

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Ю. И. ЦЫГУЛЁВ, *y.tsygulov@m-technology.com.ua*
(ООО «М Технологии», г. Харьков, Украина)

В настоящее время в условиях постоянного роста стоимости энергоносителей и сырья все острее возникает потребность в минимизации расхода ресурсов, увеличении эффективности процесса доменной плавки, снижении себестоимости выплавки чугуна.

Опыт применения технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ), несмотря на экономические преимущества, четко обозначил проблему, связанную с увеличением тепловых нагрузок на холодильные плиты, возникшую в результате снижения расхода кокса, а также низкого качества подаваемых в печь железорудных материалов, и, как следствие, плохой газопроницаемости шихты. Это приводит к перераспределению потоков газа, увеличению вероятности образования периферийного хода, смещению зоны воздействия максимальных тепловых на-

грузок по высоте печи в зону заплечиков, распара, 1-го и 2-го рядов шахты. Воздействие этих негативных факторов предъявляет к системе охлаждения максимально высокие требования по обеспечению эффективности и бесперебойности ее работы.

В условиях работы с повышенными тепловыми нагрузками крайне важно обеспечить стабильную циркуляцию и надежный теплоотвод от холодильных плит, особенно при сходе гарнисажа, когда холодильная плита подвержена резкому воздействию максимальных тепловых нагрузок, что приводит к возникновению пленочного кипения, когда слой пара между жидкостью и стенкой останавливает отвод тепла, что может вызвать прогар холодильной плиты. Величины тепловых нагрузок и их распределение по зонам доменной печи отобразены на рис. 1.

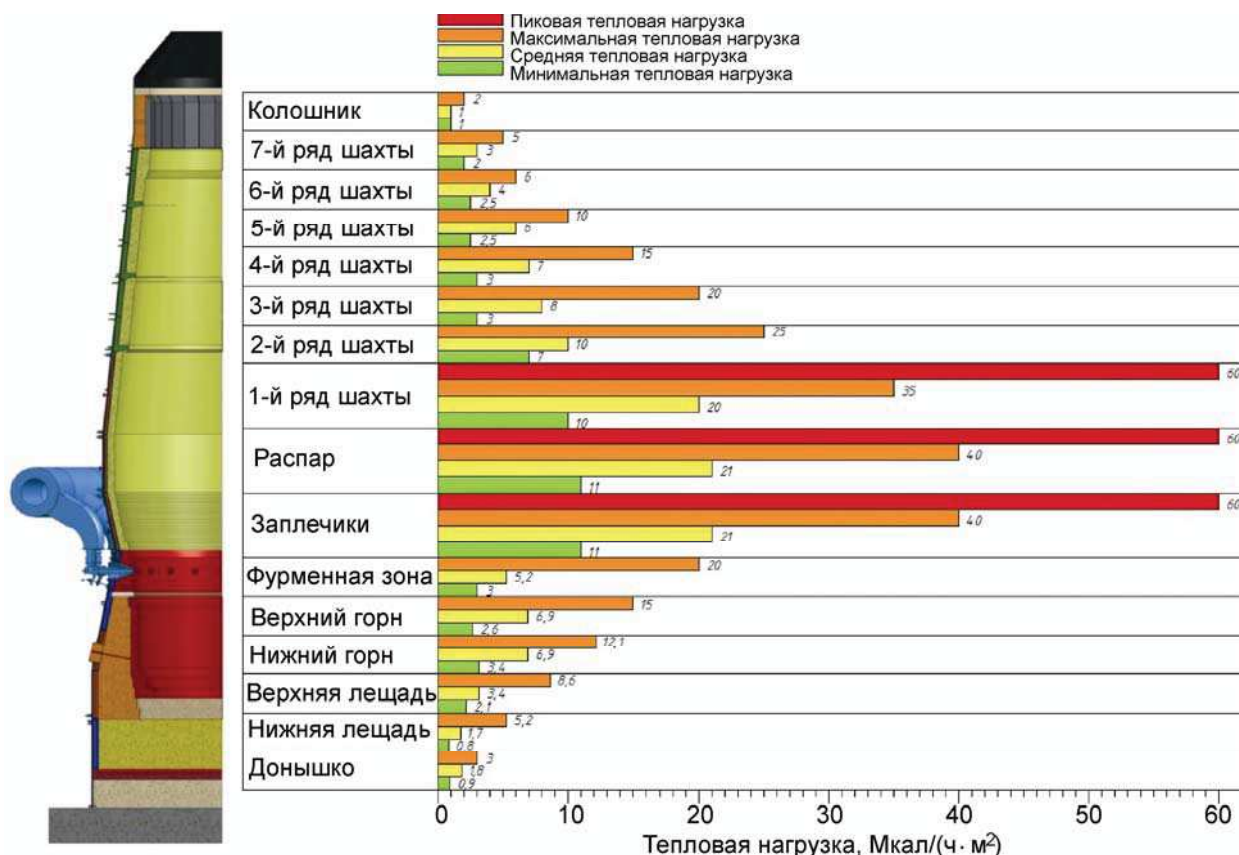


Рис. 1. Распределение тепловых нагрузок по горизонтам доменной печи

Причины возникновения таких высоких нагрузок на холодильные плиты прежде всего вызваны комплексом проблем, связанных с технологией ведения доменной плавки, с отсутствием необходимой предварительной подготовки загружаемого в печь сырья. Плохое качество шихтовых материалов и, как правило, отсутствие возможности управления точным распределением шихты по поверхности засыпи доменной печи, интенсификация процесса доменной плавки с превышением проектных показателей по суточной производительности чугуна и по вдуванию ПУТ приводят к нарушению газодинамического режима работы доменной печи, понижению газопроницаемости, усилению периферийного потока газов и, как следствие, перегреву футеровки и холодильных плит с последующим выходом их из строя.

Распространение технологии вдувания ПУТ привело к необходимости модернизации неподготовленных систем охлаждения. На предприятиях черной металлургии Украины, как правило, модернизация осуществляется в рамках проведения ремонта доменной печи и гораздо реже при новом полномасштабном строительстве. Решения, применяемые для осуществления модернизации, должны обеспечить короткий срок реализации и максимальную эффективность работы при минимальных капитальных затратах.

Основная задача современной системы охлаждения — создание условий для формирования и удержания гарнисажа на охлаждаемой поверхности и обеспечение быстрого отвода тепла при его сходе, способствование продлению кампании доменной печи до капитального ремонта 1-го разряда (порядка 15 лет).

На сегодняшний день известны четыре типа систем охлаждения холодильных плит.

1. Система охлаждения технической водой, неприменима в условиях вдувания ПУТ, так как при перегреве неподготовленной технической воды на поверхностях теплообмена образуются отложения CaCO_3 , ухудшающие теплообмен (рис. 2).

2. Система испарительного охлаждения (СИО) с естественной циркуляцией, используется в качестве аварийного режима и является альтернативой установке насосов с дизельным приводом. Система испарительного охлаждения с естественной циркуляцией (СИО с ЕЦ) при использовании в качестве основного режима работы для охлаждения холодильных плит доменных печей с вдуванием ПУТ снижает надежность и эффективность работы системы независимо от

зоны, в которой она применяется. На современных доменных печах не применяется. При использовании СИО с ЕЦ в каналах очень низкие скорости циркуляции $V = 0,2-0,35$ м/с, велика вероятность появления застойных зон в системе охлаждения, происходит неравномерное распределение пара и воды между равнотипными подъемными коллекторами, образование пленочного кипения воды при пиковых нагрузках или сходе гарнисажа в связи с низкими скоростями циркуляции. Для предотвращения этих негативных факторов необходимо устанавливать циркуляционные насосы, так как скорость циркуляции является основным критерием надежности системы охлаждения.

3. Система охлаждения “горячей” химически очищенной водой (ХОВ) с принудительной циркуляцией.

4. Система охлаждения “холодной” ХОВ в замкнутом контуре.



Рис. 2. Отложения CaCO_3 на внутренней поверхности трубки чугунной холодильной плиты при охлаждении технической водой

Из перечисленных систем охлаждения эффективно противостоять высоким тепловым нагрузкам в условиях применения технологии ПУТ способны только система охлаждения “горячей” ХОВ с принудительной циркуляцией и система охлаждения “холодной” ХОВ в замкнутом контуре при условии оснащения систем необходимыми средствами, обеспечивающими надежность работы, а именно: качественными холодильными плитами и огнеупорными материалами, современной АСУТП с сигнализацией отклонения от рабочих параметров, обеспечением скорости охлаждающей воды в каналах холодильных плит $V = 1,5-2$ м/с, использованием в циркуляционном контуре подготовленной, химически очищенной деаэрированной воды.

Применение чугунных холодильных плит в зоне воздействия высоких тепловых нагрузок существенно снижает надежность системы охлаждения любого типа. Многослойная структура чугунного холодильника не позволяет организовать качественный теплоотвод, резкие воздействия пиковых тепловых нагрузок приводят к образованию трещин как в трубках охлаждения, так и в чугунном теле холодильника (рис. 3).



Рис. 3. Образование трещин в водоохлаждаемой трубке и теле чугунного холодильника

Самым современным решением для защиты кожуха доменной печи в зоне воздействия максимальных тепловых нагрузок и значительного абразивного износа является применение медных холодильных плит, охлаждаемых химически очищенной деаэрированной водой в комбинации с высокотеплопроводными огнеупорными материалами, стойкими к механическим воздействиям.

Медные холодильники изготавливаются из горячекатаных слябов с просверленными каналами охлаждения круглого или овального сечения (рис. 4). Огневая поверхность холодильников фрезеруется для создания профиля “ласточкин хвост” (рис. 5). Качественное охлаждение обеспечивается не только благодаря высокой теплопроводности меди, но и однородной структуре холодильника. За счет меньшей толщины медных холодильников по сравнению с чугунными увеличивается полезный объем печи при условии применения существующего кожуха.



Рис. 4. Высверленный водоохлаждаемый канал медной холодильной плиты



Рис. 5. Футеровка медных холодильных плит карбидокремниевым кирпичом

Альтернативой применению медных холодильных плит для организации надежного теплоотвода и обеспечения качественного охлаждения футеровки является применение стальных холодильников. Основная особенность стальных холодильных плит — отсутствие границы между залитой трубкой и телом холодильника (рис. 6), в процессе отливки стальная трубка полностью сплавляется с телом холодильной плиты. Материал литого стального холодильника — низкоуглеродистая сталь с содержанием углерода 0,2–0,3 %.



Рис. 6. Продольный разрез литого стального холодильника

При использовании любой, даже самой современной системы охлаждения применение холодильных плит низкого качества делает невозможным обеспечение надежного теплоотвода, особенно при резком воздействии высоких тепловых нагрузок, что в результате приводит к выходу из строя системы охлаждения.

В 2015 г. по проекту ООО «М Технология» в ПАО «Запорожсталь» был выполнен капитальный ремонт доменной печи № 2. Ввод в эксплуатацию доменной печи после капитального ремонта 2-го разряда осуществлен 23 апреля 2015 г. Решения, принятые при реконструкции системы охлаждения заплечиков и шахты доменной печи, заключались в реализации следующих мероприятий:

- установка вертикальных медных плит в 1-м и 2-м ряду шахты печи с заменой кожуха в этой зоне;
- применение карбидокремниевой футеровки в зоне заплечики – распар – шахта;
- внедрение системы охлаждения «горячей» ХОВ с принудительной циркуляцией;
- подключение системы автоматического управления, контроля и визуализации основных рабочих параметров системы охлаждения холодильных плит.

Принципиальная схема системы охлаждения, реализованная на ДП № 2 ПАО «Запорожсталь», представлена на рис. 7.

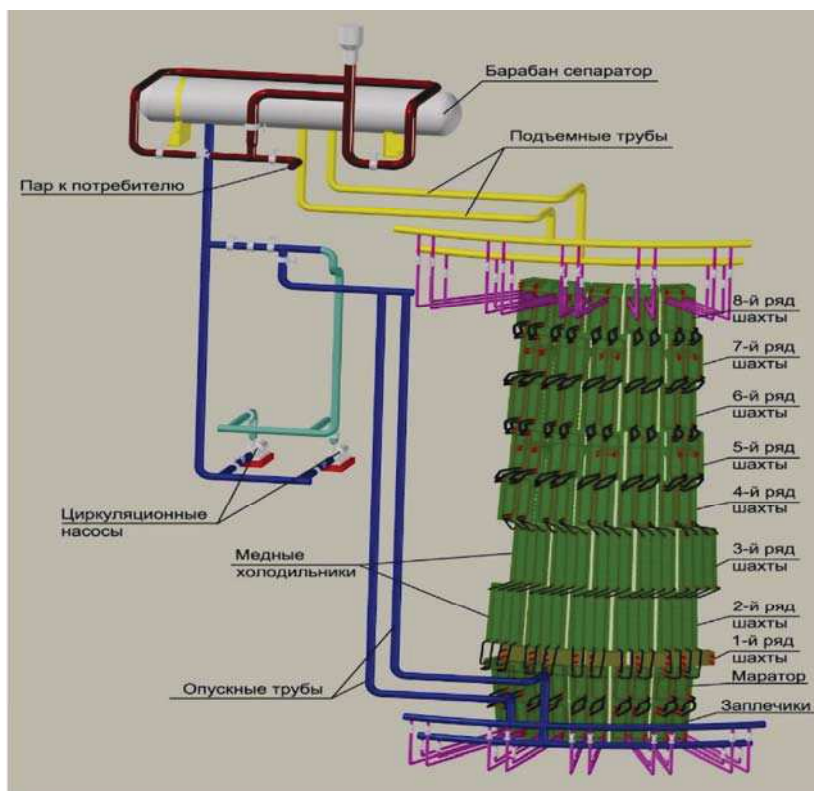


Рис. 7. Принципиальная схема системы охлаждения, реализованная на ДП № 2 ПАО «Запорожсталь»

Система испарительного охлаждения с естественной циркуляцией была заменена на систему охлаждения “горячей” ХОВ с принудительной циркуляцией. Принципиальное отличие данной системы заключается в том, что применение циркуляционных насосов позволило перенести точку вскипания воды из каналов охлаждения холодильных плит в подъемные коллекторы. Установка циркуляционных насосов позволила достичь оптимальных скоростей в контурах охлаждения $V = 1,5$ м/с (для сравнения: скорости при естественной циркуляции составляют $V = 0,2-0,35$ м/с).

Предусмотрена возможность работы системы охлаждения в следующих режимах:

- охлаждение “горячей” ХОВ водой с принудительной циркуляцией;

- охлаждение с естественной циркуляцией (аварийный режим при обесточивании насосной станции);

- охлаждение технической водой (аварийный режим при падении уровня воды в барабане-сепараторе и отсутствии подачи подпиточной ХОВ воды).

При разработке системы охлаждения были применены запатентованные ООО “М Технологии” решения по способу контроля теплового состояния холодильных плит с регулированием интенсивности их охлаждения. График регулирования производительности насосов с зависимости от температуры тела медных холодильных плит представлен на рис. 8.

Для автоматического регулирования интенсивности охлаждения холодильных плит запечников, маратора и шахты предусматривается

частотная регулировка количества оборотов электродвигателей насосных агрегатов в зависимости от температуры тела медных холодильных плит. Для проверки характеристик работы насосов и наладки системы предусматривается использование показаний расходомеров на нагнетательных циркуляционных трубопроводах и датчиков давления на напорных патрубках.

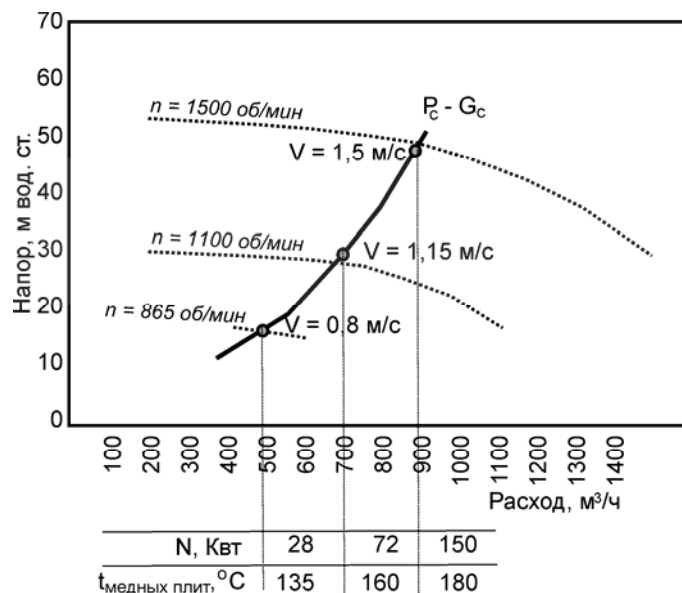


Рис. 8. Параметры работы насосов с частотным регулированием системы охлаждения холодильных плит запечников и шахты ДП № 2

В таблице представлено сравнение основных рабочих параметров двух доменных печей одинакового объема ($V = 1513$ м³) в ПАО “Запорожсталь”, оборудованных аналогичными системами охлаждения запечников и шахты, но различными типами холодильных плит и футеровки.

СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ОДИНАКОВОГО ОБЪЕМА ($V = 1513$ м³) В ПАО “ЗАПОРОЖСТАЛЬ”

Показатель	ДП № 2	ДП № 4
Охлаждение	“Горячей” ХОВ с принудительной циркуляцией	
Наличие системы регулирования интенсивности охлаждения	Есть	Нет
Футеровка	Карбидокремниевый кирпич, толщина кладки 460–575 мм [$\lambda = 17-20$ Вт/(м·К)]	Торкрет-бетон толщиной 365–419 мм [$\lambda = 3,29-4,35$ Вт/(м·К)]
Холодильные плиты шахты	Два ряда медных [$\lambda = 380$ Вт/(м·К)]	Чугунные [$\lambda = 38,8$ Вт/(м·К)]
Производительность по выплавке чугуна, т/сут	3400 (средняя), 3700 (макс.)	3050 (средняя)
Средний расход, кг/т чугуна:		
ПУТ	152	135
кокса	365	420
Средняя паропроизводительность системы охлаждения, т/ч	До 1,8	До 10

Опыт эксплуатации ДП № 2 ПАО “Запорожсталь” подтвердил, что благодаря более низкой температуре поверхности медных холодильников (125 °С) по сравнению с чугунными (более 250 °С) создаются условия для формирования и поддержания гарнисажа. Значительно меньшая паропроизводительность системы охлаждения, в данном случае применим термин “тепловые потери с системой охлаждения”, свидетельствует о снижении плотности тепловых потоков на медные холодильники. Благодаря более низким тепловым потерям с системой охлаждения снизился расход дорогостоящего кокса.

При проведении ремонтов доменных печей преимущество применения современной системы охлаждения “горячей” ХОВ по сравнению с

охлаждением в замкнутом контуре заключается в значительно меньших капитальных затратах, меньших сроках реализации ремонта, меньшем количестве оборудования, относительной простоте эксплуатации.

К особенностям системы охлаждения “холодной” ХОВ по сравнению с СИО с принудительной циркуляцией можно отнести потребность системы в использовании теплообменников типа вода/вода или вода/воздух, позволяющих снизить температуры подаваемой на охлаждение воды до 50–55 °С, что снизит температуру холодильных плит и улучшит условия образования гарнисажа. Принципиальная схема охлаждения “холодной” ХОВ представлена на рис. 9.

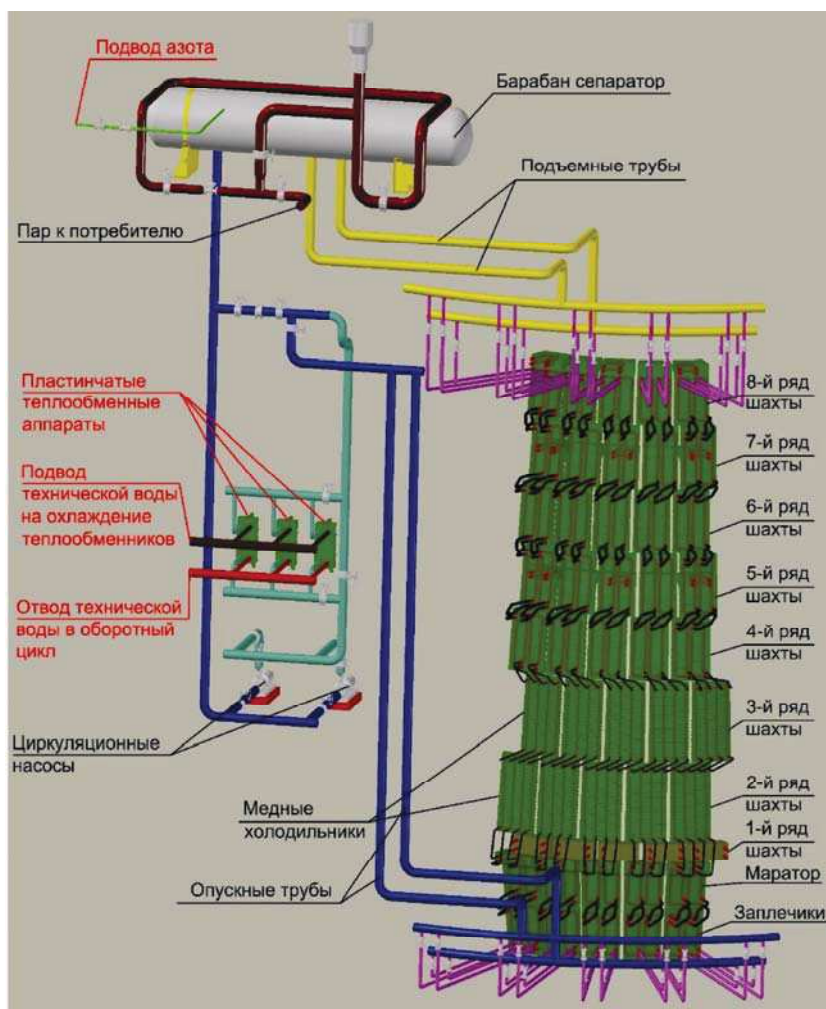


Рис. 9. Принципиальная схема охлаждения “холодной” ХОВ

К недостаткам применения данной системы при проведении реконструкции доменных печей можно отнести:

– необходимость установки дополнительного оборудования, такого как теплообменники, насосы, градирни;

– необходимость подачи технической воды для охлаждения в теплообменных аппаратах ХОВ первичного контура. Это оказывает дополнительную нагрузку на существующий оборотный цикл водоснабжения доменного цеха. Зачастую именно эта проблема делает невозмож-

ным применить систему охлаждения в замкнутом контуре при реконструкции доменных печей.

Для снижения нагрузки на оборотный цикл водоснабжения ООО «М Технология» разработало систему автоматического регулирования расхода технической воды, подаваемой на водяные теплообменники, посредством установки регулятора расхода. Информация от датчиков температуры воды и расходомеров обрабатывается в контроллере, управляющем регулятором давления, что позволяет в значительной мере экономить техническую воду, регули-

руя ее расход в зависимости от тепловой нагрузки на холодильные плиты доменной печи и сезонной температуры технической воды на входе в теплообменник, не допускать перегрева технической воды в теплообменнике, предотвращая выпадение солей жесткости (накипи).

При невозможности обеспечить необходимый расход технической воды, подаваемой на водяные теплообменники, можно установить водовоздушные теплообменные аппараты, вентиляторы которых приводятся в работу электродвигателями.

Выводы

Многозонная система охлаждения «холодной» ХОВ в замкнутом контуре в комбинации с комплексом АСУТП, с разделением на зоны в зависимости от величины воздействия тепловых нагрузок, с возможностью регулировать интенсивность охлаждения, с применением медных холодильных плит в комбинации с высокотеплопро-

водной футеровкой является наиболее современным решением, отвечающим предъявляемым сегодня высоким требованиям по обеспечению надежности и безопасности эксплуатации, позволяющим продлить период кампании доменной печи до 15 лет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Гоман, С. В. Влияние футеровки и системы охлаждения шахты на расход кокса и ресурс работы доменных печей ПАО «Запорожсталь» при применении пылеугольного топлива [Текст] / С. В. Гоман, В. И. Набока, А. П. Фоменко [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2017. — № 1. — С. 25–34.
2. Purdy, S. M. Evaluation of the Cu to be used in Manufacturing Blast Furnace Bosh Cooling Staves [Text] / S. M. Purdy // Iron making Conference Proceedings. — 2000.
3. Bonte, Luc. Installing copper staves and blast furnace operating practice at Sidmar [Text] / Luc Bonte // Iron and Steel Engineer. — 1999. — June.