

И.Г.Товаровский, В.И.Большаков, А.Е.Меркулов

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
И РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С МАКСИМАЛЬНЫМ
ЗАМЕЩЕНИЕМ КОКСА**

На основе выполненных аналитических исследований показателей и процессов доменной плавки рассмотрены возможности максимального сокращения расхода кокса за счет его замещения пылеугольным топливом и коксовым газом. Рациональные параметры режимов и конечные результаты плавки с максимально-возможным замещением кокса определены для условий двух различных доменных печей. Для расчетов использована разработанная в Институте многозонная математическая модель, которая позволяет выявить внутренние связи процессов в объеме доменной печи. Получены новые научные результаты и выводы для практического использования.

математическая модель, распределение температур, кокс, пылеугольное топливо, режим плавки, параметры.

Постановка задачи. Выполненные с помощью разработанной в Институте многозонной математической модели аналитические исследования [1–8] позволили оценить ожидаемые показатели плавки при разных технологических режимах, а также выявить и уточнить некоторые закономерности хода процессов, которые могут быть использованы в ходе совершенствования технологии доменной плавки. Некоторые из установленных закономерностей качественно подтверждены ранее проведенными экспериментальными исследованиями ИЧМ и ДонНИИЧермет [9–11], а также японских исследователей [12]:

- минимальное развитие процесса прямого восстановления на периферии, наиболее высокое – в зонах с максимальной рудной нагрузкой;
- наличие радиальных кольцевых зон (РКЗ), в которых имеет место вырождение двухступенчатой схемы теплообмена по высоте;
- существенное влияние тепловых потерь через стенки печи на характер теплообмена и расход кокса при всех режимах, а также их зависимость от распределения рудных нагрузок по радиусу колошника;
- перетоки газа в радиальном направлении на разных горизонтах, обусловленные изменением сопротивления слоев шихты и параметров газового потока в ходе фильтрации через столб;
- прямые и обратные связи параметров зоны размягчения и плавления (ЗРП) с распределением рудных нагрузок на колошнике, характером формируемого температурного поля печи и интенсивностью отбора теплоты у стен на разных горизонтах.

Выявленные закономерности требуют дальнейшего изучения и уточнения.

В ходе анализа процессов, а также выявления и уточнения влияния дутьевых параметров плавки (в сочетании с шихтовыми), расходов природного, коксового газов (ПГ, КГ) и пылеугольного топлива (ПУТ) на расход кокса и другие показатели при различном распределении рудных нагрузок на колошнике (фактическом – ФРН и равномерном в промежуточных РКЗ–2–9 – РРН) [1–8] установлено:

1. С увеличением расхода ПГ сокращается теплотребление на прямое восстановление и уменьшается интенсивность теплопередачи в нижней зоне при увеличении ее в верхней, вследствие чего изотермы газа и шихты перемещаются вверх, увеличивая потери через колошник, а зона размягчения и плавления располагается выше базового положения и утолщается. Под действием указанных факторов при расходах ПГ > 100 м³/т дифференциальный эквивалент замещения кокса сокращается от исходной величины 0,9–1,0 кг/м³ в 1,5–4 раза за счет резкого увеличения температуры колошникового газа в зоне сокращения степени прямого восстановления до $r_d < 20\%$. То же характерно для вдувания КГ при соотношении расходов КГ $\approx 2 \cdot$ ПГ.

2. Температурное поле печи при увеличении расхода ПУТ изменяется под влиянием тех же тенденций, что и при вдувании ПГ и КГ, однако количественно не столь значительно и неоднозначно для разных условий. Толщина ЗРП сокращается, а потери теплоты уменьшаются. Основным фактором экономии кокса при вдувании ПУТ – замена теплоты горения кокса теплотой горения ПУТ определяет эквивалент замещения кокса более, чем на 80%, с сохранением его значения 0,9–1,0 кг/кг при расходах ПУТ до 250 кг/т, что подтверждается практикой [13,14].

3. При увеличении температуры дутья (T_d) в случае ФРН в нижних высокотемпературных зонах (ВТЗ) через более проницаемые РКЗ с низкой рудной нагрузкой проходит больше газа (по массе), чем через менее проницаемые РКЗ с высокой рудной нагрузкой. Меньшее охлаждение газа в первых стимулирует переток газа из них во вторые через коксовые слои и способствует поддержанию интенсивности теплопередачи на уровне, обеспечивающем уменьшение температуры колошникового газа (t_k) при увеличении $T_d \sim$ до 1000⁰С, при этом ЗРП перемещается вниз в высоконагруженных РКЗ и вверх – в низконагруженных с некоторым сокращением толщины. Замедление уменьшения t_k с последующим небольшим ее увеличением является одним из факторов сокращения экономии кокса (Δk) и прироста производительности при увеличении T_d выше 1000⁰С, причем область минимальных значений t_k для разных вариантов соответствует диапазону значений теоретической температуры горения $\sim 2000\text{--}2100^0\text{С}$. В пределах каждого варианта условий с увеличением T_d величины Δk плавно сокращаются в 2,5–3,5 раза; наибольшие значения Δk относятся к варианту атмосферного дутья с ПГ (0,7÷0,2, ср. 0,40 %/10⁰), а наименьшие – к вариантам без ПГ (0,4÷0,13, ср. 0,24 %/10⁰).

4. С увеличением содержания кислорода в дутье ($\%O_2$) в нижней части печи образуются дополнительные высокотемпературные изотермы газа, а большая часть изотерм, а также разность температур газа и шихты перемещаются вверх. Лишь низкотемпературные изотермы шихты у периферии при ФРН и все периферийные и центральные изотермы шихты и газа при РРН смещаются вниз, расширяя низкотемпературную область в этих зонах. Существенное расширение низкотемпературной области в шахте наблюдается также при $T_d=200^{\circ}C$. ЗРП смещается вверх в малоагруженных РКЗ и вниз в высокоагруженных при некотором увеличении ее толщины, причем эта тенденция ослабевает по мере увеличения T_d и расхода ПГ; при $ПГ \geq 100$ м³/т она становится малозначительной, а при РРН – незначительной.

Под влиянием указанных процессов t_k в большинстве режимов с повышением $\%O_2$ увеличивается или не изменяется и несколько уменьшается лишь при низких температурах дутья. Поскольку величина r_d также существенно не уменьшается при росте концентрации восстановителей и сокращении времени пребывания шихты в печи, а удельные потери теплоты изменяются незначительно, преобладающим фактором теплового баланса оказывается сокращение прихода теплоты с дутьем при выводе части азота. В результате, в отличие от балансовых расчетов, где предполагается сокращение r_d и уменьшение t_k , прирост производительности при увеличении $\%O_2$ оказался меньше ($0,9 \div 2,7$ против $1,0 \div 3,0\%/%$), а перерасход кокса больше ($0,5 \div 1,45$ против $0,1 \div 0,5\%/%$).

5. Величина сокращения расхода кокса при вдувании ПГ и КГ оказалась больше в случае РРН (вместо ФРН) за счет увеличения эквивалента замены кокса в области расходов $ПГ > 100$, $КГ > 200$ м³/т чугуна. В случае ПУТ влияние РРН на эквивалент замены кокса незначительно, а при увеличении T_d величины экономии кокса и прироста производительности на 10–30% (отн.) меньше, чем при ФРН, вследствие большего приближения к предельным термодимическим условиям плавки. При увеличении $\%O_2$ расход кокса при РРН возрастает больше, чем при ФРН.

Анализ результатов. Полученные результаты положены в основу формирования вариантов комплексного использования параметров дутья и дутьевых топливных добавок. Для условий двух доменных печей №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (далее ОАО «АМКР») полезным объемом 5000 м³ и №5 ОАО «Северсталь» полезным объемом 5500 м³ в характерные периоды их работы, принятые в качестве базовых, рассчитаны варианты увеличения освоения на практике [13, 14] расхода ПУТ до 250 кг/т чугуна при концентрации кислорода в дутье 25%, необходимой для повышения полноты газификации угля у фурм, максимально-возможном на данном этапе нагреве дутья до $1300^{\circ}C$ и расходе КГ 100 м³/т чугуна. Для ДП №9 ОАО «АМКР» рассчитан дополнительный вариант с увеличением содержания железа в шихте до 60%. Все расчеты выполнены при ФРН и РРН. Кроме основных, выполнены расчеты промежуточных вари-

антов с расходом ПУТ 250 кг/т чугуна при фактических значениях T_d , $\%O_2$ и других параметров плавки.

В расчетах предполагается, что содержание золы и серы в ПУТ не превышает соответствующих величин в замещаемом коксе, а физико-механические свойства кокса (показатели холодной и горячей послереакционной прочности) отвечают требованиям, сформированным на основе опыта лучших предприятий и обобщенным в работе [15]. Предполагается также, что требованиям минимизации расхода кокса отвечают и металлургические свойства железорудных материалов, что позволяет равномерно их распределять в промежуточной кольцевой зоне колошника (РКЗ–2–9) с добавкой в смесь коксового «ореха» или специально подготовленного антрацита для повышения газопроницаемости слоев железорудных материалов при низкой доле кокса в столбе шихты [1, 16].

Специальное внимание уделено выбору значений относительной рудной нагрузки (РН относительно средней) в РКЗ–1 (ось) и РКЗ–10 (периферия) при формировании РРН в РКЗ–2–9 [1, с.363 – 373]. Показано, что:

- загрузка шихты с распределением РН, близким к РРН в промежуточной зоне (РКЗ–2–9), эффективна только при высоких физико-механических характеристиках материалов и возможности образования осевой и периферийной отдушин с непрерывным управлением их параметрами;

- параметры осевой отдушины формируются путем сокращения РН в осевой и приосевой зонах с подачей к оси кокса повышенного качества;

- периферийная отдушина кольцевой пристенный канал повышенной газопроницаемости образуется за счет увеличенной порозности движущихся материалов вследствие естественного градиента скорости слоев у стен и целенаправленно формируется путем управления рудной нагрузкой и соотношением загружаемых материалов разной газопроницаемости в этой области.

Проведенные расчетно-аналитические исследования показали, что по мере возрастания средней рудной нагрузки требуется, наряду с формированием РРН в РКЗ–2–9 или близкого к нему распределения, найти значения РН у оси (РКЗ–1) и периферии (РКЗ–10), отвечающие свойствам загружаемой шихты и особенностям охлаждения стен. При подборе величины РН в РКЗ–10 учитываются повышенная порозность шихты вследствие естественного градиента скорости слоев у стен, а также интенсивность охлаждения стен, связанная с состоянием футеровки и системы охлаждения. Параметры, зависящие от указанных факторов и используемые при выборе РН у периферии, определяются в ходе адаптации модели к реальному процессу. В частности, для двух рассматриваемых доменных печей при переходе к $RH \geq 6$ т/т установлена целесообразность поддержания РН в РКЗ–10 ниже, чем в среднем в промежуточных РКЗ–2–9. В противном случае наблюдается тормозящее влияние этой РКЗ на процессы в печи и дальнейшее сокращение расхода кокса. На ДП–9 ОАО «АМКР» РН в

РКЗ–10 составляет 1,05 относительно средней при значении в РКЗ–2–9 до 1,1, а в вариантах с абсолютной $RH \geq 7$ т/т ее величина понижается до 1,0. На ДП–5 ОАО «Северсталь» рациональная величина RH в РКЗ–10 еще ниже – 0,9 относительно средней при значении в РКЗ–2–9 до 1,2 и абсолютной величине до 10 т/т. Это объясняется более высокими потерями теплоты на этой печи в рассматриваемый период, а также особенностями гранулометрических свойств шихты, формирующими меньшую пристенную порозность, чем на ДП–9 ОАО «АМКР» (определено в процессе адаптации модели). На рис.1 приведены графики распределения RH при ФРН и РРН.

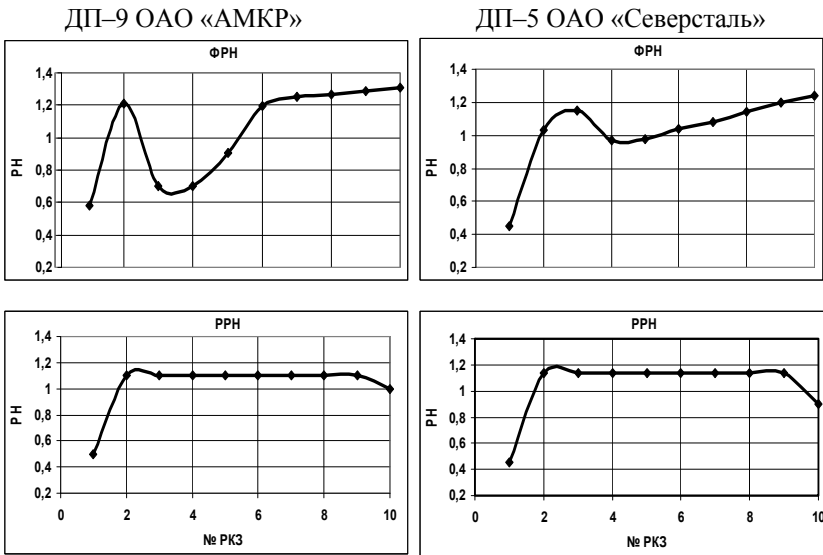


Рис.1. Относительные рудные нагрузки (RH) в радиальных кольцевых сечениях (РКЗ) – фактические (ФРН) и равномерные (РРН).

Решение изложенных задач, призванное, в частности, обеспечить эффективность замещения кокса пылеугольным топливом, по существу является частью комплексной системы совершенствования технологии доменной плавки для обеспечения минимального расхода кокса при высокой производительности агрегатов.

В табл.1 приводятся результаты расчета вариантов с максимальным замещением кокса, а на рис.2–5 – распределение наиболее характерных параметров плавки в объеме доменных печей (на рис.3,5, положения ЗРП в объеме печи, числа tp , tn , $tж$ – соответственно температуры начала размягчения, плавления и ожигения, $^{\circ}C$).

В вариантах только с вдуванием ПУТ 250 кг/т на ДП–9 ОАО «АМКР» может быть достигнут расход кокса 304 и 286 кг/т при ФРН и РРН соот-

ветственно, а на ДП-5 ОАО «Северсталь» эти величины составят 276 и 257 кг/т. На доменных печах с максимальными расходами ПУТ фактический расход кокса достиг 249–274 кг/т при расходе ПУТ 219–260 кг/т [13,16].

Перевод ДП-9 ОАО «АМКР» и ДП-5 ОАО «Северсталь» в режим работы с температурой дутья 1300°C и дополнительным расходом $\text{КГ}=100 \text{ м}^3/\text{т}$ позволит оптимизировать температурное поле печи и использовать резерв снижения r_d (от 36–38 до 24–25%) с получением существенной дополнительной экономии кокса [6]. С учетом увеличения содержания железа в шихте ДП-9 ОАО «АМКР» на двух рассматриваемых печах может быть получен расход кокса при ФРН – $215 \div 222$ кг/т, при РРН – $179 \div 200$ кг/т. С учетом существенного положительного влияния на показатели плавки собственно улучшенных свойств кокса реальными величинами ожидаемого расхода кокса являются, по-видимому, значения $190 \div 200$ кг/т. Эти величины близки к обозначенным ранее минимально-возможным значениям $180 \div 200$ кг/т [1, с. 600–603].

При переходе от базового варианта к варианту вдувания ПУТ+КГ с увеличением T_d до 1300°C температурное поле печи на обеих печах в случае ФРН деформируется в направлении перемещения вверх изотерм и разностей температур газа и шихты в малозагруженных РКЗ с увеличением количества РКЗ с вырожденной или близкой к вырождению верхней ступенью теплообмена (рис.2–5). Несколько вверх перемещаются и элементы ЗРП с некоторым утолщением. Указанные негативные явления при необходимости легко регулируются расходом КГ и полностью нивелируются при переходе к РРН. Удельные потери теплоты на ДП-5 ОАО «Северсталь» практически не изменяются, а на ДП-9 ОАО «АМКР» сокращаются ~ на 10% (отн.) по причине высокой температуры у фурм в базовом периоде. При переходе к РРН или близкому распределению ЗРП в РКЗ-2–9 смещается вниз при сохранении периферийной части (РКЗ-10) в области заплечиков, а центральной (РКЗ-1) – в области середины–верха шахты. В этом режиме наблюдается вырождение верхней ступени теплообмена во всех РКЗ, кроме РКЗ-1, а также достигаются предельные величины степени использования энергии газов.

Рассчитанные параметры процессов плавки и ожидаемые показатели технологии можно рассматривать как близкие к предельным с позиций минимизации расхода кокса при производительности $1,9 \div 2,0 \text{ т}/(\text{м}^3 \cdot \text{сутки})$. В этом направлении технология доменной плавки развивается в передовых металлургических компаниях мира и может развиваться в Украине и России. Однако она не может быть единственной, особенно когда речь идет преимущественно о вдувании ПУТ.

Таблица 1. Основные расчетные показатели работы доменных печей с максимальным замещением кокса

ПОКАЗАТЕЛЬ	ДП-9 «АМКР»					ДП-5 «Северсталь»						
	ФРН			РРН		ФРН			РРН			
Распределение РН	База	ПУТ	ПУТ+КТ	+%Fe	ПУТ	ПУТ+КТ	+%Fe	База	ПУТ	ПУТ+КТ	ПУТ	ПУТ+КТ
Варианты	1,73	1,74	1,7	1,85	1,82	1,84	1,89	1,76	1,84	1,75	1,9	1,91
Удельн. произ-сть, т/м ³ ·сут	505	304	250	215	286	214	200	421	276	222	257	179
Расход куска топлива, кг/т	1042	1042	1300	1300	1042	1300	1300	1184	1184	1300	1184	1300
Температура дутья, град.	29,7	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	24,3	25,0	25,0	25,0	25,0
Кислород в дутье, %	80,8/0	0,0/0	0,0/100	0,0/100	0,0/0	0,0/100	0,0/100	106,0/0	0,0/0	0,0/100	0,0/0	0,0/100
Природный/коксовый газ, м ³ /т	0	250	250	250	250	250	250	0	250	250	250	250
Расход ПУТ, кг/т	237	216	297	250	88	133	254	237	146	269	50	70
Колошн. газ: темпер-ра, °С	27,9	23,3	22,7	21,2	23,2	21,4	19,6	21,4	22,2	19,9	20,8	17,7
Содержание, % : CO	19,4	21,6	19,8	21,4	22,3	21,5	22,7	19,4	24,1	22,9	25,6	25,4
CO ₂	6,9	2,8	6,8	6,8	2,8	6,9	6,5	7,5	2,7	6,3	2,59	6,2
H ₂	55,17	55,49	55,57	59,94	55,52	55,63	59,96	59,65	59,98	60,08	60,02	60,20
Железо в шихте, %	3,54	5,64	6,85	7,47	6,00	8,00	7,88	3,79	5,73	7,13	6,16	8,79
Рудная нагрузка, т/т	410	405	402	277	404	401	276	270	261	259	260	255
Кол-во шлака, кг/т	1114	1132	1085	982	1061	973	963	1165	1002	1004	951	877
Расход дутья, м ³ /т	1815	1679	1716	1574	1594	1569	1535	1831	1522	1597	1451	1428
Объем влаж. газа, м ³ /т	2233	2193	2110	2060	2177	2056	2051	1999	2277	2086	2263	2017
Теор. темп-ра горения, °С	1631	1504	1568	1436	1412	1426	1413	1689	1340	1467	1276	1306
Кол-во фурмен. газа, м ³ /т	29,0	34,0	28,1	28,2	36,3	28,0	24,1	25,92	39,01	26,05	37,61	25,31
Прямое восп-е Fe, %	40,9	48,1	46,6	50,3	49,0	50,2	53,7	47,5	52,1	53,5	55,1	59,0
Степень использ-я СО+Н ₂ , %	4807	4743	4800	4327	4451	4299	4245	4443	4421	4419	4203	3852
Приход теплоты, кДж/кг	3640	3747	3596	3317	3791	3577	3217	3170	3484	3162	3447	3115
Потери теплоты, кДж/кг	455	426	403	395	445	400	412	575	592	577	645	584
Отношение водяных чисел	0,82	0,81	0,76	0,76	0,83	0,8	0,77	0,78	0,91	0,82	0,93	0,85
Инт-сть по газу, м ³ /(м ³ ·мин)	2,17	2,03	2,02	2,03	2,02	2,0	2,01	2,23	1,94	1,94	1,92	1,89

База, ФРН

ПУТ=250, КГ=100, Т_Д=1300,
О₂=25, %Fe=60, РРН

ПУТ=250, КГ=100, Т_Д=1300,
О₂=25, %Fe=60, РРН

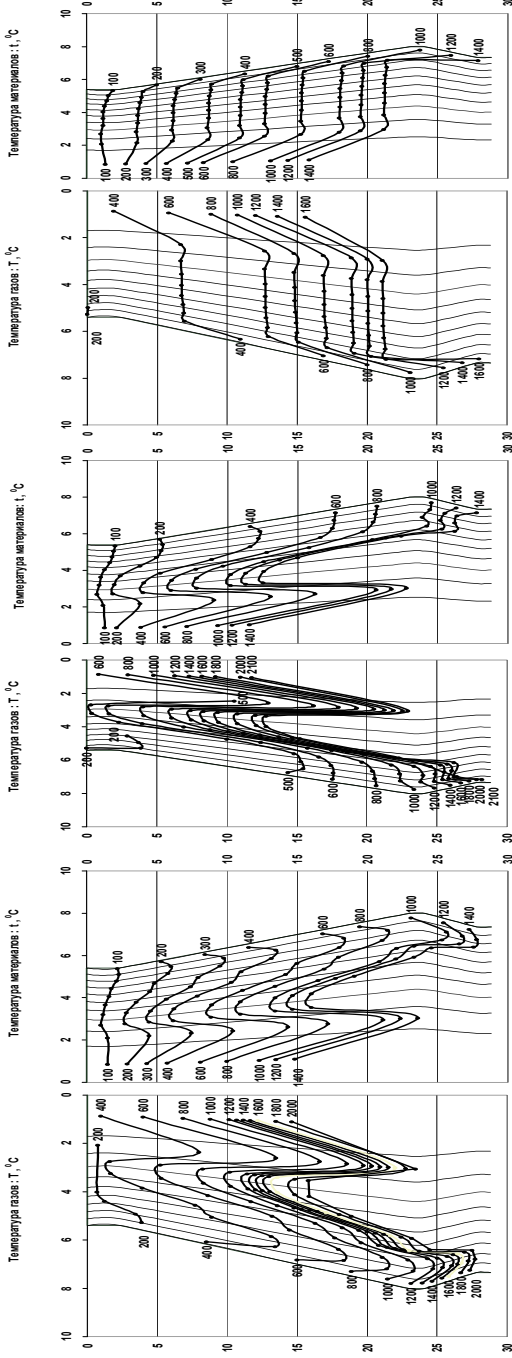
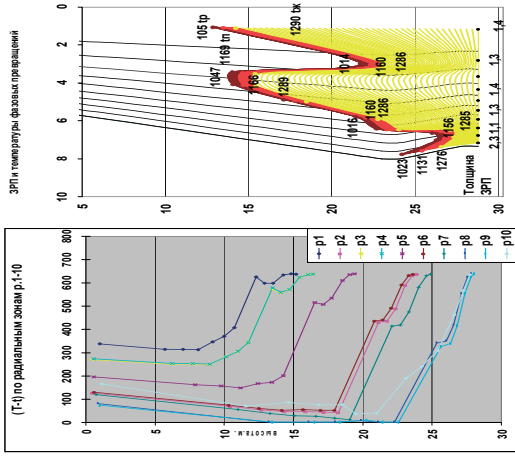


Рис.2. Распределение температур газа Т и шихты t в объеме ДШ-9 ОАО «АМКР» при разных параметрах плавки.

База, ФРН

ПУТ=250, КГ=100, Т_Д=1300,
О₂=25, ФРН



ПУТ=250, КГ=100, Т_Д=1300,
О₂=25, %Fe=60, РРН

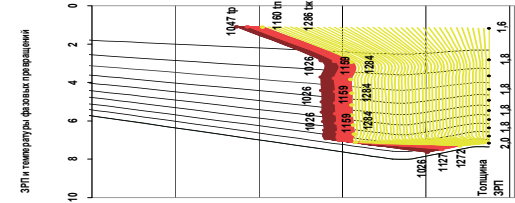
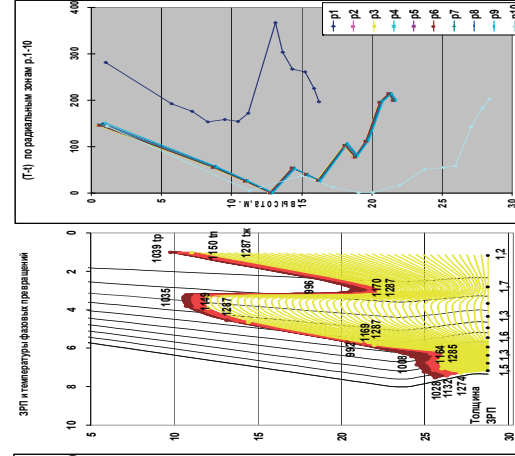


Рис.3. Распределение разности температур (Т-т) в РКЗ 1-10 и положение зоны размягчения и плавления (ЗРП) в объеме ДП-9 ОАО «АМКР» при разных параметрах плавки.

База, ФРН

ПУТ=250, КГ=100, ТД=1300,
О2=25, ФРН

ПУТ=250, КГ=100, ТД=1300,
О2=25, РРН

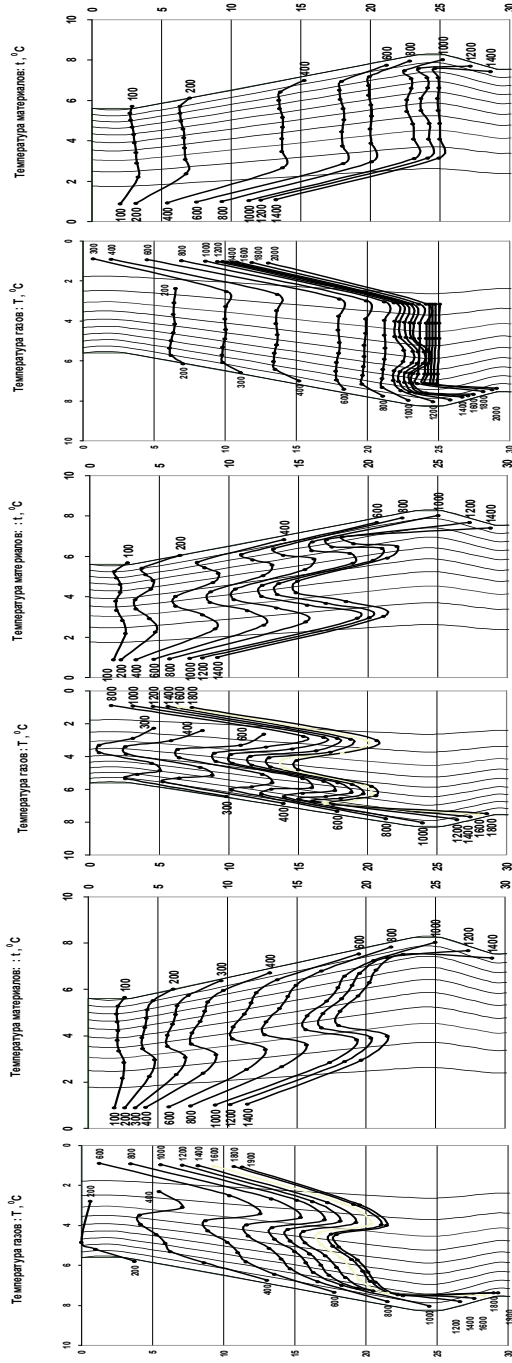
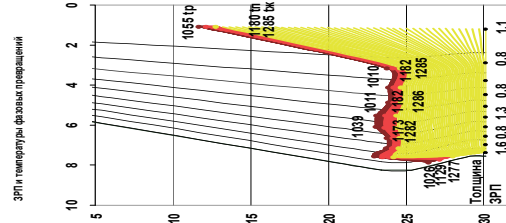
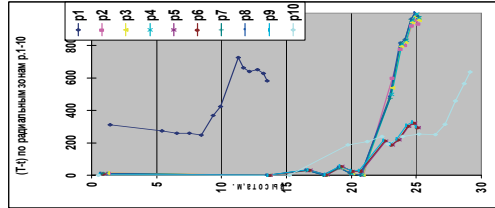
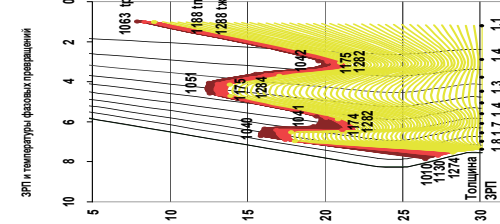
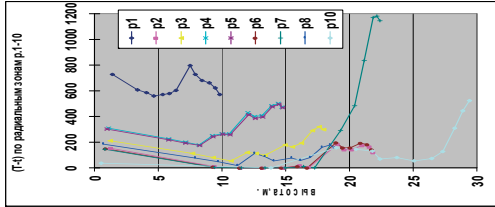
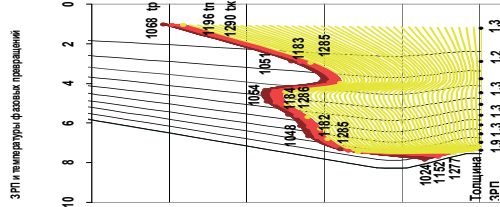
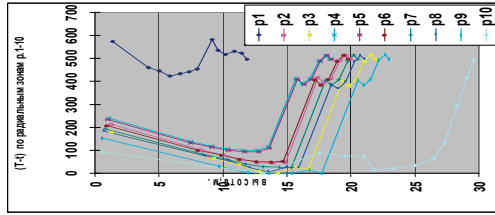


Рис.4. Распределение температур газа Т и шихты t в объеме ДП-5 ОАО «Северсталь» при разных параметрах плавки.

База, ФРН

ПУТ=250, КГ=100, Т_д=1300,
О₂=25, ФРН



ПУТ=250, КГ=100, Т_д=1300,
О₂=25, ФРН

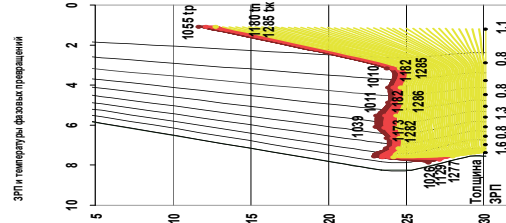
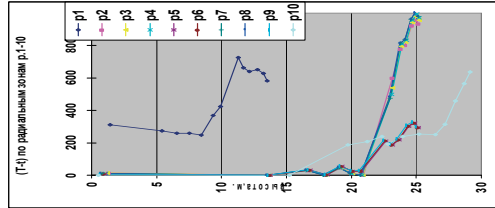
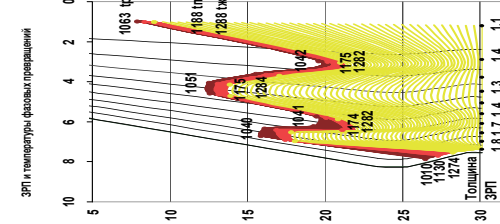
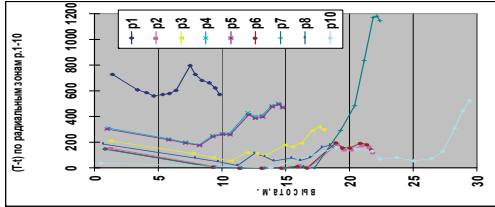
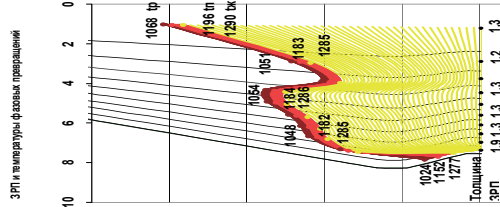
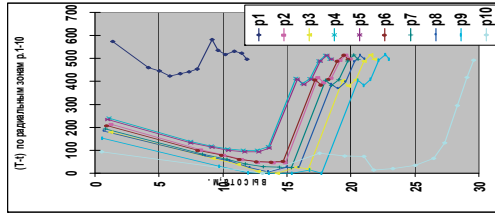


Рис.5. Распределение разности температур (Т-т) в РКЗ 1–10, а также положение зоны размягчения и плавления (ЗРП) в объеме ДП–5 ОАО «Северсталь» при разных параметрах плавки.

Прежде всего, это касается повышенных требований к качеству кокса и соответственно составу угольной шихты для коксования, а также сортаменту углей для приготовления ПУТ, выполнить которые в масштабах отрасли невозможно из-за дефицита углей требуемого сортамента в Украине и России [15,17] при труднодоступности мирового рынка для украинских предприятий. Другой фактор – организационно-технологический не позволяет эффективно реализовать технологию с вдуванием только ПУТ в случае небольших расходов, ограниченных реальными условиями по качеству кокса и сортаменту вдуваемых углей, и диктует необходимость вдувания также газообразных добавок (ПГ, КГ и др.).

Таким образом, реализация ожидаемых результатов технологии с вдуванием ПУТ требует, прежде всего, решения комплекса технических проблем коренного улучшения металлургических свойств кокса и железорудного сырья, а также управления процессами при низком расходе кокса. Хотя пути решения этих проблем известны [15–19], а трудности реализации в ограниченных масштабах преодолимы, возникающие в масштабах отрасли серьезные ограничения, в частности, дефицит высококачественных углей, ограничивает масштабы реализации этой технологии [15,17]. Указанные ограничения, не ощущавшиеся в начальный период расширения вдувания ПУТ в Европе и Азии, теперь характерны не только для Украины и России, но вскоре, по мере исчерпания ресурсов, окажут конъюнктурное влияние на развитие всей мировой металлургии.

В связи с этим, декларируемая в [16] «безальтернативная перспектива» вдувания ПУТ в условиях возрастающего дефицита коксующихся углей и углей для приготовления ПУТ, а также качественного железорудного сырья, может перерасти в тупиковую перспективу отдельных предприятий. Осмысление этого стратегического шага в развитии доменного производства Украины и России особенно важно еще и потому, что изложенные в [16] аргументы против альтернативных технологий совершенно неубедительны, так как использование КГ предполагается на основе пересмотра топливного баланса предприятия с покрытием дефицита продуктами газификации низкосортных углей, а применение специально подготовленного кускового антрацита для частичной замены кокса освоено и успешно используется на многих предприятиях Украины [6]. Что касается вдувания горячих восстановительных газов – продуктов газификации угля (ГВГ–ПГУ), то авторами [16] используется недостоверная информация о потерях и эффективности этой технологии [6] и игнорируется наличие значительных потерь от неполноты сжигания ПУТ, а также ограничении допустимого содержания золы и серы в угле.

Таким образом, расширение технологии вдувания ПУТ в отрасли при сопутствующем развитии работ по улучшению металлургических свойств сырья и кокса, как основы технического прогресса, должно сопровождаться разработкой дополняющих и альтернативных технологий. Эта

идеология становится достоянием все большего количества специалистов, в том числе бывших ее оппонентов [18].

Одной из альтернатив вдуванию только ПУТ является технология мобильного сочетания ПУТ и КГ (или другого восстановительного газа), позволяющая при недостатке углей требуемого сортамента для приготовления ПУТ, например, по зольности, вдувать на отдельных доменных печах ПУТ не 200–250, а 100–150 кг/т. В этом случае для поддержания на оптимальном уровне температуры у фурм и соответственно температурного поля печи потребуется вдувать 100–150 м³/т КГ или эквивалентное количество другого восстановительного газа, например, ПГУ широкого назначения [1] с получением расхода кокса, соответствующего вдуванию ПУТ 200 кг/т. При невозможности получения требуемых металлургических свойств кокса (по любым причинам) целесообразно сократить расход ПУТ вплоть до нуля, а расход КГ увеличить до 200–250 м³/т, что позволит получать доступную величину экономии кокса с сохранением стабильности процессов.

В различных сочетаниях с ПУТ, в том числе и при полном отключении ПУТ по разным причинам, может использоваться технология загрузки подготовленного кускового антрацита. Наиболее показательные результаты этой технологии получены в ОАО «АМКР» в периоды, когда комбинат не испытывал дефицита в антраците и получал качественный обогащенный продукт [20]. При среднемесячных расходах антрацита 56–74 кг/т и ПГ 70–87 м³/т расход кокса достигал 427–436 кг/т.

Фундаментальное решение проблемы сокращения расхода кокса до 180–200 кг/т чугуна с использованием для его замещения низкосортных углей может быть получено на основе разработки новой технологии доменной плавки с вдуванием ГВГ–ПГУ, получаемых в специальных газификаторах – прифурменных (на ДП) и придоменных (в отдельных агрегатах) [1]. От начала разработки технологии в 1980–1982 гг. [21] интерес к проблеме не уменьшается, однако ожидаемые трудности дальнейшей разработки и сложность практической реализации ограничивают инициативу потенциальных потребителей технологии. Тем не менее, периодический возврат к обсуждению проблемы с обращением бывших ее оппонентов в сторонников [18] оставляет надежду на окончательное осмысление реального положения с ресурсами углей и уяснение необходимости неотложного практического решения проблемы, путь решения которой давно обозначен [1].

Заключение. Рассмотрены возможности максимального сокращения расхода кокса за счет его замещения пылеугольным топливом (250 кг/т) и коксовым газом (100 м³/т) с увеличением температуры дутья до 1300⁰С и концентрации в нем кислорода 25%. Показана необходимость улучшения металлургических свойств кокса и сырья, а также оптимизации распределения материалов на колошнике. Установлена возможность сокращения

расхода кокса на ДП–9 ОАО «АМКР» и ДП–5 ОАО «Северсталь» в указанном режиме до 190÷200 кг/т.

Высокоэффективная технология вдувания ПУТ не может быть единственной в отрасли в связи с дефицитом высокосортных углей и динамичной конъюнктурой рынка. Ее расширение должно сопровождаться разработкой дополняющих и альтернативных технологий, в частности сочетания с вдуванием коксового газа, продуктов газификации низкосортных углей широкого назначения и др., а также загрузкой специально подготовленного кускового антрацита.

Фундаментальное решение проблемы сокращения расхода кокса до 180÷200 кг/т чугуна с использованием для его замещения низкосортных углей может быть получено на основе разработки новой технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов – продуктов газификации углей, получаемых в специальных газификаторах – прифурменных (на ДП) и придоменных (в отдельных агрегатах) [1].

1. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2-е издание. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768с.
2. *Большаков В.И., Шутылев Ф.М., Товаровский И.Г.* Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах // Бюллетень информации. Черная металлургия. – 2007. – № 9. – С.24–32.
3. *Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов и режимов доменной плавки при различных параметрах железорудной шихты // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.тр ИЧМ. Вып.21.–2010. С.21–45.
4. *Товаровский И.Г., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов и режимов доменной плавки при различной степени предварительной металлизации шихты // Сталь.–2010.–№ 11.–С.7–13.
5. *Товаровский И.Г., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки при вдувании природного и коксового газов // Сталь. – 2011. – №6.
6. *Товаровский И.Г.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки / И.Г.Товаровский, В.И.Большаков, А.Е.Меркулов. –Днепропетровск: ЧМП «Економіка», 2011. – 206с.
7. *Анализ процессов доменной плавки при обогащении дутья кислородом / И.Г.Товаровский, В.П.Лялюк, А.Е. Меркулов, Д.А.Кассим // Бюллетень «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация».– 2011.–№5.*
8. *Товаровский И.Г., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки при варьировании температуры дутья в широком диапазоне // Бюллетень «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация».– 2011.–№4–С.36–50.
9. *Некрасов З.И., Покрышкин В.Л., Бузовера М.Т.* Исследование состава твердых и жидких материалов в шахте и распаре доменной печи объемом 2000 м³// Мет. и горноруд. Пром. – 1968. – №4 – С.3–12.
10. *Исследование процессов газораспределения, восстановления и теплообмена в доменной печи по экспериментальным данным / К.М.Бугаев, Н.В.Косолап, В.С.Любимов и др.// Теория и практика производства чугуна. Труды Междуна-*

- родной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь». г. Кривой Рог, 24–27 мая 2004 г. – С.343–356.
11. *Доменное производство «Криворожстали»*. Монография. Под редакцией В.И.Большакова / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков и др.// КГГМК «Криворожсталь», ИЧМ НАНУ.– Днепропетровск.–2004.– 376с.
 12. *Blast furnace Phenomena and Modeling* / Ed. By Yasuo Omori. Elsevier applied science. – London and New York, 1987.– 631p.
 13. *Савчук Н.А., Курунов И.Ф.* Доменное производство на рубеже XXI века//Новости черной металлургии за рубежом.– 2000.– Часть II.– Приложение 5.– М.: ОАО «Черметинформация».– 42с.
 14. *Influence application of the CRM blast modern at Sidmar* / G.Danloy, J. Midnon, R. Munnix u.e.// 3–rd International Conference Science and Technology Ironmaking, June 16–20, 2003, Proceeding, Dusseldorf.–P. 83–88.
 15. *Золотухин Ю.А., Андрейчиков Н.С.* Требования к качеству кокса для доменных печей с высоким расходом пылеугольного топлива // *Сталь*.–2009.– №6. – С.3–7.
 16. *Пылеугольное топливо — безальтернативная перспектива доменного производства в Украине/ А.Н.Рыженков, А.А.Минаев, С.Л.Ярошевский, Б.П.Крикунов, В.М.Замуруев, А.И.Дрейко* // *Сталь*.– 2010.–№ 10.–С.7–14.
 17. *Старовойт А.Г.* Современная сырьевая база для коксования, ее структура и требования к качеству кокса // *Новини науки Придніпров'я*. Науково-практичний журнал. – май 2010. – С.22–25.
 18. *Перспективы и эффективность технологии выплавки чугуна в доменных печах / С.Л.Ярошевский, З.К.Афанасьева, А.В.Кузин, И.В.Мишин* // *Новини науки Придніпров'я*. Науково-практичний журнал. – май 2010. – С.25–31.
 19. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки.– К.: Наукова думка, 2007.– 411с.
 20. *Антрацит и термоантрацит в шихте доменной плавки* // В.П.Лялюк, И.Г.Товаровский, Д.А.Демчук и др. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 245с.
 21. *Товаровский И.Г., Хомич В.Н., Боярковская Г.П.* Эффективность использования продуктов газификации твердого топлива в качестве дутьевых добавок в доменной печи // *Сталь*. – 1982. – №6. – С.5–11.

*Статья рекомендована к печати
канд. техн. наук Н.М.Можаренко*

Й.Г.Товаровський, В.І.Большаков, О.Є.Меркулов

Аналітичне дослідження процесів і режимів доменної плавки з максимальним заміщенням коксу

На основі виконаних аналітичних досліджень показників і процесів доменної плавки розглянуто можливості максимального скорочення витрат коксу за рахунок його заміщення пиловугільним паливом і коксовим газом зі збільшенням температури дуття та концентрації в ньому кисню. Рациональні параметри режимів і кінцеві результати плавки з максимально-можливим заміщенням коксу визначено для умов двох різних доменних печей. Розрахунки виконано за допомогою розробленої в Інституті багатозонної математичної моделі, що дозволяє виявити внутрішні зв'язки процесів в об'ємі доменної печі. Отримано нові наукові результати та висновки для практичного використання.