

УДК 669.162.211.4:662.6/9

**А.Л. ЧАЙКА**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

**А.А. СОХАЦКИЙ**, канд. техн. наук, научный сотрудник, **Г.В. ПАНЧОХА**, научный сотрудник,

**К.С. ЦЮПА**, ведущий инженер, **В.Ю. ШОСТАК**, ведущий инженер, **Б.В. КОРНИЛОВ**, младший научный сотрудник

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ (ИЧМ им. З.И. Некрасова НАНУ), г. Днепропетровск

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ШАХТЫ И МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Выполнены исследования и анализ тепловой работы системы ограждения доменной печи при освоении технологии плавки с применением пылеугольного топлива. Показана необходимость адаптации конструкции ограждения доменной печи к работе с пылеугольным топливом.

**Ключевые слова:** доменная печь, пылеугольное топливо, шахта, металлоприемник, тепловые потери, термограмма.

Промышленный опыт использования пылеугольного топлива (ПУТ) в 2009–2013 гг. на доменных печах среднего объема (1500–3000 м<sup>3</sup>) ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК») и ОАО «Запорожсталь» позволил выявить причины уменьшения эффективности применения технологии ПУТ в Украине (наряду с более низким качеством сырья и менее совершенным технологическим процессом) по сравнению с зарубежной практикой [1–4], а именно:

- использование печей малого объема и неэффективных загрузочных устройств;
- уменьшение ресурса работы системы охлаждения печи.

Перевод отечественных доменных печей ПАО «АМК», ОАО «Запорожсталь» и ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича» на технологию работы с ПУТ показал, что системы их охлаждения выходят из строя раньше, чем у печей, работающих на природном газе [2–4].

В ходе исследования работы доменной печи ДП № 1 ПАО «АМК» установлено, что при использовании ПУТ возрастают [2–4]:

- общая тепловая мощность и производительность печи;
- количество первичного шлака и содержание закиси железа в нем;
- нестабильность тепло-газодинамической работы фурменной зоны и печи в целом;
- тепловые нагрузки на систему охлаждения горна, лещади, заплечиков и шахты.

После полного отключения природного газа и перевода печи на работу только с ПУТ износ шахты и горна усилился (несмотря на уменьшение концентрации кислорода в дутье и периферийного потока газов, а также уси-

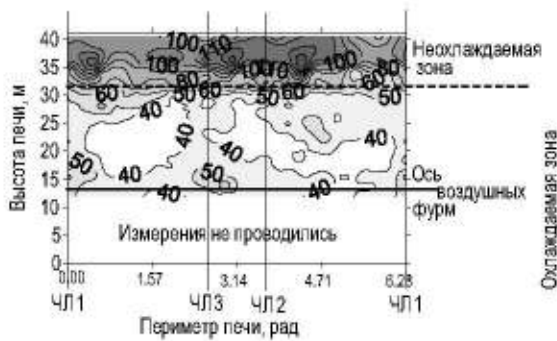
ление осевого распределения газового потока посредством управления режимом загрузки шихты) [2–4].

На ДП № 1 при увеличении расхода ПУТ и уменьшении расхода природного газа усиливались окружающая неравномерность и величина температурно-тепловых нагрузок в нижней части печи, особенно на заплечики. Изменения распределения температурно-тепловых нагрузок по высоте и периметру печи отслеживались термографическим методом измерения температуры кожуха печи и обработки данных по специальной методике (рис. 1) [5, 6].

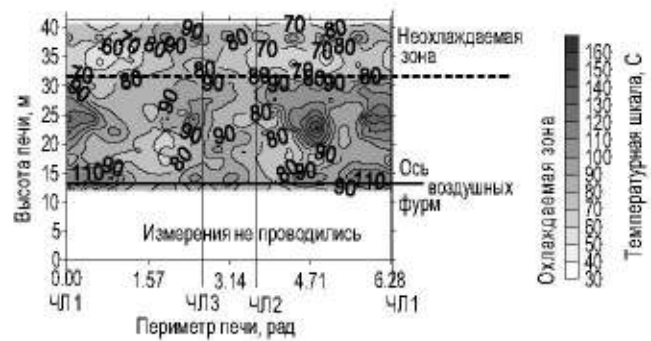
Инструментальными замерами суммарных тепловых потерь в системе охлаждения ДП № 1 установлено, что средняя величина внешних тепловых потерь при работе с природным газом составляла 14 МВт (шесть замеров), при работе с ПУТ и с природным газом – 20 МВт (шесть замеров), только с ПУТ – 26 МВт (один замер). Расчетная величина расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь изменялась от 16 до 37 кг/т чугуна (рис. 2) [2, 3].

Наиболее существенно (почти вдвое) возросли при переходе на технологию работы ДП № 1 с ПУТ тепловые нагрузки на систему охлаждения горна и лещади (рис. 3).

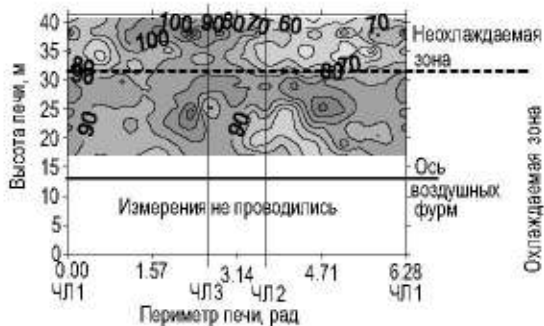
Увеличение тепловых нагрузок на заплечики и горн, усиление окружающей неравномерности их распределения указывают на необходимость пересмотра технических решений, принимаемых при разработке конструкций системы охлаждения и холодильников, профиля печей, переходящих на технологию работы с ПУТ (например, печей, работающих с использованием до 100 % окатышей или выплавляющих специальные марки чугуна). Актуальными являются автоматизированный контроль внешних тепловых потерь в системе охлаждения печи



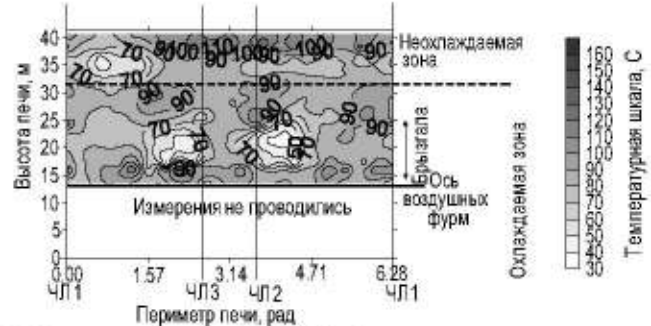
После выдувки печи, сентябрь 2010 г.



Работа без ПУТ, производство 5900 т/сут



Работа с расходом ПУТ 70 кг/т чугуна, производство 6100 т/сут



Работа с расходом ПУТ 130 кг/т чугуна, производство 6250 т/сут (после заправки под кожух огнеупорной массы)

Рисунок 1 – Термограммы доменной печи по данным инструментальных замеров в период работы с ПУТ и природным газом

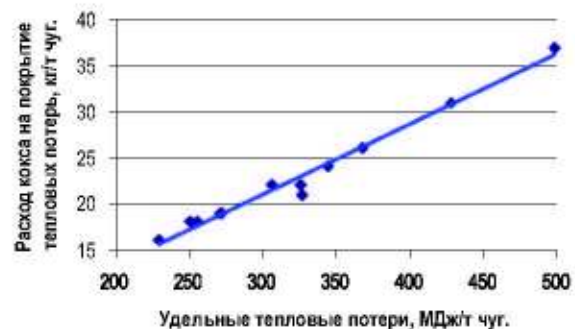
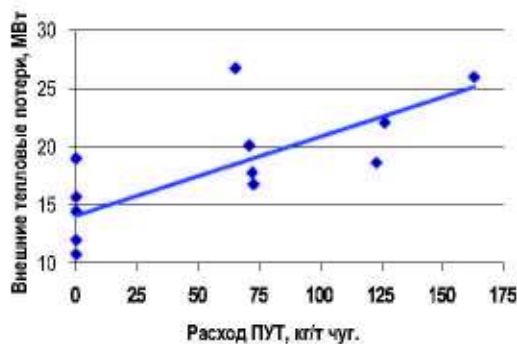


Рисунок 2 – Суммарные тепловые потери в системе охлаждения печи и расход кокса на их покрытие

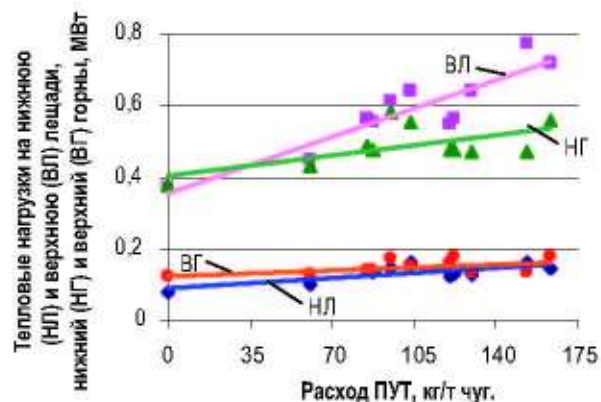
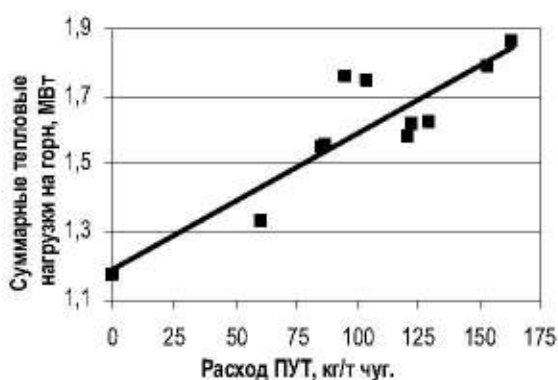


Рисунок 3 – Тепловые потери в системе охлаждения горна

и использование качественных холодильников, стойких к термомеханическим напряжениям и истиранию [5, 6].

С увеличением объема доменных печей от 1033 до 2000, 3200, и 5000 м<sup>3</sup> проектный угол наклона шахты уменьшается с 85°35' до 84°23', 83°43', 81°59' соответственно.

Уменьшение угла наклона шахты, определяющее направление развития периферийного потока газа, прогрессирующего в процессе износа футеровки и системы охлаждения, по-видимому, является основной причиной роста тепловых нагрузок на холодильники доменных печей большого объема [6]. Подобным образом влияет увеличение числа фурм и леток при специфической периферийной подаче дутья в печь и выпуске продуктов плавки. Усилению периферийного хода и росту потерь теплоты способствуют повышение тепловой мощности печи при пониженном расходе кислорода дутья, увеличение давления газов в печи, а также другие факторы.

Уменьшению периферийности схода шихты и сохранению очертаний траекторий опускания материалов в фурменные очаги и линий тока выходящих из них газов способствует увеличение отношения диаметра распара ( $D_p$ ) к диаметру горна ( $d_r$ ) [7, 8]. Увеличение высоты заплечиков и распара с ростом  $D_p/d_r$  способствует снижению тепловых нагрузок на заплечики и более стабильной тепловой работе низа печи (за счет улучшения условий для противотока газов, шихты и расплава, тепловой обработки материалов и восстановительной работы газового потока), уменьшению сопротивления восходящему потоку газов, разрыхлению слоя шихтовых материалов в районе распара и заплечиков, что особенно актуально для технологии работы с ПУТ в условиях недостаточно высокого качества шихтовых материалов [7, 8].

Исследования тенденции к возрастанию плотности теплового потока и его влияния на систему охлаждения с увеличением объема печей [9] были начаты в работах И.А. Соколова, Н.И. Красавцева, М.Д. Жембуса [10–12]. Замеры показали, что с увеличением объема печей с 1000 до 5000 м<sup>3</sup> средний удельный тепловой поток возрастает примерно на 60 %, а в шахте печи этот показатель увеличивается вдвое [13, 14], что опровергает широко используемое в проектах систем охлаждения положение о независимости плотности теплового потока от объема доменных печей [15].

Работы по продлению срока службы печей исторически ведутся в направлении совершенствования таких составляющих:

- системы охлаждения;
- профиля и геометрических размеров печи;
- управления распределением шихты и газового потока по радиусу печи.

Системы охлаждения шахты и заплечиков доменных печей отличаются большим разнообразием конструкций холодильников. В отечественной и зарубежной практике в настоящее время широко применяются чугунные вертикальные, медные горизонтальные и вертикальные плитовые холодильники.

Мировой опыт эксплуатации систем охлаждения доменных печей с вертикальными плитовыми холодильниками доказал их преимущества перед кронштейновыми и горизонтальными, которые расположены в шахматном порядке и создают значительную неравномерность теплового поля (а следовательно, и поля термических напряжений) в кладке, что приводит к ее разрушению [16]. Применение вертикальных плитовых холодильников позволило увеличить равномерность и эффективность охлаждения, а также устойчивость конструкции стенки печи.

Медные холодильники нашли широкое применение в странах Западной Европы и в США. В СССР использовались более дешевые холодильники – вертикальные чугунные, которые не уступали медным в обеспечении ресурса и межремонтного периода эксплуатации шахты печей. Применение медных холодильников оправдано только при высокоинтенсивной работе печей с вдуванием в горн ПУТ. Недостаточность ресурса плитовых чугунных холодильников заплечиков при использовании ПУТ подтвердилась в результате эксплуатации ДП № 1 (полезным объемом 3000 м<sup>3</sup>) ПАО «АМК».

Опыт эксплуатации доменных печей с использованием ПУТ в Японии показал, что за счет применения качественно изготовленной цельной конструкции холодильника из чугуна с шаровидным графитом и огнеупора, залитого в тело холодильника, а также увеличения количества и плотности расположения труб водяного охлаждения внутри тела холодильника можно добиться увеличения продолжительности кампании печи до 15–25 лет [17].

Главные недостатки медных холодильников по сравнению с чугунными – высокая стоимость, большие тепловые потери в системе охлаждения и увеличение расхода кокса на их покрытие. Преимуществом является простота изготовления. Большинство печей в Европе при реконструкции оснащают медными холодильниками.

Целесообразность применения медных холодильников для продления кампании печи на отечественных предприятиях неоднозначна, так как при этом почти в 1,5 раза увеличивается расход кокса на покрытие внешних тепловых потерь. Например, по данным исследований Института черной металлургии НАН Украины (ИЧМ НАНУ), проведенных на доменной печи «Россиянка» ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ОАО «НЛМК») объемом 4291 м<sup>3</sup>, вследствие примене-



ния медных холодильников от заплечиков до середины шахты и охлаждения чугунными холодильниками с середины шахты до колошника расход кокса на покрытие тепловых потерь в системе охлаждения на 5–10 кг/т чугуна больше, чем на ДП № 6 ОАО «НЛМК» объемом 3200 м<sup>3</sup>, охлаждаемой плитовыми чугунными холодильниками до середины шахты. Учитывая то, что объем ДП «Россиянка» примерно на 1000 м<sup>3</sup> больше, чем ДП № 6 ОАО «НЛМК», при нормальном режиме плавки система охлаждения на ДП «Россиянка» должна работать более экономично.

Исследования показали, что применение медных холодильников для продления кампании печи является исключительно вынужденной мерой, которая вызвана отсутствием возможности выпуска качественных чугунных плитовых холодильников с залитым в них огнеупором (например, по образцу, предлагаемому японскими разработчиками) [17].

Таким образом, одной из актуальных задач, стоящих перед металлургами Украины в связи с освоением ПУТ, является организация изготовления качественных холодильников.

В настоящее время ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» совместно с ИЧМ НАНУ и ГП «Укрспромез» ведут разработку высокоэффективной системы охлаждения доменных печей с использованием полых стальных холодильников с неизотермическими теплопередающими стенками. Такие стенки снабжены специальными выступами оребрения и способны передавать кипящей воде тепловые потоки плотностью 5 МВт/м<sup>2</sup> и более. Система охлаждения предусматривает поддержание заданного уровня воды в холодильниках, обеспечение кипения воды во всех холодильниках, генерирование пара с повышенными

и стабильными параметрами по давлению (до 8 кгс/см<sup>2</sup>) и температуре, а также возможность использования энергии пара для выработки электроэнергии в турбогенераторах. Закладываемые технические решения обеспечивают стойкость холодильников к любым возникающим в печи тепловым нагрузкам (которые могут достигать до 3,4 МВт/м<sup>2</sup>), позволяют эффективно утилизировать выделяемое печью тепло и уменьшают расход воды в 10–20 раз. Кроме того, высокая теплоотводящая способность холодильников нового типа создает условия для стабилизации рабочих температур на футеровке печи и для образования гарнисажа. Действие отмеченных факторов уменьшает потери тепла из рабочего объема печи и сокращает расход кокса для компенсации этих потерь. Система охлаждения обеспечивает также равномерное распределение температур в кожухе печи, так как благодаря кипению воды в холодильниках их поверхности, обращенные к кожуху, имеют постоянную температуру. В отличие от систем испарительного охлаждения с естественной и искусственной циркуляцией данная система позволяет поддерживать в холодильниках одинаковый, не зависящий от тепловой нагрузки температурный уровень и обеспечивать более высокие и стабильные параметры пара, чем традиционные системы испарительного охлаждения.

Рекомендация зарубежных проектных организаций увеличить высоту охлаждаемой части шахты, как и их предложения по применению медных холодильников не являются прогрессивными. При стабильно работающих печах и высокой технологической культуре производства нет необходимости увеличивать охлаждаемую высоту шахты, которая не определяет межремонтный период работы. Тепловые нагрузки по высоте и в верхней части шахты имеют минимальную величину, соответствующую

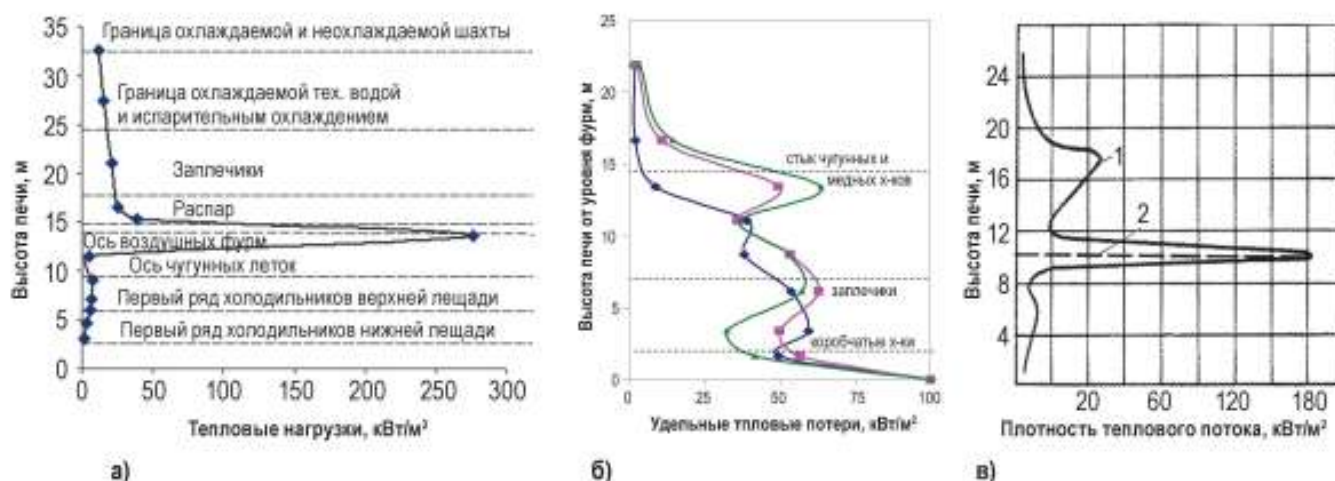


Рисунок 4 – Распределение удельных потерь теплоты по высоте доменных печей:

а) ДП № 9 ПАО «АМКР»; б) ДП «Россиянка» ОАО «НЛМК»; в) ДП № 6 ОАО «НЛМК»

1 – распределение удельных потерь теплоты по высоте; 2 – уровень воздушных фурм

температурному полю в печи (рис. 4). При высокой интенсивности охлаждения шахты может происходить инверсия температурного поля с образованием настывей из-за нестабильных температурно-тепловых условий в этой зоне [18] (рис. 5).

Как показали исследования, в холодильниках верхних рядов нет постоянных высоких тепловых нагрузок, однако их периодическое воздействие, связанное в основном с колебаниями температурных полей по высоте шахты на стыках зон (при работе ДП в нестабильных условиях, характерных для отечественных печей, которые эксплуатировались в конце прошлого века, может приводить к разрушению неохлаждаемой части шахты.

Полученные результаты свидетельствуют о нецелесообразности увеличения охлаждаемой зоны шахты. Более того, на ДП № 6 НЛМК высота такой зоны была уменьшена на один ряд холодильников [19].

Как показывают экспериментальные данные, стойкость даже высококачественных и дорогостоящих огнеупоров, защищающих плитовые холодильники, не превышает 12–24 месяца [16, 20–22]. Исходя из этого немецкие исследователи П. Хайнрих, Х. Хилле и К. Рихерт в работе [22] отмечают, что «для защиты горячей части плитовых холодильников целесообразно применять дешевые огнеупоры или торкрет-массы, а возможно, следует вообще отказаться от применения огнеупоров для защиты плитовых холодильников». Свое мнение по этому вопросу японские ученые выразили фра-

зой: «Газораспределение – лучший огнеупор, чем вода». Исследования ИЧМ НАНУ, выполненные на доменных печах Украины и ближнего зарубежья, подтверждают приведенные выше выводы [5, 6, 23].

На всех доменных печах Украины для периферийного охлаждения горна используются чугунные плитовые холодильники, эффективность которых определяется условиями их эксплуатации. Полная тепловая нагрузка на холодильник площадью около 2 м<sup>2</sup> не должна превышать 25–30 тыс. Вт, что следует учитывать при проектировании огнеупорной футеровки металлоприемников доменных печей, которые будут работать на ПУТ.

Произведенные за последние 25 лет капитальные ремонты 1-го разряда на доменных печах Украины предусматривали использование для футеровки горна и лежачи более стойких малопористых, микропористых и супермикропористых углеродистых огнеупоров отечественного и зарубежного производства. Уплотнение структуры таких огнеупоров происходит как за счет уменьшения количества пор, так и вследствие уменьшения их размеров.

Углеродистые огнеупоры имеют и значительно большие коэффициенты теплопроводности по сравнению с обычным углеродом. Так, если теплопроводность обычного углерода составляет 6,5–7,5 Вт/(м·К), то для малопористых огнеупоров значения этого параметра лежат в интервале 7,5–10,3 Вт/(м·К), а для микропористых и супермикропористых – в интервалах 7,4–16,2 Вт/(м·К) и 20,5–22,3 Вт/(м·К) соответственно.

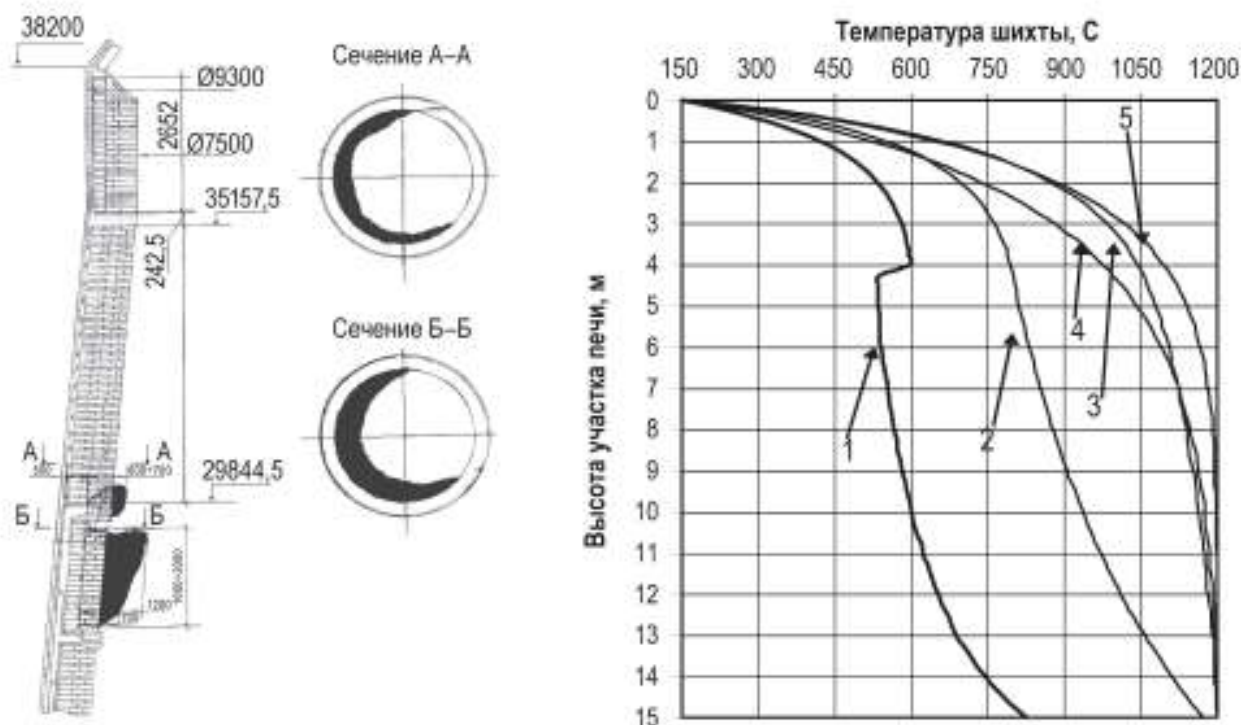


Рисунок 5 – Настывь на ДП № 6 ПАО «АМКР» и температура шихты на различных расстояниях от стенки, мм: 1 – 0 мм; 2 – 30 мм; 3 – 100 мм; 4 – 270 мм; 5 – ось



Результаты расчета удельных тепловых нагрузок на систему охлаждения горна и лещади (без вдувания и с вдуванием ПУТ в ДП) при одинаковой толщине футеровки и средней теплопроводности под нагрузкой приведены в табл. 1. Из нее видно, что при вдувании ПУТ еще при проектной толщине футеровки, выполненной из наиболее стойкого супермикропористого углеродистого огнеупора, холодильники горна и лещади начинают работать на предельных нагрузках, которые составляют соответственно 14 тыс. и 15 тыс. Вт/м<sup>2</sup> (при средней площади холодильника ~ 2 м<sup>2</sup>).

При износе футеровки на одну треть от ее первоначальной толщины холодильники горна и лещади начинают работать на предельных нагрузках и в случае использования микропористого углеродистого огнеупора (табл. 2).

Большие тепловые нагрузки на систему охлаждения приводят к перемещению опасных для стойкости углерода изотерм 700–1150 °С в глубь углеродистого блока, поэтому при проектировании ДП с вдуванием ПУТ необходимо предусмотреть использование огнеупорной футеровки, имеющей меньшую теплопроводность и большую стойкость к жидким продуктам плавки. Такими свойствами обладают керамические материалы. Керамическая кладка отличается низкой теплопроводностью 1,8–5,2 Вт/(м·К), высокой температурой начала размягчения под нагрузкой и хорошей устойчивостью к воздействию жидких продуктов плавки.

Футеровку горна и лещади с применением керамических материалов выполняют следующим образом. Со стороны системы охлаждения выкладывают микропористый или супермикропористый углерод, обладающий высокой теплопроводностью, что обеспечивает эффективное охлаждение кладки. На рабочей поверхности горна выполняют так называемый керамический

стакан, применение которого позволяет снизить температуру углеродистой футеровки и сократить тепловые потери горна. Для керамической кладки используют небольшие кирпичи из пикррохромита, монокрома, хромокорунда, корунда на сиалоновой связке, оксидной керамики, карбидокремниевых огнеупоров и коранита – коричневого корунда на сиалоновой связке. Эти материалы отличаются высокой стойкостью к воздействию жидких продуктов плавки и перепадам температур. Благодаря низкой теплопроводности внутренней керамической кладки уменьшаются тепловые потери и поддерживается оптимальный тепловой режим горна, что дает возможность сократить расход кокса и обеспечить стабильность доменного процесса.

### ВЫВОДЫ

Для печей, переводимых на технологию работы с ПУТ, целесообразно усовершенствовать конструкцию загрузочного устройства, системы охлаждения, холодильников, футеровки и профиля, при этом особое внимание необходимо уделить стойкости и совершенствованию огнеупорных материалов, используемых в горне. Кроме того, следует организовать автоматизированный контроль внешних тепловых потерь и состава колошникового газа по радиусу печи.

Использование ПУТ приводит к нестабильности тепло-газодинамической работы фурменной зоны и печи в целом, увеличению тепловых нагрузок на систему охлаждения горна и лещади, заплечиков и шахты.

Пульсационный режим подачи и сжигания ПУТ, его значительные удельные расходы на 1 м<sup>3</sup> дутья (в два раза большие по сравнению с природным газом) вызывают переменные тепловые нагрузки на холодильники и резкие колебания температуры (особенно в области

**Таблица 1 – Удельные тепловые нагрузки на систему охлаждения**

Материал футеровки (углерод)	Средняя теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельные тепловые нагрузки, Вт/м <sup>2</sup>			
		без вдувания ПУТ		с вдуванием ПУТ	
		горн	верхняя лещадь	горн	верхняя лещадь
Малопористый	9	5900	4300	8850	8600
Микропористый	13	7730	5500	11600	11100
Супермикропористый	21	9870	7200	14800	14000

**Таблица 2 – Удельные тепловые нагрузки на систему периферийного охлаждения при износе кладки на одну треть**

Материал футеровки (углерод)	Средняя теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельные тепловые нагрузки, Вт/м <sup>2</sup>			
		без вдувания ПУТ		с вдуванием ПУТ	
		горн	верхняя лещадь	горн	верхняя лещадь
Малопористый	9	7270	5400	10090	10800
Микропористый	13	8750	6580	13120	13170
Супермикропористый	21	11120	8060	22240	16100

запечников, распара и низа шахты), что приводит к образованию и разрушению гарнисажа.

Одной из актуальных задач, стоящих перед учеными и металлургами Украины в связи с внедрением ПУТ, является обеспечение изготовления качественных холодильников доменной печи с длительным сроком службы. Для этого прежде всего необходимо разработать прогрессивную технологию их производства, предусматривающую:

- увеличение количества и плотности расположения труб охлаждения водой внутри тела холодильника;
- определение оптимальных геометрических размеров и формы рабочей ребристой поверхности холодильника для удержания футеровки;
- выбор подходящего материала для тела холодильников и огнеупора и улучшение качества их изготовления;
- организацию принудительной циркуляции воды в системе охлаждения и применение химически очищенной воды.

Установлено, что повышение интенсивности охлаждения (увеличение поверхности охлаждения шахты до колошника и расхода воды в системе охлаждения, использование высокотеплопроводных материалов и меди в конструкции печи) приводит к увеличению расхода кокса и ухудшает технико-экономические показатели доменной плавки, создает предпосылки для инверсии температурного поля в шахте с возможным образованием настывлей вследствие нестабильных температурно-тепловых условий в этой зоне. Охлаждение шахты доменной печи холодильниками до колошника не является целесообразным, так как эта зона не определяет межремонтный период работы печи.

Увеличение объема доменных печей с 1000 до 5000 м<sup>3</sup> и уменьшение проектного угла наклона их шахты с 85°35' до 81°59' приводят к усилению распределения газового потока к периферии и увеличению удельной тепловой нагрузки на 1 м<sup>2</sup> площади холодильника почти на 60 %, в результате чего возрастают требования к системе охлаждения и распределения шихтовых материалов на колошнике печи, особенно при работе с ПУТ.

В настоящее время наиболее перспективным является применение:

- карбидкремниевых огнеупоров на углеродистой связке (SiC + C), которые превосходят остальные огнеупоры по устойчивости к щелочам, тепловым ударам, а также к окислению в высокотемпературной зоне шахты (при этом толщина углеродистого и керамического слоев футеровки и их теплопроводность должны обеспечивать удержание температуры в пределах 450–1450 °С в керамическом слое);

- технологии керамического стакана (в горне), что обеспечивает повышенную стойкость к воздействию чугуна, защиту холодильников от теплового удара, уменьшение тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Большаков В. И.** Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В. И. Большаков, – К. : Наукова думка, 2007. – 412 с.
2. Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м<sup>3</sup>, с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2012. – № 4. – С. 36–40.
3. Тепловая работа доменной печи, полезным объемом 3000 м<sup>3</sup>, при переходе на технологию применения пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий, Р. В. Авдеев // VI Международный Конгресс по агло-коксо-доменному производству «Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования разных видов топлива и сырья», 20–24 мая 2013 г., г. Ялта. – С. 261–270.
4. 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.
5. Новые методы контроля технического состояния ограждения доменных печей без останова технологического процесса / В. И. Большаков, С. П. Суцнев, А. Л. Чайка, А. А. Суслонов, А. Б. Юрьев, С. Ф. Бугаев, Г. В. Панчева, А. В. Бородулин // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация».* – 2006. – № 6. – С. 27–38.
6. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, Г. И. Орел. – Кривой Рог : СП «Мир», 2004. – 412 с.
7. **Жеребин Б. Н.** Неполадки и аварии в работе доменных печей / Б. Н. Жеребин, А. Е. Пареньков. – Новокузнецк, 2001. – 275 с.
8. **Кропотов В. К.** Проектирование доменной печи: учебное пособие / В. К. Кропотов, В. Г. Дружков, И. Е. Прохоров / Министерство образования Российской Федерации. – Магнитогорск, 2004. – 128 с.
9. Тепловые потери доменных печей различного объема / А. В. Бородулин, А. Я. Зусмановский, В. А. Шатлов [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 1976. – № 7. – С. 28–32.



10. **Соколов И. А.** О рационализации профилей доменных печей / И. А. Соколов // Уральская металлургия. – 1933. – № 7–8. – С. 9–11.
11. **Красавцев Н. И.** Развитие техники доменного производства в СССР в ближайшем семилетии / Н. И. Красавцев. – М. : Металлургиздат, 1960. – 71 с.
12. **Жембус М. Д.** Основные технологические факторы износа шахты доменной печи и пути совершенствования ее профиля : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / М. Д. Жембус. – Днепропетровск, 1969. – 24 с.
13. Совершенствование системы охлаждения доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> / А. В. Бородулин, В. В. Канаев, И. Т. Хомич [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1980. – № 3. – С. 28–30.
14. Сокращение тепловых потерь доменных печей / А. В. Бородулин, В. В. Канаев, Р. А. Местецкий [и др.] // Сталь. – 1984. – № 2. – С. 8–12.
15. **Андоньев С. М.** Охлаждение доменных печей / С. М. Андоньев, О. В. Филиппьев, Г. А. Кудинов. – М. : Металлургия, 1972. – 362 с.
16. **Сорокин Л. А.** Работа конструкций доменных печей / Л. А. Сорокин. – М. : Металлургия, 1976. – 352 с.
17. Огнеупоры в доменной печи и технологические меры в шахте для продления кампании печи / ОАО «Черметинформация» // Новости черной металлургии за рубежом. – 2011. – № 5. – С. 11–15.
18. Моделирование теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А. Ф. Авцинов, А. В. Бородулин, В. К. Хрущ [и др.] // Сталь. – 1996. – № 8. – С. 4–9.
19. Опыт эксплуатации системы охлаждения доменной печи № 6 НЛМК / Н. С. Антипов, Е. Е. Гаврилов, А. В. Бородулин [и др.] // Сталь. – 1987. – № 7. – С. 12–15.
20. **Местецкий Р. А.** Технологические основы изготовления высококачественных доменных холодильников / Р. А. Местецкий. – Днепропетровск : АО «Днепротяжмаш», 2000. – 283 с.
21. **Стокман Р.** Новые конструкции оборудования доменных печей / Р. Стокман, Р. ван Лаар // Сталь. – 2003. – № 2. – С. 13–17.
22. **Хайнрих П.** Охлаждение кожуха доменной печи – конструкции систем охлаждения и затраты / П. Хайнрих, Х. Хилле, К. Рихерт // Черные металлы. – 1986. – № 2. – С. 11–18.
23. Разработка мониторинга технического состояния ограждения доменной печи / А. Л. Чайка, А. В. Бородулин, А. А. Сохацкий, Г. Т. Цыганков, А. И. Швачка // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. – Днепропетровск : НМетАУ, 2005. – Т. 2. – С. 383–392.

*Поступила в редакцию 02.04.2014*

Виконано дослідження та аналіз теплової роботи системи огорожі доменної печі при освоєнні технології плавки з застосуванням пиловугільного палива. Показано необхідність адаптації конструкції огороження доменної печі до роботи з пиловугільним паливом.

Work purpose is investigation of flue-dust ejection depending on gas-dynamic mode of top area that is free of burden materials. One be defined regularity of change of flue-dust ejection and pressure loss according to change parameters of gas flow at top.