

УДК 669.162.267.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА В ФУРМЕННОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ВДУВАНИИ ПУТ

Ярошевский Станислав Львович, докт. техн. наук; Кузнецов Александр Михайлович^{*}, канд. техн. наук; Курбатов Юрий Леонидович, канд. техн. наук; Кочура Владимир Васильевич, канд. техн. наук; Афанасьева Зоя Константиновна

(ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,
*ЧАО «Енакиевский металлургический завод»)

Вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменной печи с целью экономии дорогостоящего кокса сопровождается ростом производительности, если выполнены мероприятия (увеличение температуры дутья и расхода кислорода, улучшение качества шихтовых материалов и др.), компенсирующие негативные последствия применения ПУТ. В то же время качественно изменяется тепловая работа доменной печи главным образом из-за появления в фурменной зоне светящегося факела, представленного горением мельчайших частиц ПУТ с образованием облака плавящихся и расплавленных частиц золы, которые становятся источником интенсивного теплового излучения [1].

Интенсификация теплового излучения имеет следующие последствия:

- увеличение тепловых потерь в фурменном поясе (через фурмы, амбразуры, и стены фурменной зоны);
- снижение температуры горновых газов, отводимых из фурменных очагов;
- повышение нагрева жидких продуктов плавки, проходящих через полости фурменных очагов.

Интенсивность теплового излучения характеризуется мощностью теплового потока, определяемой по известной из теории теплового излучения формуле Стефана – Больцмана [2,3]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) F, \text{ Вт}$$

где T_1 – температура источника излучения, К;

T_2 – температура тепловоспринимающей поверхности, К;

$\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²/К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

F – тепловоспринимающая поверхность, м²;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы, доли. ед. Эта величина зависит от степени черноты источника излучения (в данном случае – полости фурменного очага) ε_1 , от степени черноты тепловоспринимающей поверхности (например, рывная поверхность фурмы) ε_2 , геометрических характеристик (угловых коэффициентов) φ :

$$\varepsilon_{\text{пр}} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi_{i,j} \dots)$$

Значения величин ε_1 и ε_2 находятся в диапазоне 0...1 и показывают долю тепловой энергии (тепла), которая может быть излучена или поглощена. Степень черноты плотных (твердых или жидких) поверхностей может быть определена по справочным экспериментальным данным. Степень черноты полости газового объема фурменного очага, определяется наличием трехатомных газов (СО₂, Н₂О) и плотных частиц [2,3]. В технологии доменной плавки без вдувания ПУТ в фурменном очаге образуются восстановительные горновые газы (СО, Н₂ и N₂), т.е. двухатомные газы, практически не способные ни излучать, ни поглощать тепло. В теплообмене излучением участвуют сгорающие в фурменном очаге относительно крупные (~ 25 мм) куски кокса. В технологии с вдуванием ПУТ в фурменном очаге сгорают частицы пыли размером 50-100 мкм с образованием восстановительных газов (СО и Н₂) и плотных частиц золы. В результате излучательная способность газовой полости фурменного очага становится во много раз больше, чем без вдувания ПУТ.

Авторами разработана методика определения степени черноты газового объема полости фурменного очага ε_r (использованы работы [3-5] по определению параметров теплообмена излучением при сжигании ПУТ в

паровых котлах). Величина ε_r определяется как функция расхода ПУТ, размера частиц, геометрических размеров фурменного очага, а также уровня температур в очаге.

В табл. 1 приведены результаты расчетов теплообмена в фурменной зоне (ФЗ) для условий ДП-5 объемом 1513 м³ ЧАО «ЕМЗ».

Таблица 1 – Результаты исследования теплообмена в фурменной зоне ДП-5 ЧАО «ЕМЗ»

Наименование	База	Расход ПУТ		
		30	90	150
Расход ПУТ, кг/т, кг/с	0	30 0,987	90 2,974	150 5,132
Производительность печи по чугуна, т/сутки; кг/с, %	2595	2842	2855	2956
	30,0	32,89	33,05	34,22
	100,00	109,5	110	113,9
Удельная производительность, т/(м ³ · сутки)	1,71	1,87	1,88	1,95
Расход кокса и коксового орешка, кг/т кг/с	598,8	496,0	431,7	370,9
	17,99	16,32	14,27	12,69
Расход углерода кокса, дошедшего до фурм, кг/т, кг/с	341,3	282,7	246,1	211,4
	10,25	9,30	8,13	7,23
Расход дутья, м ³ /т чугуна, м ³ /с	1552	1288	1237	1120
	46,62	42,37	40,88	38,32
Температура дутья, °С	906	1100	1100	1100
Кислород дутья, %	20,0	21,0	21,5	23,5
Расход горнового газа, м ³ /т чугуна, м ³ /с	1893	1604	1586	1503
	56,87	52,76	52,41	51,43
Расход колошникового газа, м ³ /т чугуна, м ³ /с	2154	2154	2154	2154
	64,71	70,86	71,18	73,70
Выход шлака, доли	0,416	0,395	0,390	0,385
Степень черноты ФЗ, ε_r	0,023	0,181	0,449	0,669
Приведенная степень черноты системы «поверхность ФЗ-фурма»	0,534	0,366	0,188	0,095
Приведенная степень черноты системы «газовая полость-поверхность ФЗ»	0,021	0,141	0,267	0,333
Приведенная степень черноты системы «газовая полость-фурма»	0,031	0,206	0,389	0,484
Мощность тепловых потерь на фурмы в фурменном поясе, МВт	2,824	3,365	4,050	4,158
Мощность теплового потока на внутреннюю поверхность ФЗ, МВт	2,87	9,90	12,64	12,96
Суммарные тепловые потери, МВт	5,69	13,54	16,69	17,12
Тепловая мощность фурменной зоны, МВт	179,3	182,0	181,1	182,9
Теоретическая температура в фурменной зоне, °С	2098	2295	2298	2366
Балансовая температура в фурменной зоне (горновых газов), °С	2037	2079	1937	1879

Степень черноты ε_r без ПУТ практически равна нулю (0,023), но уже при расходе ПУТ 30 кг/т повышается до 0,181, а при 150 кг/т – до 0,669. Соответственно возрастает и мощность тепловых потерь в фурменном поясе, а также мощность излучения на внутреннюю поверхность фурменной зоны, которая используется на нагрев жидких продуктов плавки. Следствием увеличения излучения тепла из фурменной зоны является существенное снижение балансовой температуры, а значит и температуры горновых газов.

Вдувание ПУТ сопровождается также увеличением тепловых потерь, т.к. интенсифицируется тепловое, механическое и физико-химическое воздействие шихты (с увеличенной рудной нагрузки), на футеровку; это также приводит к ускоренному износу футеровки.

В табл. 2 и 3 представлены тепловые потери с охлаждающей водой по высоте печи в зависимости от расхода ПУТ и износа футеровки. Основные тепловые потери сосредоточены в фурменном поясе, что является следствием интенсивного теплового излучения.

Таблица 2 – Тепловые потери по высоте ДП-5 ЕМЗ при 100% футеровке

Расход ПУТ, кг/т	0	30	90	150
Мощность тепловых потерь по участкам печи, кВт / %				
Неохлаждаемая часть шахты	36 0,82	37 0,73	40 0,71	42 0,73
Охлаждаемая часть шахты	890 20,34	911 17,94	1003 17,83	1035 17,88
Распар	190 4,34	195 3,84	214 3,80	221 3,81
Запечки	800 18,28	820 16,15	902 16,03	930 16,07
Фурменный пояс (фурмы + амбразуры + стены)	2460 56,22	3114 61,34	3467 61,63	3560 61,51
Всего, кВт / %	4376 100	5077 100	5626 100	5788 100
Всего, МВт	4,376	5,077	5,626	5,788
Тепловая мощность, МВт	179,3	182,0	181,1	182,9
Потери, %	2,4	2,8	3,1	3,2

Таблица 3 – Тепловые потери по высоте ДП-5 ЕМЗ при износе 50% футеровки

Расход ПУТ, кг/т	0	30	90	150
Мощность тепловых потерь по участкам печи, кВт / %				
Неохлаждаемая часть шахты	40 0,65	44 0,61	44 0,58	46 0,59
Охлаждаемая часть шахты	1280 20,72	1402 19,44	1408 18,65	1458 18,71
Распар	300 4,86	328 4,55	330 4,37	642 4,39
Заплечики	1220 19,74	1336 18,54	1342 17,77	1390 17,84
Фурменный пояс (фурмы + амбразуры + стены)	3338 54,03	4099 56,86	4427 58,63	4556 58,47
Всего, кВт / %	6178 100	7209 100	7551 100	7792 100
Всего, МВт	6,178	7,209	7,551	7,792
Тепловая мощность, МВт	179,3	182,0	181,1	182,9
Потери, %	3,4	4,0	4,2	4,3

Приведенные расчеты показывают, что замена части кокса пылеугольным топливом сопровождается повышением степени черноты фурменной зоны за счет повышения удельной поверхности сжигаемых угольных частиц кокса и ПУТ, интенсивности теплообмена, повышения колориметрической (теоретической) температуры фурменных зон и продуктов плавки, мощности тепловых потоков и тепловых потерь в фурменной зоне.

Все указанные изменения относятся, прежде всего, к фурменной зоне (до 60 % потерь тепла). В горизонтах выше фурменной зоны (распаре, шахте) температуры газового потока незначительно снижаются, но интенсивность теплообмена растет пропорционально повышению интенсивности плавки, определяемой в основном вдуванием ПУТ и применением интенсифицирующих мероприятий.

Указанные изменения технологии контролируются и регулируются технологами в достаточно широком диапазоне за счет интенсификации охлаждения воздушных фурм и других элементов, а также системой загрузки шихты.

Приведенные данные не дают оснований утверждать наличие прямой функциональной зависимости влияния ПУТ на стойкость охлаждающих приборов шахты доменной печи.

Можно предположить, что эта зависимость выражается через технологию: повышение рудных нагрузок на кокс, количества мелочи кокса, образующейся в шахте, интенсивность плавки, порозность и газопроницаемость шихты и др.

Известно, что применение ПУТ в зарубежной практике в 1983-2015 гг. позволило при расходе ПУТ 150-250 кг/т чугуна обеспечить снижение расхода кокса на 30-50 %, значительный прирост производительности, что существенно превышает лучшие показатели, достигнутые на Украине. За рубежом приняты меры по интенсификации охлаждения печей: воздушные фурмы с интенсивным водяным охлаждением, медные холодильники шахты и др. [6,7].

В Украине, однако, отмечены случаи массового горения холодильников шахты печи, что значительно снижает эффективность технологии [8-10].

Рассмотрим качественное влияние ПУТ на технологию.

Фурменная зона. В фурменной зоне при вдувании 150 кг/т чугуна ПУТ значительно повышается интенсивность теплообмена: мощность тепловых потерь возрастает от 2,2 МВт в базовом варианте без вдувания ПУТ до 3,7 МВт при расходе ПУТ 150 кг/т чугуна, значительно возрастают тепловые потоки на внутреннюю поверхность фурменной зоны - от 2,1 МВт в базовом варианте до 18,1 МВт при расходе ПУТ=150 кг/т чугуна, растет калориметрическая (теоретическая) температура в фурменной зоне (от 2098°C без вдувания ПУТ до 2333°C), повышается температура продуктов плавки (на 312°C при расходе ПУТ 120 кг/т чугуна).

Перечисленные показатели не вызвали существенного изменения работы фурменной зоны и стойкости оборудования. Поскольку по мере

повышения температуры возрастает теплоотдача и интенсивность теплообмена от фурменной зоны к системе охлаждения доменной печи.

Технологи имеют возможность в определенных пределах управлять интенсивностью охлаждения фурм и холодильников. Значительная часть избыточного тепла уходит в шахту печи, компенсируя снижение температуры, вызванное ПУТ.

Шахта печи. Применение ПУТ вызывает существенные качественные изменения в составе загружаемой шихты: снижение на 20-50 % расхода кокса и соответственное повышение рудных нагрузок до 4-6 т/т кокса. Соответственно снижается порозность и газопроницаемость шихты, вследствие чего повышаются до критического уровня и выше скорости газов, что определяет нарушение равномерного и ровного схода шихты, устойчивость газодинамических, тепловых и температурных режимов. Указанные изменения, несомненно, усугубляются усилением интенсификации разрушения кокса, сопровождающейся повышением выхода мелочи (0-10 мм).

Несомненно, данные изменения могут существенно повлиять на стойкость чугунных холодильников за счет усиления абразивного износа, колебаний температуры, термического и химического воздействия на поверхность холодильника, науглероживания и др.

Выходом из данной ситуации могут быть либо снижение расхода ПУТ до полного его закрытия, либо повышение показателей качества кокса и железорудной шихты настолько, чтобы полностью компенсировать вызываемое применением ПУТ влияние на качество шихтовых материалов и технологию.

Вариант, когда указанные нарушения и изменения игнорируются, как показывает практика, приводит к значительному снижению стойкости чугунных холодильников, снижению расхода и эффективности использования ПУТ.

В процессе формирования доменной технологии доля кускового топлива в шихте снизилась от 80-90 до 10-15 %, объемы печей и их производительность повысились в десятки раз, температуры в горне печи повысились до 2200-2400 °С и т.д. Данные изменения обеспечены внедрением многочисленных мероприятий, обеспечивающих надежность и эффективность работы технологического оборудования доменных печей, среди них:

- использование для охлаждения печи (шахты) медных холодильников;
- усиленное охлаждение шахты печи, как за счет интенсивности охлаждения, так и за счет повышения высоты размещения холодильников;
- опыт внедрения воздушных фурм более надежной конструкции с футеровкой рабочей поверхности внутри фурмы, так и с наружной поверхности. Стойкость таких фурм повышена до 1,0 года.
- повышение стойкости горна за счет введения с шихтой или через воздушные фурмы титансодержащих материалов;
- усиление контроля технологии состояния оборудования печи за счет внедрения качественно новых приборов и автоматических систем:
- приборы для определения уровня продуктов плавки в горне;
- приборы для определения толщины кладки и гарнисажа по высоте печи;
- приборы и методики определения полноты сгорания ПУТ в фурменных зонах;
- приборы определения прогара воздушных фурм и холодильников;
- контроль температуры чугуна по ходу выпуска его из доменной печи;
- контроль уровня и температуры засыпи шихты на колошнике.

По данным профессора И.Ф. Курунова на современных доменных печах контроль за технологией и состоянием оборудования печи выполняет более 1,5 тыс. приборов и систем автоматики [6].

Указанные и многие другие средства контроля обеспечивают при вдувании в горн ПУТ высокую надежность и стойкость работы современных доменных печей. По данным на 2010 г. длительность рабочей компании

горнов и шахт современных доменных печей в Японии составила 14 – 22 года [11].

Совершенно естественно предположить, что такое радикальное изменение технологии как снижение доли кокса в шихте на 30-50%, определяемое применением ПУТ, определило изменение конструкции оборудования, в первую очередь замены чугунных холодильников на медные. Данное решение обеспечило повышение надежности работы холодильников и охлаждения печи, однако ни в коей мере не устранило проблем, связанных с интенсификацией разрушения кокса и ухудшением газопроницаемости шихты.

Известно, что целый ряд определяющих показателей доменной технологии (интенсивность плавки по шихте и газу, выход шлака, теоретическая температура горения, прочность кокса (CSR), содержание мелочи в шихте и др.) находится в функциональной зависимости от уровня расхода скипового кокса (рис. 1).

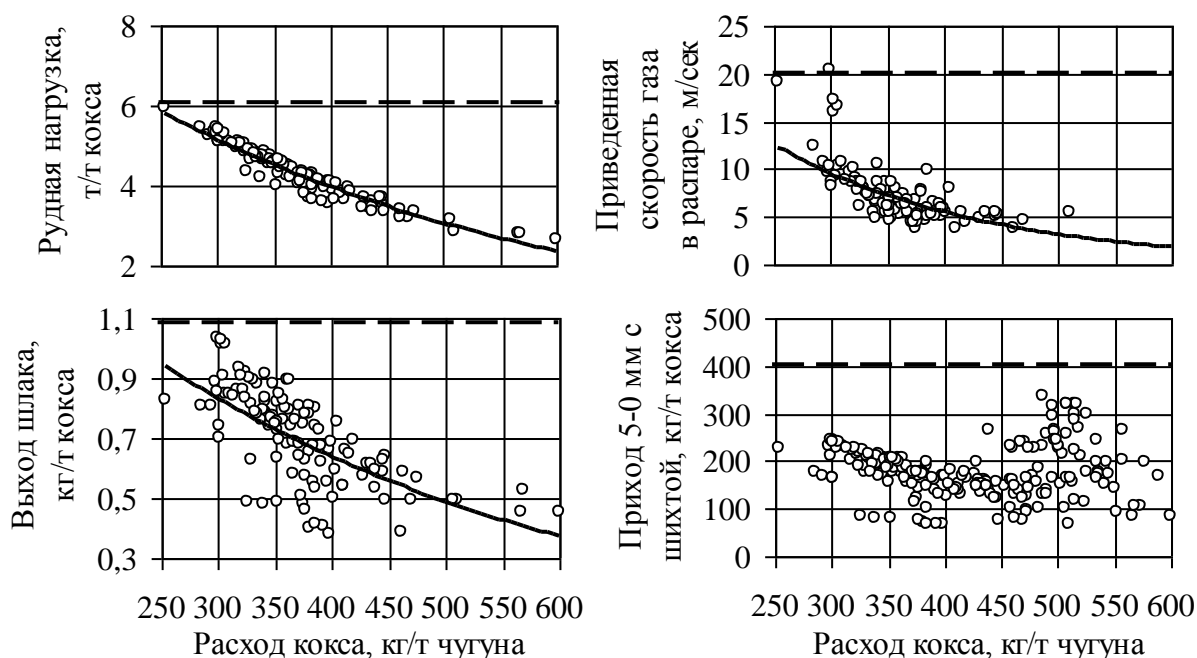


Рисунок 1 - Зависимости определяющих показателей от удельного расхода кокса (прерывистая линия - предельное значение показателя)

Превышение предельных значений определяющих показателей исключает возможность обеспечения нормальной работы доменной печи [7].

Установлена четкая зависимость между показателем прочности кокса (CSR) и расходом ПУТ (рис. 2) [12].

Зарубежная практика имеет значительно более высокий уровень основных параметров технологии по сравнению с украинской практикой: температура дутья 1100-1300 °С; содержание кислорода в дутье 25-37%; выход шлака 150-250 кг/т чугуна; давление на колошнике до 3,5 ати, расход сырого известняка в шихте 0-20 кг/т чугуна; качество кокса (CSR) 65-75%, количество мелочи в железорудной шихте (0-5 мм) до 3-5% и др.



Рисунок 2 - Зависимость удельного расхода ПУТ от горячей прочности кокса: точки - экспериментальные значения по данным работы [12]

Соответственно, в зарубежной практике имеется возможность управления технологией за счет указанных параметров и таким образом не допускать критических (предельных) значений определяющих показателей при значительно больших расходах ПУТ по сравнению с украинской практикой.

Доменные печи Украины при вдувании ПУТ весьма ограничены в возможности компенсации нарушений технологии, определяемых вдуванием

ПУТ, что приводит к превышению предельных значений определяющих показателей, ограничению расхода ПУТ и другим неблагоприятным изменениям, включая выход из строя холодильников.

Таким образом, для освоения высокоэффективных технологических режимов с применением ПУТ и заменой им 30-50% кокса необходимо иметь значительный резерв для компенсации нарушений технологии, определяемых вдуванием ПУТ: содержание кислорода в дутье, температура дутья, снижение выхода шлака и т.д. Следовательно, замена чугунных холодильников на медные является важным и необходимым элементом ПУТ-технологии, однако дальнейшее повышение расхода ПУТ и эффективности его использования можно обеспечить только за счет корректной и полной компенсации нарушений технологического процесса, за счет внедрения соответствующих компенсирующих мероприятий.

Великолепным примером рациональной организации ПУТ-технологии является опыт работы доменных печей фирмы Corus Ijmuiden (Нидерланды). За период с 1990 г. ПУТ - комплексы данной фирмы трижды модернизировались, прежде всего – с целью повышения производительности по ПУТ [6]. Потенциал ПУТ-технологии повышали более чем 20 лет за счет повышения температуры дутья (1236 °С), содержание в нем кислорода (33 %), улучшения качества железорудной шихты и снижение выхода шлака (219 кг/т чугуна), улучшения качества кокса (горячая прочность CSR более 70%). Указанные и другие мероприятия позволили повысить расход ПУТ на 1 т чугуна до 230-250 кг, вдвое снизить расход кокса 274-290 кг, повысить производительность печей до 2,75-3,17 т/(м³ сутки).

Для подтверждения изложенных соображений выполнен расчет перспективной ПУТ-технологии для условий ДП-3 объемом 1719 м³ ЧАО «ЕМЗ». В качестве компенсирующих мероприятий приняты: температура дутья 1150 °С содержание кислорода в дутье 25,2 %; расход коксового орешка 60-80 кг/т чугуна; снижение размера скипового кокса 40-70 мм и другое (табл. 4).

Таблица 4 - Расчет эффективности вдувания ПУТ для условий ЧАО "ЕМЗ" (база – ДП-3, период 5 октября - 15 ноября 2016г.)

Наименование	База	Повышение температуры дутья до 1150 °С	Изменение железорудной части	Снижение основности шлака	Вдувание ПУТ, кг/т чугуна		
					160	180	200
Варианты	1	2	3	5	6	7	8
<i>Производительность, %</i>	<i>100,0</i>	<i>101,7</i>	<i>101,7</i>	<i>102,7</i>	<i>101,8</i>	<i>100,8</i>	<i>99,8</i>
<i>Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна</i>	<i>398,0</i>	<i>386,9</i>	<i>386,8</i>	<i>380,4</i>	<i>335,9</i>	<i>298,7</i>	<i>281,6</i>
<i>Коксовый орешек, кг/т чугуна</i>	<i>34,2</i>	<i>34,2</i>	<i>34,2</i>	<i>34,2</i>	<i>60,0</i>	<i>80,0</i>	<i>80,0</i>
<i>Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна</i>	<i>432,2</i>	<i>421,1</i>	<i>421</i>	<i>414,6</i>	<i>395,9</i>	<i>378,7</i>	<i>361,6</i>
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	814	814	654	654	654	654	654
Агломерат ЮГОК, кг/т чугуна	324	324	450	450	450	450	450
Окатыши СевГОК, кг/т чугуна	521	521	550	550	550	550	550
Известняк обычный, кг/т чугуна	24	26	29	14	13	12	12
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1261	1225	1224	1207	1211	1216	1221
Температура дутья, °С	1100	1150	1150	1150	1150	1150	1150
ПУТ, кг/т чугуна	138,6	138,6	138,6	138,6	160,0	180,0	200,0
Содержание кислорода в дутье, %	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1810	1763	1762	1741	1750	1759	1768
Температура колошникового газа, С	288	281	281	281	287	293	299
Степень использования СО, доли	0,434	0,441	0,443	0,447	0,442	0,438	0,434
Степень прямого восстановления, доли	0,277	0,279	0,279	0,279	0,269	0,259	0,250
Выход горновых газов, м ³ /т чугуна	1716	1654	1653	1631	1651	1671	1691
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	761	736	735	726	743	759	775

Продолжение табл. 4

Выход шлака, кг/т чугуна	400	398	398	389	388	387	386
Приход серы с шихтой, кг/т чугуна	5,3	5,2	5,2	5,1	5,0	4,9	4,8
Основность CaO/SiO_2	1,05	1,05	1,05	1,00	1,00	1,00	1,00
Основность $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$	1,18	1,18	1,17	1,12	1,12	1,12	1,12
Химсостав чугуна, % [S]	0,082	0,081	0,080	0,098	0,097	0,095	0,093
Теоретическая температура горения, С	2226	2258	2258	2254	2217	2183	2150
Расход условного топлива, кг/т чугуна	577,05	565,94	565,75	559,36	562,63	565,92	569,41
Изменение себестоимости чугуна с выпуска, грн/т	0,00	-23,00	33,44	12,26	1,00	-8,95	-20,26
Определяющие показатели:							
Рудная нагрузка, т/т кокса	4,03	4,13	4,12	4,19	4,38	4,58	4,80
Выход шлака, кг/т кокса	925	946	944	938	979	1021	1066
Выход горнового газа, м ³ /т кокса	3971	4186	4186	4199	4169	4412	4676
Приход мелочи (0-5 мм) с шихтой, кг/т кокса	193	198	196	199	209	218	228
Скорость газа в распаре, м/с	12,93	13,47	13,45	13,56	15,30	17,54	20,84

Из таблицы следует, что наиболее эффективным является вариант с вдуванием 180 кг ПУТ, обеспечивающий снижение расхода скипового кокса до 298 кг/т чугуна при сохранении высокой производительности печи 3570 т/сут. При этом значения определяющих показателей (табл. 4) ниже предельно-допустимых, что подтверждает возможность реализации режима и решение проблем со стойкостью шахтных холодильников.

Повышение расхода ПУТ до 200 кг/т чугуна требует дальнейшего существенного совершенствования технологии и оборудования: по выходу шлака, скорости газа в распаре, недостаточной теоретической температуре горения и др.

Для повышения эффективности и надежности ПУТ-технологии необходимы: реализация мероприятий по повышению качества кокса в первую очередь по показателю CSR не менее 65%, дальнейшее улучшение фракционного состава скипового кокса и коксового орешка, исследование и совершенствование технологии с учетом изменения степени черноты фурменной зоны при вдувании ПУТ, систематический контроль полноты сгорания ПУТ и др.

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель теплообмена в фурменной зоне и методика расчета степени черноты запыленного потока, плотности и мощности тепловых потоков при разных расходах ПУТ. При вдувании ПУТ основным видом передачи тепла становится теплообмен излучением вследствие того, что в газовом объеме появляются мельчайшие частицы горящего угля, а также плавящиеся и расплавленные частички золы.

Расчетные исследования показали, что степень черноты фурменной зоны без вдувания ПУТ составляет 0,023, а при вдувании от 30 до 150 кг/т чугуна ПУТ увеличивается от 0,181 до 0,669. Соответственно возрастают плотности и мощности тепловых потоков.

Так, в фурменной зоне при вдувании 150 кг/т чугуна ПУТ значительно повышается интенсивность теплообмена: мощность тепловых потерь возрастает от 2,2 МВт в базовом варианте без вдувания ПУТ до 3,7 МВт, значительно возрастают тепловые потоки на внутреннюю поверхность фурменной зоны - от 2,1 до 18,1 МВт, растет калориметрическая (теоретическая) температура (от 2098 до 2333 °С), повышается температура продуктов плавки (на 312 °С при расходе ПУТ 120 кг/т чугуна).

Однако все указанные изменения относятся, прежде всего, к фурменной зоне и контролируются и регулируются технологами в достаточно широком диапазоне за счет интенсификации охлаждения воздушных фурм и других элементов, а также системой загрузки шихты.

Перечисленные показатели не вызвали существенного изменения работы фурменной зоны и стойкости оборудования.

В горизонтах выше фурменной зоны (распаре, шахте) температуры газового потока незначительно снижаются, но интенсивность теплообмена растет пропорционально повышению интенсивности плавки, определяемой в основном вдуванием ПУТ и применением интенсифицирующих мероприятий.

Приведенные данные не дают оснований утверждать наличие прямой функциональной зависимости влияния ПУТ на стойкость охлаждающих приборов шахты доменной печи.

В Украине, однако, отмечены случаи массового горения холодильников шахты печи, что значительно снижает эффективность технологии.

2. Применение ПУТ вызывает существенные качественные изменения в составе загружаемой шихты: снижение на 20-50 % расхода кокса и соответственное повышение рудных нагрузок до 4-6 т/т кокса. Соответственно снижается порозность и газопроницаемость шихты, вследствие чего повышаются до критического уровня и выше скорости газов, что определяет нарушение равномерного и ровного схода шихты, устойчивость газодинамических, тепловых и температурных режимов. Указанные изменения усугубляются усилением интенсификации разрушения кокса, сопровождающейся повышением выхода мелочи (10-0 мм).

Несомненно, данные изменения могут существенно повлиять на стойкость чугунных холодильников за счет усиления абразивного износа, колебаний температуры, термического и химического воздействия на поверхность холодильников, науглероживания и др.

Выходом из данной ситуации могут быть либо снижение расхода ПУТ до полного его закрытия, либо повышение показателей качества кокса и железорудной шихты настолько, чтобы полностью компенсировать вызываемое применением ПУТ изменение.

3. Известно, что целый ряд показателей доменной технологии (интенсивность плавки по шихте и газу, выход шлака, теоретическая температура горения, показатели качества кокса, содержание мелочи в шихте и др.) находится в функциональной зависимости от уровня расхода скипового кокса.

Превышение определенного (предельного) уровня данных параметров исключает возможность обеспечения нормальной работы доменной печи. Данные показатели называются определяющими.

Примером рациональной организации ПУТ-технологии является опыт работы доменных печей фирмы Corus Ijmuiden (Нидерланды), где потенциал ПУТ-технологии совершенствовались более 20 лет за счет повышения температуры дутья (1236 °С), содержание в нем кислорода (33 %), улучшения качества железорудной шихты и снижение выхода шлака (219 кг/т чугуна), улучшения качества кокса (горячая прочность CSR более 70%). Указанные и другие мероприятия позволили повысить расход ПУТ на 1 т чугуна до 230-250 кг, вдвое снизить расход кокса 274-290 кг, повысить производительность печей до 2,75-3,17 т/(м³ сутки).

Соответственно, в зарубежной практике имеется возможность управления технологией за счет указанных параметров и таким образом не допускать критических (предельных) значений определяющих показателей при значительно больших расходах ПУТ по сравнению с украинской практикой.

Замена чугунных холодильников на медные является важным и необходимым элементом ПУТ-технологии. Однако дальнейшее повышение расхода ПУТ и эффективности его использования можно обеспечить только за счет корректной и полной компенсации нарушений технологического процесса, за счет внедрения соответствующих компенсирующих мероприятий.

4. Выполнен расчет перспективной ПУТ-технологии для ДП-3 ЧАО «ЕМЗ». В качестве компенсирующих мероприятий приняты: температура дутья 1150 °С, содержание кислорода в дутье 25,2 %; расход коксового орешка 80 кг/т; снижение размера скипового кокса 40-70 мм и другое.

На перспективу рекомендуется технологический режим с вдуванием на 1 т чугуна 180 кг ПУТ, обеспечивающий снижение расхода скипового кокса

до 298 кг/т чугуна при сохранении высокой производительности печи 3570 т/сут.

При этом значения определяющих показателей ниже предельно-допустимых, что подтверждает возможность реализации режима и решение проблем со стойкостью шахтных холодильников.

5. Для повышения эффективности и надежности ПУТ-технологии необходимы: реализация мероприятий по повышению качества кокса в первую очередь по показателю CSR не менее 65%, дальнейшее улучшение фракционного состава скипового кокса и коксового орешка, исследование и совершенствование технологии с учетом изменения степени черноты фурменной зоны при вдувании ПУТ, систематический контроль полноты сгорания ПУТ и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
2. Курбатов Ю.Л., Новикова О.В., Василенко Ю.Є. Теплотехніка металургійного виробництва. – Донецьк: Видавництво «Ноулідж», 2013. – 227 с.
3. Кутателадзе С.С., Боршанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 232 с.
4. Тепловой расчет промышленных парогенераторов / Частухин В.И., Заречанский Е.Л., Константинов С.М. и др. / Под ред. В.И. Частухина. – Киев: «Вища школа», 1980. – 184 с.
5. Тепловой расчет промышленных парогенераторов / Частухин В.И., Заречанский Е.Л., Константинов С.М. и др. / Под ред. В.И. Частухина. – Киев: «Вища школа», 1980. – 184 с.
6. Савчук Н.А. Доменное производство на рубеже XXI века / Н.А. Савчук, И.Ф. Курунов // Новости черной металлургии за рубежом. – 2000. – Часть II. – Приложение 5. – М.: ОАО «Черметинформация». – 42 с.
7. Основные принципы расчета и организации технологии доменной плавки при замене дополнительными топливами 30–60 % кокса (отечественный и зарубежный опыт) / С.Л. Ярошевский, З.К. Афанасьева, А.В. Кузин // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Междунар. Науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 138-148.
8. Теория и практика производства угуна: Сборник трудов международной научно-технической конференции. – Кривой Рог, КГТМК «Криворожсталь», 2004. – 621с.
9. Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – 397с.
10. Доменное производство XXI век. Труды международного конгресса доменщиков. - М.: Изд. дом «Кодекс», 2010.- 535с.

11. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России. Труды Международного конгресса доменщиков «Доменное производство – XXI век». – М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. – С. 6-18.

12. Золотухин Ю.А., Андрейчиков Н.С., Куколев Я.Б. Требования к качеству кокса для доменных печей, работающих с различным удельным расходом пылеугольного топлива // Кокс и химия.-2009.- № 3.- С. 25-31.