



## Анализ коксосберегающих режимов доменной плавки на примере доменной печи № 9

*На основе разработанной в ИЧМ НАН Украины математической модели выполнен анализ коксосберегающих режимов доменной плавки, который показал возможность поэтапной реализации альтернативных режимов: загрузка в печь кускового угля с улучшением свойств сырья – использование пылеугольного топлива – вдувание продуктов газификации углей. Такая схема обеспечит сокращение расхода кокса до уровня 200 кг/т чугуна. Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** доменная плавка, продукты газификации угля, пылеугольное топливо, кокс

*Analysis of coke saving modes of blast furnace process based on the developed mathematical model was conducted in the Institute of Ferrous Metallurgy of National Academy of Sciences of Ukraine, which showed the possibility of a phased implementation of alternative modes: charging lump coal into the furnace with improved properties of raw materials - the use of pulverized fuel - injection of coal gasification products. This scheme will reduce coke consumption to the level of 200 kg/t of pig iron.*

**Keywords:** blast furnace process, products of coal gasification, pulverized coal, coke

По мере возрастания выплавки металла при ограниченных объемах ресурсной базы коксующихся углей проблема коксосбережения обретает первостепенное значение в развитии металлургии. Решение проблемы осуществляется по двум направлениям: сокращение теплопотребности плавки за счет подготовки шихты и улучшения организации технологии; замещение кокса менее дорогими энергоносителями. Эффективность второго из указанных направлений зависит от свойств замещающего энергоносителя и его стоимости, а его реализация всегда связана с необходимостью использования первого направления.

В доменной плавке кокс выполняет функции комплексного энерготехнологического материала: наряду с энергообеспечением процессов он является твердой насадкой в зоне размягчения и плавления железосодержащих материалов, обеспечивающей противоток шихты и газов в печи, а также регулятором газораспределения по площади поперечного сечения агрегата. В силу сложности указанных функций замещение кокса в доменной плавке другими топливными компонентами не может рассматриваться только с термодинамических позиций, а требует комплексного анализа всей технологии с целью выявления режимов, обеспечивающих эффективное решение задачи, т.е. разработки новой технологии [1].

В условиях рыночной конъюнктуры при динамичном изменении цен на топливо требуется иметь широкий арсенал технологий замещения кокса различными энергоносителями, позволяющих на каждом отрезке времени реализовать наиболее эффективный вариант.

Для условий ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (ПАО «АМКР») характерна сильная зависимость эф-

фективности плавки в целом и отдельных мер по сокращению расхода кокса от металлургических характеристик кокса и сырья [2, 3]. Это особенно важно при замещении большого количества кокса пылеугольным топливом (ПУТ) и является определяющим фактором при решении вопроса о реализации технологии вдувания ПУТ. Поскольку задача улучшения металлургических свойств сырья и кокса является долговременной, её решение должно упреждать реализацию вдувания ПУТ, а после перевода доменной плавки на высококачественное железорудное сырье и кокс будет получен эффект, величина которого соизмерима с эффектом от вдувания ПУТ.

Расчеты для условий ДП-9 ПАО «АМКР» [4] показали, что реализация комплекса мероприятий, необходимых для эффективного внедрения ПУТ, позволит получить расход кокса 378 кг/т, а при загрузке кускового антрацита 70 кг/т (освоенная технология) расход кокса составит 318 кг/т. Таким образом, ближайший этап развития технологии на этой ДП будет высокоэффективным при замене части кокса кусковым антрацитом, использование которого не требует значительных капитальных затрат.

Дальнейшее развитие технологии связано с вдуванием ПУТ. Реализация ожидаемых результатов вдувания ПУТ требует, кроме решения комплекса проблем коренного улучшения металлургических свойств кокса и железорудного сырья [5, 6], также разработки методов управления процессами при низком расходе кокса. Пути решения этих проблем известны, а трудности реализации в ограниченных масштабах преодолимы. Однако при решении проблем в масштабах отрасли возникают серьезные ограничения, обусловленные, в частности, дефицитом коксующихся углей и углей для приготовления ПУТ [5].

Таблица 1. Составы углей, принятые для расчета показателей и параметров ДП при вдувании ПУТ и ПГУ

Угли для вдувания	Зола, %	Лет., %	S, %	H, кг/кг	N, кг/кг	O, кг/кг	H <sub>2</sub> O, кг/кг	C <sub>пер.</sub> кг/кг	C <sub>с.</sub> кг/кг	C <sub>нет.</sub> кг/кг
ПУТ	10	13	1,2	0,040	0,015	0,025	0,01	0,050	0,798	0,748
ПГУ	25	25	1,2	0,050	0,025	0,075	0,01	0,10	0,578	0,478

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. Учитывая изложенное, следует сочетать развитие вдувания ПУТ с разработкой и развитием альтернативных коксозамещающих технологий, сочетающих вдувание ПУТ с природным, коксовым газом и др. при загрузке в ДП кусковых углей и коксового «ореха».

В связи с возрастающим дефицитом малозольных углей для приготовления ПУТ, 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 (ГВГ–ПГУ), получаемых в специальных газификаторах – прифурменных (на ДП) и придоменных (в отдельных агрегатах) [1]. Можно надеяться, что ожидаемые трудности разработки, начатой еще в 1980–1982 гг., и сложности ее практической реализации не станут препятствием для осмысления реального положения с ресурсами углей и уяснению неотложности практического решения проблемы, актуальность которого давно обозначена [1].

Сущность технологии с вдуванием ПГУ заключается в следующем. Каждый фурменный прибор ДП на участке «коллено-сопло» оборудуется прифурменным газификатором (ПФГ) – устройством для газификации ПУТ. Сверху от коллектора горячего дутья через опуск к ПФГ подается горячее дутье, в поток которого вдувается ПУТ. Генерируемые в устройстве ГВГ–ПГУ выводятся из ПФГ в области воздушной фурмы ДП и поступают в фурменный очаг. Часть окислительного дутья, поступающего непосредственно в ДП для сжигания кокса, подается отдельным трактом, который может быть выполнен в двух вариантах: 1) автономный отвод горячего дутья из опуска коллектора с подводом его к воздушной фурме для ввода в ДП; 2) замена части горячего дутья эквивалентным количеством не подогретого (холодного) кислорода – ХК, подаваемого трубкой через тело фурмы в фурменный очаг (по основному каналу фурмы поступают ПГУ).

Высокая полнота газификации ПУТ в ПФГ при полном ожигании зольной части с выносом её в ДП обеспечивает эффективный режим сжигания кокса в фурменных очагах и позволяет, в отличие от обычного вдувания ПУТ, использовать для вдувания в ДП большое количество высокозольных углей.

Для анализа особенностей новой технологии и ожидаемых результатов выполнены расчеты на моде-

ли, разработанной в ИЧМ НАНУ [1]. В качестве базового периода приняты параметры работы ДП-9 ПАО «АМКР» в лучшем по показателям периоде работы – октябре 2006 г. Вариант ПУТ предполагает вдувание 250 кг/т чугуна малозольного угля (до 10 % золы, 13 % летучих, табл. 1) при полном выводе природного газа, а вариант ПГУ – вдувание ГВГ–ПГУ из высокозольных углей (25 % золы, 25 % летучих, табл. 1) в количестве 400 кг угля на 1 т чугуна, предполагающем замещение такого же количества кокса, как в варианте ПУТ.

Остальные варианты предполагают минимизацию расхода кокса  $K_{мин}$  за счет увеличения температуры дутья до 1300 °С и перевода дополнительного известняка из доменной шихты в агломерационную, а также последующего увеличения содержания железа в шихте и выбора рационального распределения рудной нагрузки (РН) в поперечном сечении ДП.

Распределение рудных нагрузок по радиальным кольцевым сечениям (РКЗ) печи рассчитывается по заданному в базовом варианте распределению каждого компонента шихты между РКЗ, а при поиске наилучшего – задаются. Результаты определения распределений относительных рудных нагрузок следующие (ФРН – фактические, РРН – равномерные в промежуточных РКЗ):

РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ФРН	0,414	1,541	1,475	1,125	1,008	0,995	1,049	0,995	0,961	0,926
РРН	0,42	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12

Особенностью распределения рудных нагрузок в базовом периоде (см. выше) является наличие в промежуточной зоне отдельных РКЗ со сверхвысокой рудной нагрузкой, что характерно для конусной загрузки. Однако расположение указанных РКЗ вблизи оси (РКЗ–2, 3) существенно изменяет в положительном направлении их функциональную роль и влияние на эффективность плавки. Требуется дополнительное изучение этой особенности.

В табл. 2 приводятся основные расчетные показатели плавки в различных вариантах технологии, а на рисунке отображено температурно-концентрационное поле в объеме ДП в эти периоды. При вдувании ПУТ (250 кг/т чугуна) сокращение расхода кокса составило 176 кг/т, а с учетом вывода природного газа (87 м<sup>3</sup>/т) – 250 кг/т, что соответствует эквиваленту замещения кокса  $\mathcal{E}Z_k = 1,0$  кг кокса/кг угля. При вдувании ПГУ (расход угля 400 кг/т) сокращение расхода кокса соответствует  $\mathcal{E}Z_k = 0,54$  кг кокса/кг угля. Соответствующие эквиваленты замещения по углероду кокса и углей (см. табл. 1) составляет:

- при вдувании ПУТ  $\mathcal{E}Z_c = 1,07$  кг  $C_{\text{кокса}}/кг C_{\text{угля}}$ ;

- при вдувании ПГУ  $\mathcal{E}Z_c = 0,794$  кг  $C_{\text{кокса}}/кг C_{\text{угля}}$ .

Замещение углерода с величиной  $\mathcal{E}Z_c > 1,0$  кг  $C_{\text{кокса}}/кг C_{\text{угля}}$  в случае ПУТ полностью объяснимо сокращением

## ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Таблица 2. Ожидаемые показатели доменной плавки на доменной печи 5000 м<sup>3</sup> ПАО «АМКР» при вдувании ПУТ, ПГУ и неподогретого (холодного) кислорода (ХК), а также минимизации расхода кокса ( $K_{\text{мин}}$ ) за счет увеличения температуры дутья, перевода сырого известняка из доменной шихты в агломерационную, а также последующего увеличения содержания железа в шихте (Fe) и выбора распределения рудных нагрузок по площади колошника (РРН)

Показатели	База	ПУТ <sub>250</sub>	ПГУ <sub>400</sub>	$K_{\text{мин}}$ ФРН	$K_{\text{мин}}$ РРН+Fe	$K_{\text{мин}}$ РРН. Fe.ХК
Суточная производ-ть, т/сут.	9604	9170	7910	9012	10078	8926
Расход кокса, кг/т чугуна	483	308	342	250	199	250
Дутье: расход, м <sup>3</sup> /мин	6674	6389	3060	2172	1488	858
температура, °С	1090	1090	1090	1300	1300	100
содержание кислорода, %	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	90
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	87	0	0	0	0	0
Расход вдуваемого угля, кг/т	0	250	400	400	400	400
Колошник. газ: тем-ра, °С	81	308	289	185	62	259
содержание, %: СО	29,1	27,9	29,3	28,3	26,8	25,9
СО <sub>2</sub>	19,8	22,4	19,0	19,9	21,9	20,9
Н <sub>2</sub>	7,7	5,0	8,3	9,2	9,6	8,5
Известняк/конверт. шлак, кг/т	35/56	47/56	132/55	0/57	0/54	0/54
Агл.+Окатыши+Руда, кг/т	1629	1627	1610	1677	1566	1567
Железо в шихте, %	55,2	55,0	53,5	53,7	57,4	57,4
Рудная нагрузка, т/т	3,7	5,8	5,4	7,2	8,4	6,7
В шлаке*, %: кремнезем	37,0	35,9	36,0	35,5	34,3	34,2
глинозем	8,7	8,6	9,7	9,5	10,6	10,5
известь	45,0	43,7	43,7	43,2	41,7	41,6
магнезия	4,7	4,5	4,0	4,0	3,9	3,9
Количество шлака, кг/т	416	445	550	545	429	429
Объем влажного газа, м <sup>3</sup> /т	1715	1649	2027	1720	1538	1774
Расход кислорода (расч.), м <sup>3</sup> /т	141	142	79	49	30	139
Теоретич. тем-ра горения, °С	2219	2328	2056	2054	1947	1970
Количество фурм. газа, м <sup>3</sup> /т	1502	1459	1844	1566	1388	1658
Кол-во сух. колошн. газа, м <sup>3</sup> /т	1607	1568	1905	1598	1411	1646
Прямое восст-е оксида Fe, %	35,9	33,1	22,0	28,3	29,0	19,1
Использование СО+Н <sub>2</sub> , %	40,5	44,4	39,1	41,3	44,9	44,7
Кусковой углерод, кг/т: общий/в районе фурм	411/284	262/140	291/185	213/115	170/71	213/134
Общ. приход теплоты, кДж/кг	4425	4917	5314	4617	3927	4615
в том числе: горение кокса	2790	1374	1815	1131	693	1317
теплота дутья и добавок	1508	3423	3373	3368	3125	3191
Потребность теплоты, кДж/кг	3899	3846	3777	3591	3346	3160
Энтальпия колошн. газа, кДж/кг	225	824	1164	639	194	1021
Потери теплоты, кДж/кг	302	247	373	388	387	434
Доля полезной теплоты, %	88	78	71	78	85	68
Отношение водяных чисел	0,856	0,819	0,80	0,831	0,848	0,86
Теплотвор. кол. газа, кДж/м <sup>3</sup>	4513	4076	4610	4574	4439	4187
Интенсивность: по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	2,27	2,09	2,21	2,14	2,14	2,18
по коксу/ЖРШ, кг/м <sup>3</sup> ·сут.	902/3217	549/3069	525/2620	438/3107	390/3245	435/2876
ПГУ**: количество, м <sup>3</sup> /т чугуна	0	0	1106	1106	1106	1393
температура, °С	-	-	1590	1693	1693	1572
содержание СО+Н <sub>2</sub> , %	-	-	60,3	60,3	60,3	48,1

\*При содержании в чугуне во всех вариантах, %: Si 0,84; Mn 0,32; S 0,019 и основности шлака 1,22.

\*\*При заданном отношении O/C = 0,5 моль/моль

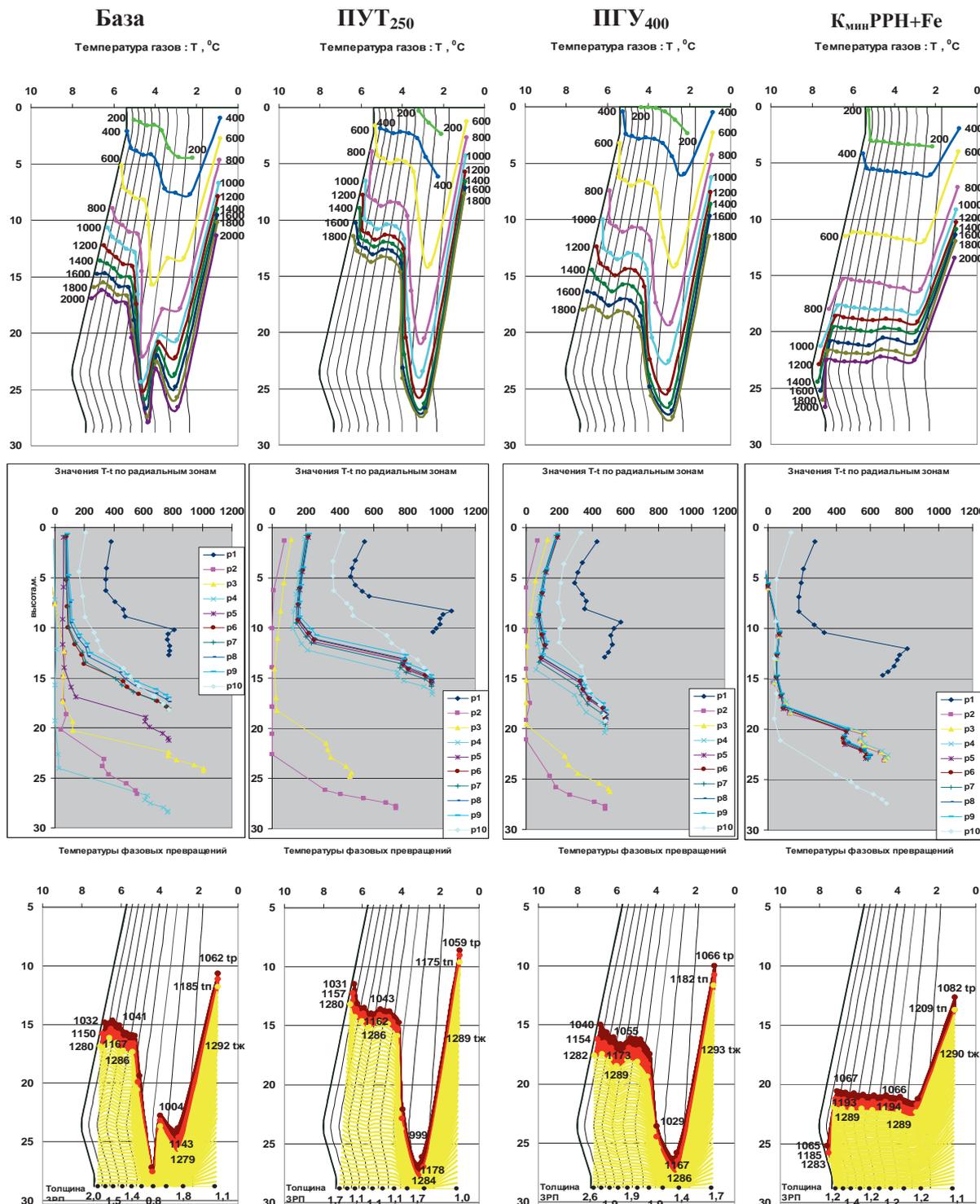


Рисунок. Изолинии температуры газа (Т), разности температур газа и шихты (Т-т), а также параметры зоны размягчения и плавления (ЗРП) в рабочем пространстве ДП в базовом периоде, при вдувании ПУТ, ПГУ и K<sub>мин</sub> PRH+Fe; по горизонтали – расстояние от оси ДП, по вертикали – расстояние от «технологического нуля», м. Температура начала размягчения – t<sub>п</sub>, плавления – t<sub>ж</sub>, жидкофазного течения – t<sub>ж</sub>

степени прямого восстановления, которое составляет в «чистом» виде 0,03–0,04 %/кг ПУТ и существенно увеличивает эквивалент замещения [1]. Для случая ПГУ указанная величина составляет 0,05 %/кг угля, что соответствует увеличению ЭЗ<sub>к</sub> на 0,2 кг/кг. За счет этого замещение углерода могло быть ЭЗ<sub>с</sub> = 1,20 против фактического 0,794 кг C<sub>кокса</sub>/кг C<sub>угля</sub>. Разница ЭЗ<sub>с</sub> = 0,4 кг/кг обеспечивает процессы превращений дополнительного шлака и флюса, образованных за

счет превышения зольности кокса зольностью замещающего угля, и количественно соответствует известным балансовым соотношениям [1].

Величина удельного расхода кокса при вдувании ПУТ (250 кг/т) снижается до 308 кг/т чугуна, а при вдувании ПГУ (400 кг угля/т чугуна) – 342 кг/т. Дальнейшее совершенствование технологии с вдуванием ПГУ позволит достичь минимально-возможного уровня расхода кокса 200 кг/т чугуна, что иллюстри-

руется результатами расчета ряда вариантов (табл. 2):

-  $K_{\text{мин}}^{\text{ФРН}}$  – увеличение температуры дутья до 1300 °С и перевод сырого флюса из доменной шихты в агломерационную при фактическом распределении рудных нагрузок на колошнике (ФРН);

-  $K_{\text{мин}}^{\text{РРН+Fe}}$  – то же при равномерном распределении рудных нагрузок в промежуточных радиальных зонах и периферийной «отдушине» (РРН), а также увеличении содержания железа в шихте;

-  $K_{\text{мин}}^{\text{РРН.Фе.ХК}}$  – то же при замене горячего дутья не подогретым (холодным) кислородом.

Уже первый из рассмотренных вариантов дает низкий расход кокса (250 кг/т) при умеренной производительности (9012 т/сут.), что во многом обусловлено хорошим распределением материалов на колошнике в базовом периоде. Соответственно для варианта  $K_{\text{мин}}^{\text{РРН+Fe}}$  получены наилучшие результаты – расход кокса 199 кг/т чугуна и производительность 10078 т/сутки. Приемлемым при определенных условиях является также вариант  $K_{\text{мин}}^{\text{РРН.Фе.ХК}}$  (250 кг/т).

Таким образом, подача в ДП до 400 кг/т чугуна высокозольного угля (25 % золы) в виде ПГУ позволит заместить количество кокса, близкое к замещаемому при вдувании 250<sup>1</sup> кг/т чугуна ПУТ из малозольных углей (до 10 % золы). При дальнейшем совершенствовании параметров новой технологии и оптимизации распределения материалов на колошнике возможно сокращение расхода кокса до минимально-допустимого уровня 180-200 кг/т чугуна [1].

Изменение температурно-концентрационных полей печного пространства при варьировании параметров новой технологии иллюстрируется результатами расчетов, приведенными на рисунке.

По сравнению с базовым периодом при вдувании ПУТ и ПГУ изотеры газа, а также границы зон теплообмена (точки перегиба кривых разности температур газа и шихты) смещаются вверх, а значения разности температур газа и шихты увеличиваются. Вверх перемещаются и элементы ЗРП с некоторым уменьшением их толщины. Характерно, что величины указанных изменений в случае ПУТ – значительны, а в случае ПГУ – малозначительны.

При формировании варианта с минимизацией расхода кокса варьировали величину РН у периферии при заданной РН у оси и равномерном распределении в остальных радиальных зонах. В лучшем из рассмотренных вариантов  $K_{\text{мин}}^{\text{РРН+Fe}}$  (199 кг/т чугуна, 10 тыс. т чугуна в сутки) достигнуто равномерное распределение температур в РКЗ-2–9 при смещении изотерм этих РКЗ, а также границ зон теплообмена (точек перегиба кривых разности температур газа и шихты) в область, ниже соответствующих величин базового периода, а также перемещения периферийной изотермы вниз заплечиков. В соответствии с изменением температурного поля произошла деформация ЗРП, элементы которой в РКЗ-2-9 сдвинулись в низ шахты, а в РКЗ-10 (периферия) – в середину заплечиков. Полученное в этом варианте температурно-

<sup>1</sup> Величина, реально достигнутая мировой практикой

концентрационное поле печного пространства более благоприятно для хода процессов, чем в других периодах.

### Закключение

Выполненный на основе математического моделирования процессов доменной плавки анализ коксосберегающих режимов показал, что реализацию альтернативных режимов целесообразно осуществлять поэтапно.

Применительно к ДП-9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» первостепенным является коренное улучшение металлургических характеристик кокса и сырья, которое уже в ближайшее время позволит достичь расхода кокса 380–400 кг/т, а при сочетании с разработанной и освоенной технологией загрузки в ДП кускового антрацита 300–320 кг/т без значительных капитальных затрат.

На этой основе в последующий период возможна реализация технологии замещения более 50 % кокса углем при полном исключении природного газа. Поскольку обеспечение этой технологии низкотемпературными углями в сложившихся и в перспективных условиях проблематично, необходимо актуализировать разработку, испытание и реализацию новой технологии доменной плавки с вдуванием продуктов газификации зольных углей, которая обеспечит сокращение расхода кокса до минимально-возможного уровня 180–200 кг/т чугуна.

### Библиографический список

1. Товаровский И.Г. Процессы доменной плавки. Монография. Т. 1. Анализ состояния. -595 с. Т.
2. Проблемы и перспективы. – М.: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing. - 2012. - 406 с.
2. Влияние состава и качества железорудного сырья на технико-экономические показатели доменной плавки / В.П. Лялюк, В.А. Шеремет, А.К. Тараканов и др. // БНТИ Черная металлургия. – 2010. – № 12. – С. 32–38.
3. Влияние шихтовых и технологических факторов на температуру выпускаемого из доменной печи чугуна / В.П. Лялюк, К.А. Дмитренко, А.А. Колесник и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 2010. - № 1. - С. 23-26.
4. Entwicklungstrends bei Koks einsparenden Technologien für den Hochofenprozess / Vitaliy Lyalyuk, Vladimir Scheremet, Pavel Otorvin, Josif Tovarovskiy, Darja Kassim // Stahl und Eisen, Germany. – 2010. – № 6. – С. 43-50.
5. Старовойт А.Г. Современная сырьевая база для коксования, её структура и требования к качеству кокса // Новини науки Придніпров'я. Науково-практичний журнал. – май 2010. – С. 22-25.
6. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Лялюк В.П. Альтернативные коксосберегающие технологии – перспектива развития доменного производства // Металлург. и горноруд. пром-сть. - 2011. - № 2. - С. 10-13.

Поступила 10.10.2012