

УДК 669.162.2

А.Л.Чайка¹, В.В.Лебедь¹, А.А.Сохацкий¹, Б.В.Корнилов¹,
А.А.Москалина¹, В.Ю.Шостак¹, Р.В.Авдеев², А.П.Фоменко³,
П.В.Карнаухов⁴

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРОФИЛЯ И
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К
ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО
ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ УКРАИНЫ**

1 – Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины,

2 – ЧАО «МК «Азовсталь»; 3 – ПАО «Запорожсталь»

4 – ООО «Метинвест Инжиниринг»

Приведены результаты анализа проектов профиля доменной печи полезным объемом порядка 2000 м³ с различной конструкцией системы охлаждения, материалов и толщины футеровки при вдувании в ее горн пылеугольного топлива (ПУТ). Выполнены расчеты распределения тепловых нагрузок и температуры рабочей поверхности стенки по высоте шахты при изменении толщины футеровки, высоты установок медных и чугуновых холодильников, комбинаций охлаждения шахты системой испарительного охлаждения (СИО) и «холодной» химически очищенной водой. Дано обоснование конструкций профиля и с использованием полного энергетического баланса определены прогнозные технологические параметры работы печи при переходе на работу с вдуванием ПУТ в условиях Украины.

Ключевые слова: доменная печь, профиль, пылеугольное топливо, тепловые нагрузки, температура, полный энергетический баланс

Состояние вопроса. В настоящее время, из-за высокой цены природного газа и его дефицита, металлургические комбинаты Украины переходят от технологии работы с природным газом к технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ: ПАО «Алчевский металлургический комбинат» («АМК») – 2009 год, ПАО «Запорожсталь» – 2011 год, ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича» («ММК им. Ильича») – 2012 год, ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского» («ДМКД») – 2014 год, ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» («АМКР») – 2016 год, ЧАО «ЕМЗ» – 2016 год, ПАО «Азовсталь» - 2017 год[1-8].

При переходе доменного производства Украины на технологию плавки с ПУТ изменились условия образования гарнисажа, восстановительной и тепловой работы газового потока, качество и химический состав топлива, что повлияло как на технологию ведения доменной плавки, так и на ее технико-экономические показатели и ресурс работы доменных печей.

При этом в 2-3 раза уменьшился ресурс работы заплечиков и низа шахты печи, что снижает продолжительность кампании печи и является одной из причин ухудшения технико-экономических показателей доменной плавки и эффективности этой технологии на доменных печах Украины в сравнении с передовой мировой практикой [1-8] (рис.1).

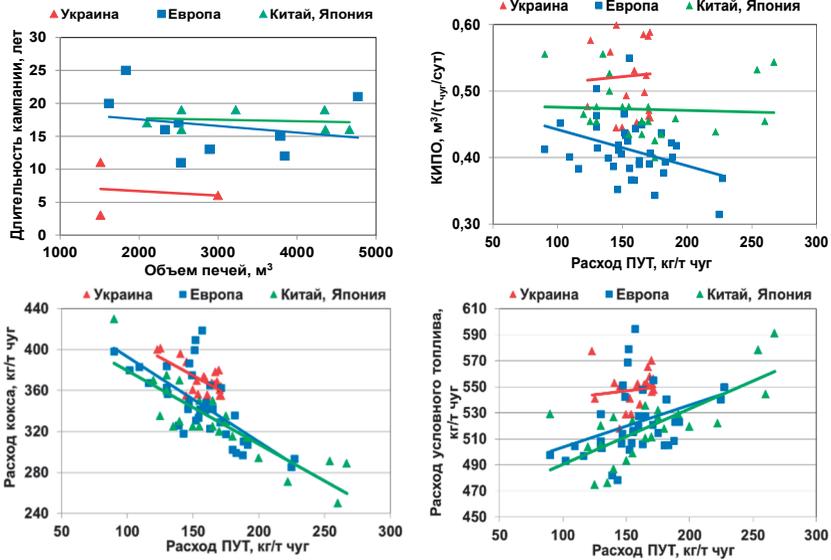


Рисунок 1 – Сопоставление с зарубежной практикой длительности кампании и лучших показателей работы с ПУТ доменных печей ПАО «Запорожсталь», ЧАО «ММК им. Ильича» и ПАО «АМК»

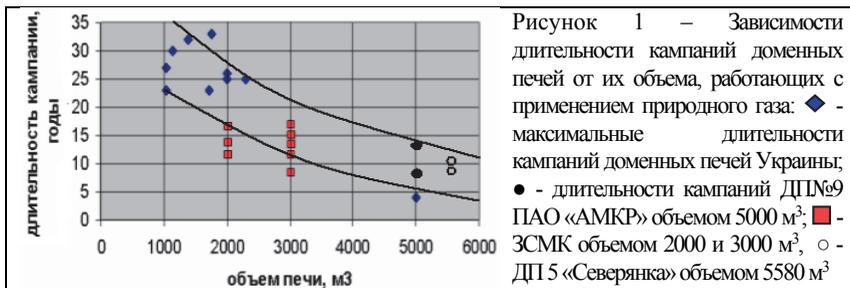
Уменьшения ресурса работы печей Украины, переходящих на технологию работы с ПУТ, связано с использованием типовой конструкции доменных печей Украины для выплавки передельного чугуна с применением природного газа (рис. 2).

Основными отличительными особенностями типовой конструкции доменных печей Украины для выплавки передельного чугуна с применением природного газа являются:

- конструкция с опорным кольцом (маратором), на который опирается шахта и верх печи;
- вертикальные чугунные холодильники в заплечиках и до середины шахты;
- отсутствие охлаждения печи от середины шахты до колошника;
- футеровка шахты опирается на «L»-образные холодильные плиты;
- распар формируется футеровкой, а не вертикальной холодильной плитой;
- заплечики и шахта охлаждаются СИО (за исключением ДП № 9 ПАО «АМКР», объемом 5000 м³, где с увеличением объема печи увеличились тепловые нагрузки – заплечики и низ шахты охлаждаются технической водой).

Рисунок 2 – Конструкции и профили выдутых доменных печей Украины и России, работавших с природным газом: 1, 2 – ММК, 1370 м³; 3, 4 – ЗСМК,

2000 и 3000 м³; 5 – КМК, 1462 м³; 6 – КарМК, 1719 м³; 7 – НЛМК, 2000 м³; 8 – ЧерМК, 2700 м³; 9, 10 – ДМК им. Дзержинского, 1386 м³, 11 – АМКР, 5000 м³



Конструкция доменной печи для работы с природным газом обеспечивала в среднем 10-15-летнюю кампанию, без применения дорогостоящих медных холодильников, при максимальном использовании восстановительного потенциала природного газа за счет более «вытянутого» вверх и узкого в распаре профиля печи, в сравнении с зарубежными конструкциями печи для ПУТ.

Анализ существующих конструкций профиля доменных печей, работающих с ПУТ. Основными отличительными особенностями современной конструкции доменных печей Европы, работающих с пылеугольным топливом, в сравнении с доменными печами Украины являются:

- конструкция печи с самонесущим кожухом;
- вертикальные (предварительно футерованные) или горизонтальные медные холодильники в заплечиках и до середины шахты;
- с середины шахты и до колошника печь охлаждается вертикальными, предварительно футерованными, чугунными холодильными плитами без «L»-образных выступов;
- распар формируют вертикальной холодильной плитой;
- заплечики и шахта охлаждаются «холодной» химически очищенной водой.

Конструкция зарубежных доменных печей для работы с ПУТ (рис.4) обеспечивает в среднем 10-15-летнюю кампанию и при максимальном расходе вдуваемого ПУТ за счет более «бочкообразного» профиля печи с меньшим углом наклона заплечиков, большим диаметром распара и колошника, меньшей высотой шахты и углом ее наклона, в сравнении с конструкцией печи сопоставимого объема для работы с природным газом.

Рисунок 4 – Конструкция профиля зарубежных доменных печей, работающих с ПУТ: 1 – Ijmuiden, № 7; 2, 3 – Salzgitter, A, C; 4, 5 – Rogesa Dillingen, № 4, 5; 6 – Lulea, № 3; 7 – Linz, A; 8 – Китай

ПАО «Запорожсталь» одним из первых в Украине комплексно, с привлечением передового зарубежного опыта, отечественных проектных и научных организаций с участием ИЧМ НАНУ, подошли к решению задачи по улучшению конструкции профиля доменной печи для работы с ПУТ (рис.5). На доменных печах ПАО «Запорожсталь» реализованы и находятся на стадии внедрения:

- конструкция печи с самонесущим кожухом;
- вертикальные, предварительно футерованные, медные холодильники в заплечиках, распаре и до середины шахты;
- вертикальные медные холодильники в заплечиках, распаре и до середины шахты;

Рисунок 5 – Конструкция профиля доменных печей ПАО «Запорожсталь», работающих с ПУТ: 1 – традиционная (старая) конструкция; 2,3,4 – существующие конструкции; 5 – проект.

- с середины шахты и до колошника печь охлаждается чугунными холодильными плитами;
- уменьшен угол наклона заплечиков и увеличена их высота, увеличен диаметр распара;
- угол наклона заплечиков уменьшен с 80° до 72° , отношение диаметра распара к диаметру горна увеличено с 1,16 до 1,25;
- система испарительного охлаждения с принудительной циркуляцией воды;
- заплечики и шахта охлаждаются «холодной» химически очищенной водой;
- применение современных карбидокремниевых огнеупоров в заплечиках и внизу шахты;
- установка автоматизированных систем контроля тепловой работы и разгара футеровки печи;
- установка современного БЗУ, модернизация и совершенствование средств контроля и управления радиальным распределением, восстановительной и тепловой работой газового потока.

Экономический эффект от применения новой конструкции шахты в сравнении с конструкцией, где использовались традиционные решения для технологии работы с природным газом, составил в среднем ~ 18 кг экономии кокса на тонне выплавленного чугуна.

Выбор профиля печи полезным объемом порядка 2000 м^3 при применении ПУТ в условиях Украины. При разработке ИЧМ НАНУ конструкции современного профиля доменной печи полезным объемом порядка 2000 м^3 учитывался современный опыт ПАО «Запорожсталь» и Европы. Количество вариантов проекта конструкции нового профиля обусловлено поиском рациональных вариантов, в котором бы достиглось

компромиссное решение по критериям «Цена – Надежность – Эффективность» (рис.6).

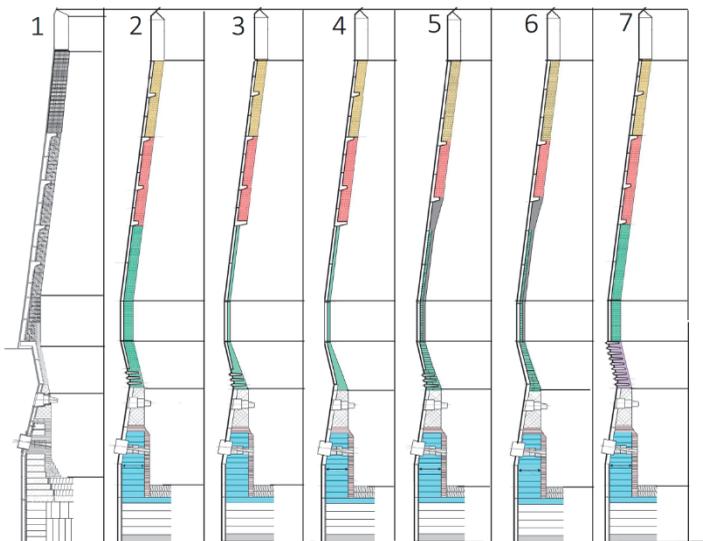
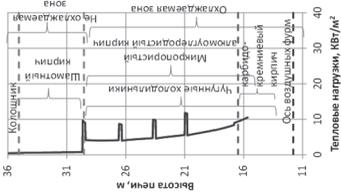


Рисунок 6 – Эскиз старого (1) и проектные варианты (2-7) конструкции профиля доменной печи полезным объемом порядка 2000 м³ для работы с ПУТ

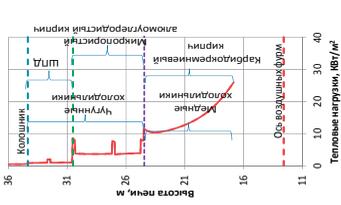
Общим для всех вариантов конструкции нового профиля печи является:

- конструкция печи с самонесущим кожухом;
- приоритетное применение вертикальных, предварительно футерованных, медных холодильников в заплечиках и до середины шахты;
- увеличение внутреннего диаметра, зумпфа и полезной высоты горна;
- применение современных огнеупоров;
- охлаждение заплечиков и шахты до колошника «холодной» химически очищенной водой;
- уменьшение угла наклона заплечиков и увеличения их высоты;
- высота распара 2700 мм;

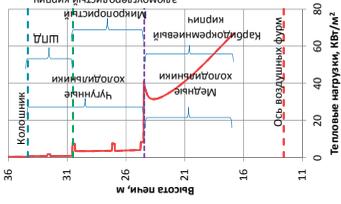
вариант 1



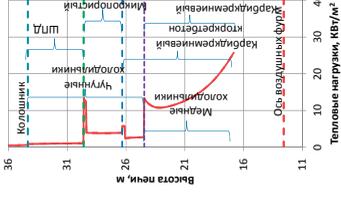
вариант 2, 7



вариант 3,4



вариант 5



вариант 6

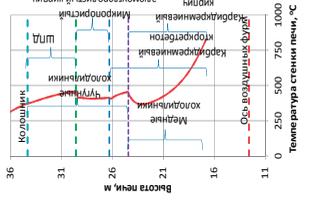
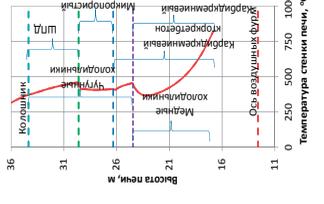
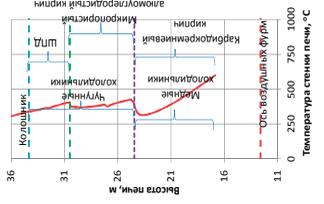
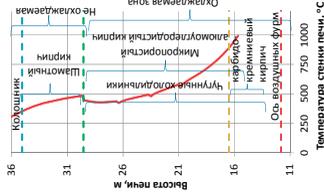
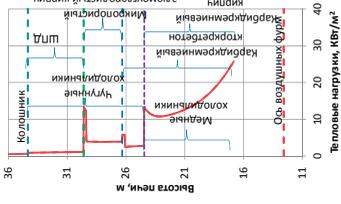


Рисунок 7 — Распределение тепловых нагрузок по высоте шахты и температуры на рабочей поверхности стенки шахты при использовании старого (1) и вариантов (2-7) конструкции нового профиля доменной печи с полезным объемом порядка 2000 м³ для работы с ПУТ в условиях Украины

- увеличение диаметра распара и колошника.
- Отличаются проектные варианты эскизов профиля:
- толщиной футеровки и соответственно геометрическими размерами внутреннего профиля;
 - комбинацией вертикальных и горизонтальных медных холодильников в заплечиках.

Наиболее рациональным, прогрессивным решением избавиться от искажения профиля в районе стыка медных и чугунных холодильников в вариантах №2 – №7 является применение предварительно футерованных чугунных или стальных холодильников для охлаждения шахты. Это решение требует дополнительных затрат и зависит от финансирования проектов по реконструкции доменных печей.

Применение современных конструкций доменных печей и анализа распределения температурно-тепловых нагрузок для них позволит увеличить продолжительность кампании доменной печи и тем самым обеспечить успешное освоение технологии доменной плавки с применением ПУТ на металлургических предприятиях Украины [1-8].

Исследование распределения температурно-тепловых нагрузок в шахте в зависимости от ее конструкции и системы охлаждения. Распределение газового потока по радиусу для вариантов конструкции нового профиля печи полезным объемом порядка 2000 м³ и температуры газа по ее высоте рассчитывалась применительно к условия Украины с привлечением экспериментальных данных, оригинальных моделей ИЧМ расчета распределении температурно-тепловых нагрузок и газового потока, опыта работы с ПУТ доменных печей среднего объема (1500±3000 м³) и ПАО «Запорожсталь», ПАО «ММК им. Ильича», ПАО «АМК» [1-8].

По результатам выполненных исследований установлено, что тепловые нагрузки в верхней части шахты имеют минимальную величину. Поэтому, при использовании толстостенной футеровки, в проекте печи полезным объемом порядка 2000 м³ нет необходимости охлаждать шахту до колошника.

Показано, что применение алюмоуглеродистого кирпича, в сравнении с ШПД, в комбинации с чугунными холодильниками на стыке с медными приводит к уменьшению градиента тепловых нагрузок в 1,5 раза и в 2 раза инверсии температурного поля в этой зоне.

Перевод системы охлаждения шахты с химически очищенной воды на СИО приводит к незначительному уменьшению тепловых нагрузок на ~6%, увеличению температуры на рабочей поверхности стенки шахты на ~40-80°C, незначительному уменьшению инверсии температурного поля на зубьях холодильных плит, стыках систем охлаждения.

В результате расчета тепловых нагрузок и температурного поля для трёх вариантов профилей – толстостенного (вариант 2, 7), тонкостенного – с тремя рядами горизонтальных холодильников в заплечиках (вариант 3,5)

и тонкостенного – без горизонтальных холодильников (вариант 4, 6) в заплечиках получено:

В результате расчета тепловых нагрузок и температурного поля для трёх вариантов профилей – толстостенного (вариант 2, 7), тонкостенного – с тремя рядами горизонтальных холодильников в заплечиках (вариант 3,5) и тонкостенного – без горизонтальных холодильников (вариант 4, 6) в заплечиках получено:

- при использовании 3-го (5-го) и 4-ого (6-ого) вариантов профиля тепловые нагрузки в районе медных холодильников больше в 2-3 раза по сравнению с первым вариантом профиля;

- при использовании 3-го (5-го) и 4-ого (6-ого) вариантов профиля инверсия температурного поля на стыке чугунных и медных холодильников в 2 раза больше, чем при использовании 2 и 7-го варианта профиля.

Обеспечение рационального температурно-теплого режима работы доменной печи позволит совершенствовать технологический режим доменной плавки для достижения требуемых технико-экономических показателей [1-8].

Расчет технологических параметров работы печи. Прогноз технологических параметров работы доменной печи полезным объемом порядка 2000 м³ в условиях работы Украины при переходе на работу с вдуванием ПУТ выполнен с использованием полного энергетического баланса.

Понятие «полный энергетический баланс» введено В. С. Степановым [9], означающим расчет и совместное рассмотрение материального, теплового и эксергетических балансов. Материальный баланс рассчитывается по системе учета В. П. Ижевского [10, 11], тепловой – по теплоэнергетической модели И. Д. Семикина [11, 12], эксергетический – является развитием трудов А. В. Бородулина и В. С. Степанова [9, 11, 13].

С использованием результатов расчета материального баланса по системе учета В.П. Ижевского и теплоэнергетической модели И.Д. Семикина рассмотрены прогнозные варианты тепловой работы печи при вдувании минимального 120 кг/т чугуна (18,5 т/ч и 20 т/ч) и максимального ~180÷160 кг/т чугуна (28 т/ч) количества ПУТ для 2-х вариантов производительности печи 3700 т/сутки и 4000 т/сутки с минимальной и максимальной долей загружаемых окатышей при изменении и при поддержании на постоянном уровне трехкомпонентной основности шихты ($((CaO+MgO)/SiO_2)$) (табл. 1-2).

При расчетах теплоэнергетического баланса состав и расход шихтовых материалов при изменении доли окатышей в шихте и расхода ПУТ принимался по данным материального баланса.

Необходимая производительность печи достигается варьированием расхода дутья и концентрации кислорода (O₂) в нем при поддержании

теоретической температуры в рациональном диапазоне порядка 2000 – 2200°С:

- при «максимальном» расходе дутья и «минимальном» содержании O_2 в нем;
- при «минимальном» расходе дутья и «максимальном» содержании O_2 в нем.

По результатам выполненных исследований определены прогнозные показатели технологического режима работы доменной печи полезным объемом порядка 2000 м³ при переходе на работу с вдуванием ПУТ с минимальной/максимальной долей окатышей в загружаемой шихте при изменении основности шихты. В частности, показано, что:

- При производительности ~3700 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 28 т/ч или ~180 кг/т чугуна, работе с минимальной долей окатышей, расходе дутья ~3700÷3800/3150÷3250 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2/25% достигается расход кокса ~383÷398 кг/т чугуна, расход условного топлива ~580÷593 кг/т чугуна при степени использования СО 43 и 41% соответственно.

- При производительности ~4000 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 28 т/ч или ~168 кг/т чугуна, работе с минимальной долей окатышей, расходе дутья ~4000÷4100/3400÷3500 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2/25% достигается расход кокса ~397÷410 кг/т чугуна, расход условного топлива ~579÷592 кг/т чугуна при степени использования СО 43 и 41% соответственно.

- При производительности ~3700 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 18,5 т/ч или ~120 кг/т чугуна, работе с минимальной долей окатышей, расходе дутья ~3650÷3750/3300÷3400 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2/25% достигается расход кокса ~440÷453 кг/т чугуна, расход условного топлива ~568÷581 кг/т чугуна при степени использования СО 43 и 41% соответственно.

- При производительности ~4000 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 18,5 т/ч или ~120 кг/т чугуна, работе с минимальной долей окатышей, расходе дутья ~3950÷4050/3600÷3700 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2/25% достигается расход кокса ~441÷455 кг/т чугуна, расход условного топлива ~570÷583 кг/т чугуна при степени использования СО 43 и 41% соответственно.

- При производительности ~3700 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 28 т/ч или ~180 кг/т чугуна, работе с максимальной долей окатышей, расходе дутья ~3650÷3100 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2÷25% достигается расход кокса ~382 кг/т чугуна, расход условного топлива ~578 кг/т чугуна при степени использования СО 43%.

- При производительности ~4000 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 28 т/ч или ~168 кг/т чугуна, работе с максимальной долей окатышей, расходе дутья ~3950÷3350 нм³/мин и содержании кислорода в нем

~21,2÷25% достигается расход кокса ~395 кг/т чугуна, расход условного топлива ~577 кг/т чугуна при степени использования СО 43%.

• При производительности ~3700 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 18,5 т/ч или ~120 кг/т чугуна, работе с максимальной долей окатышей, расходе дутья ~3600÷3250 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2÷23,5% достигается расход кокса ~438 кг/т чугуна, расход условного топлива ~566 кг/т чугуна при степени использования СО 43%.

• При производительности ~4000 т/сутки и вдувании ПУТ в количестве 20 т/ч или ~120 кг/т чугуна, работе с максимальной долей окатышей, расходе дутья ~3900÷3500 нм³/мин и содержании кислорода в нем ~21,2÷23,5% достигается расход кокса ~439 кг/т чугуна, расход условного топлива ~568 кг/т чугуна при степени использования СО 43%.

Использование полного энергетического баланса, состоящего из одновременного рассмотрения объекта исследования как совокупности материального, энергетического и эксергетического балансов, позволяет уточнить закономерности, обосновать целесообразность и дать количественную оценку, углубить анализ энергоэффективности, экологических и иных проблем металлургических производств, расширить количество путей производства металла: от агрегатов единичной мощности до рационализации энергобаланса экономики отрасли в целом.

Выводы. Разработка современного профиля, конструкции системы охлаждения и футеровки, средств АСУ ТП при реконструкции доменных печей является актуальной задачей, решение которой позволит увеличить ресурс работы печи и улучшить ее технико-экономические показатели при вдувании в горн пылеугольного топлива.

В настоящее время в Украине и России современные конструкции доменной печи для работы с ПУТ реализуются по двум направлениям:

1. Создание конструкции печи под «ключ» зарубежными фирмами, например, проекты Danieli Cogus реализованы на ДП №1 ПАО «АМК» ПАО «АМКР» и ДП №4 ОАО «Северсталь», Paul Wurth – на ДП № 6 и №7 ПАО «НЛМК».

2. Модернизация конструкции печи с изменением отдельных ее элементов или полным изменением конструкции печи силами комбината или холдинга, опираясь на свой и передовой мировой опыт, с привлечением научно-технических специалистов и организаций.

Таблица 1 – Материальный баланс доменной печи полезным объемом порядка 2000 м³ при переходе на работу с вдуванием ПУТ в количестве 28 т/ч при сохранении и увеличении степени использования газа

Показатели	ДП4	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 4	вариант 5	вариант 6	вариант 7	вариант 8
		28							
Расход ПУТ, т/ч	-	4000							
Проводимость*, л/сут.	341,5/343,1	3705							
Степень использов. СО, %	41	43							
Расход ПУТ, кг/т чугу	182	182	182	182	182	168	168	168	168
Расход кокса, кг/ т чугу.	398	398	383	384	384	410	411	397	398
Содержание О ₂ в дутье, %	20,7	21,2	21,2	25,0	25,0	21,2	25,0	21,2	25,0
Материальный баланс									
Приход:									
Железурд. материалы (сухие), кг/т чугу	1729	1729	1729	1729	1729	1729	1729	1729	1729
Брикет БМС-55, кг/т чугу	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Флюсы (сухие), кг/т чугу	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Кокс сухой, кг/т чугу	538	397	398	384	385	411	411	397	398
Дутьё сухое, кг/т чугу	1817	1777	1526	1737	1491	1791	1540	1740	1493
Влага дутья, кг/т чугу	19	19	16	18	16	18	16	18	16
Природный газ, кг/т чугу	23	0	0	0	0	0	0	0	0
ПУТ, кг/т чугу	0	182	182	182	182	168	168	168	168
Итого приход, кг/т чугу	4241	4218	3965	4164	3917	4231	3980	4166	3918
Расход:									
Чугун, кг/т чугу	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Шлак, кг/т чугу	443	446	446	446	446	446	446	446	446
Доменный газ, кг/т чугу	2705	2684	2423	2631	2375	2707	2446	2637	2380
Колошниковая пыль, кг/т чугу	49	46	46	45	45	47	47	45	45
Влага от (косвенного) восстановления, кг/т чугу	27	34	32	36	34	31	29	32	31
Итого расход, кг/т чугу	4224	4210	3947	4157	3899	4230	3968	4160	3901
Невязка, %	0,4	0,2	0,5	0,2	0,4	0,0	0,3	0,1	0,4

Таблица 2 – Прогнозные показатели тепловой работы доменной печи полезным объемом порядка 2000 м³ при переходе на работу с вдуванием ПУГ в количестве 28 т/ч при сохранении и увеличении степени использования газа

Показатели	28							
	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 4	вариант 5	вариант 6	вариант 7	вариант 8
Расход ПУГ, т/ч	28							
Агломерат/окатыши, %	62/38							
Основность шихты (CaO+MgO)/SiO ₂	1,32	1,38	1,39	1,39	1,38	1,39	1,38	1,38
Производительность* т/сутки	3705							
Степень использов. CO, %	41	41	43	43	41	41	43	43
Расход ПУГ, кг/т чугу	182	182	182	182	168	168	168	168
Расход кокса, кг/т чугу	541/538**	398	383	384	410	411	397	398
Расход дутья, мм ³ /мин	3584	3768	3215	3694	3153	4078	3479	3998
Температура дутья, °С	1061	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Содержание O ₂ в дутье, %	20,7	21,2	25,0	21,2	25,0	21,2	25,0	21,2
Расход пара, т/чуг/м ³	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Выход шлака, кг/т чугу	445	445	445	445	445	445	445	445
ηд, %	39,7	40,7	40,9	38,3	38,4	41,0	41,2	38,6
Расход условного топлива*, кг/т чугу	575/572	593	594	580	581	592	593	580
Внешне-тепловая потеря, МВт/МДж/т-чуг	19/480	19/443	19/443	19/443	19/410	19/410	19/410	19/410
Температура фурменной зоны, °С	2110	2000	2125	2000	2120	2020	2150	2015
Расход кокса на тепл. потери, кг/т чугу	36	32	32	32	32	30	30	30
Выход кол газа, кг у.т./т чугу	240	238	237	224	224	237	237	224
Эксергетические КПД:								
Термодинамическое совершенство доменного процесса, %	80,5	82,3	82,9	82,2	82,8	82,1	82,6	82,6
Технологический КПД, %	39,8	40,6	41,0	41,6	42,0	40,6	40,9	41,9
Обобщенный КПД производства чугуна, %	52,3	52,9	54,6	52,7	54,4	52,7	54,2	54,0
Экологические показатели:								
Экологоемкость, доли	0,073	0,073	0,071	0,074	0,072	0,073	0,071	0,074
Ресурсоемкость, доли	1,358	1,335	1,323	1,337	1,325	1,339	1,328	1,341
Коэффициент экологичности, доли	0,683	0,694	0,702	0,692	0,700	0,692	0,700	0,690

*числитель – расчет, знаменатель – тех отчет; ЗР – зона расплава, НСТ – нижняя ступень теплообмена, Печь – печь в целом; ** расход кокса + орех, кг/т чугуна

По нашему мнению, второе направление является более рациональным, т.к. способствует развитию теории и практики конструирования печей применительно к условиям Украины, уменьшает затраты на реконструкцию печей и позволяет выбрать оптимальное соотношение между стоимостью реконструкции и длительностью кампании доменной печи.

Важнейшей составляющей эффективной и безопасной кампании печи является оснащение ее современными автоматизированными системами мониторинга состояния профиля.

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 и др. // *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 и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 3. – с. 106-110.
4. Анализ энергоэффективности применения ПУТ в доменном производстве с использованием эксергетического метода исследования / А.Л. Чайка, В. И. Большаков, А.А. Сохацкий, А. А. Москалина, В.Ю. Шостак // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2014. – Вып. 28. – С. 32 – 46.
5. Влияние технологии применения пылеугольного топлива на показатели тепловой работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³ / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, А. А. Жеребецкий, В.Н. Диментьев // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2014. – Вып. 29. – С. 31 – 40.
6. Эксергетический анализ энергоэффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, А. А. Москалина // *«Экология и промышленность»* №2, 2014, с.87 - 94.
7. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива в доменном производстве Украины / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 2. – С. 6-11.
8. Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, К.С. Цюпа, Б.В. Корнилов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 7. – С. 22-30.
9. Степанов В. С., Степанова Т. Б. *Эффективность использования энергии* – Новосибирск: Наука СО, 1994. – 256 с.
10. Ижевский В. П. Система учета доменного баланса // *ЖРМО*. 1912. Ч.1-я. № 2. с. 180 – 214.

11. Бородулин А. В., Горбунов А. Д., Романенко В. И. Домна в энергетическом измерении / Днепродзержинск: Изд – во Днепродзержинского технического университета. – 2006. – 450 с.
12. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов / Семикин И. Д., Аверин С. И., Радченко И. И. – М.: Металлургия, 1965. – 391с.
13. Бородулин А. В., Варивода О. И., Ковтун А. Ф. Эксергетический анализ работы доменной печи на комбинированном дутье. ИЧМ, 1989, 46 с. Деп. рукопись в Черметинформации, 30.11.89, №5296 – ЧМ89.

*Статья поступила в редакцию сборника 19.04.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

О.Л.Чайка, О.А.Сохацький, Б.В.Корнілов, А.О.Москаліна, В.Ю.Шостак, Р.В.Авдєєв, О.П.Фоменко, П.В.Карнаухов

Дослідження і аналіз проектів конструкцій профілю і показників доменної плавки при переході до технології роботи з використанням пиловугільного палива в умовах України

Наведено результати аналізу проектів профілю доменної печі корисним об'ємом близько 2000 м³ з різною конструкцією системи охолодження, матеріалів та товщини футеровки при вдуванні в її горн пиловугільного палива (ПВП). Виконано розрахунки розподілу теплових навантажень і температури робочої поверхні стінки по висоті шахти при зміні товщини футеровки, висоти установки мідних і чавунних холодилиників, комбінацій охолодження шахти системою випарного охолодження (СВО) та «холодною» хімічно очищеною водою. Наведено обґрунтування конструкцій профілю з використанням повного енергетичного балансу, визначено прогнозні технологічні параметри роботи печі при переході на роботу з вдуванням ПВП в умовах України..

Ключові слова: доменна піч, профіль, пиловугільне паливо, теплові навантаження, температура, повний енергетичний баланс

A.L.Chaika, V.V.Lebed, A.A.Sokhatsky, B.V.Kornilov, A.A.Moskalina, V.Yu.Shostak, R.V.Avdeev, A.P.Fomenko, P.V.Karnauchov

Research and analysis on the projects of blast furnace profile designs and parameters of blast furnace smelts under ukrainian conditions of work with pulverized coal fuel

The research results reported in this article are in the form of the analysis made on the profiles of blast furnace useful volumes of 2000 m³. The calculations of the heat duty distributions and temperatures of the wall working surfaces are performed with respect to the changes in the wall lining thickness per the furnace shaft, the installation height of copper and cast iron coolers, combinations of the shaft cooling modes with evaporative cooling systems and 'cold' chemically purified water. The control on the furnace profile design is given and based on the overall energy balance, forecasted production parameters of the blast furnace drive are determined when the production mode is substituted by the one with pulverized coal. The study has been carried out for the specific character of the work under conditions of Ukraine.

Keywords: blast furnace, profile, pulverized coal, thermal loads, temperature, total energy balance