиловугільного палива на показники теплової роботи доменної печі з корисним об'ємом 3000 м³

Виконано дослідження та аналіз ефективності технології застосування пиловугільного палива (ПВП) на доменній печі великого обсягу. Показано необхідність комплексного підходу до освоєння технології доменної плавки, технічної модернізації агломераційного і доменного комплексу, індивідуального підходу до освоєння ПВП на різних доменних печач.

Ключові слова: доменна піч, пиловугільне паливо

V.I.Bolshakov, A.L.Chayka, V.V.Lebed, A.A.Sokhatsky, A.A.Zherebetsky, V.N.Dimentev

Influence of technology applications pulverized coal fuel for thermal performance blast furnace operation, the useful volume of 3000 m³

The studies and analysis of the effectiveness of the application of technology of pulverized coal injection (PCI) at the blast furnace of large volume. The necessity of a comprehensive approach to development. blast furnace technology, technical modernization of the sintering and blast-furnace complex, individual approach to the development of IFB in different blast furnaces.

Keywords: blast furnace, pulverized coal.