

**И.Г.Товаровский, А.Е.Меркулов**

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ И ПАРАМЕТРОВ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ВДУВАНИЕМ ПРОДУКТОВ  
ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕЙ**

С использованием разработанной в ИЧМ НАН Украины многозонной математической модели выполнено аналитическое исследование доменной плавки при вдувании продуктов газификации углей. Показано, что при использовании продуктов газификации углей температурно–концентрационные и фазовые поля шихты и газового потока изменяются так же, как и в случае вдувания пылеугольного топлива. Возможно значительное увеличение количества вдуваемых углей в случае их предварительной газификации.

**доменная плавка, математическая модель, продукты газификации угля, пылеугольное топливо.**

При решении задач сокращения расхода кокса одной из приоритетных является реализация технологии доменной плавки (ДП) с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ), которая нашла широкое развитие на передовых предприятиях мира с достижением расхода ПУТ 260 кг/т чугуна. Выполненные ранее расчетно–аналитические исследования показали возможность сокращения расхода кокса до 250 кг/т чугуна при вдувании указанного количества ПУТ на отдельных доменных печах (ДП) Украины и России с учетом выполнения требований к свойствам сырья и кокса [1].

Однако общие масштабы развития этой технологии ограничены, прежде всего, повышенными требованиями 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 большинстве стран при труднодоступности мирового рынка. В случае небольших расходов ПУТ, ограниченных реальными условиями по качеству кокса и сортаменту вдуваемых углей, требуется одновременное вдувание также природного, коксового или др. газов. Учитывая изложенное, следует сочетать развитие вдувания ПУТ с разработкой и развитием альтернативных коксозамещающих технологий.

В современных условиях острого дефицита углей требуемого сортамента фундаментальное решение проблемы сокращения расхода кокса вплоть до 200 кг/т чугуна лежит на пути использования для его замещения низкосортных углей и может быть получено на основе разработки новой технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов (ГВГ) – продуктов газификации углей (ПГУ), получаемых в специальных газификаторах – придоменных (в отдельных агрегатах) и прифурменных – ПФГ (на ДП) [2]. Сущность технологии с вдуванием ПГУ при использовании ПФГ заключается в следующем.

Каждый фурменный прибор ДП на участке «колено–сопло» оборудуется ПФГ – устройством для газификации ПУТ. Сверху от коллектора горячего дутья через отдельный патрубок 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. Конструкция ПФГ, разработанная специалистами ИЧМ и ИВТАН, опирается на решения, заложенные в ранее созданный вихревой реактор–газификатор ИВТАН. 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 патрубка коллектора с подводом его к воздушной фурме для ввода в ДП.

2. Замена части горячего дутья эквивалентным количеством не подогретого кислорода, подаваемого трубкой через тело фурмы (аналогично природному газу) и выводимого в фурменный очаг (по основному каналу фурмы поступают ПГУ).

Высокая полнота газификации ПУТ в ПФГ при полном ожигении 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 системной оценки влияния основных параметров на показатели доменной плавки в настоящей работе используется разработанная в ИЧМ НАН Украины математическая модель [1–3], в которой протекание процессов теплопередачи, восстановления оксидов и фазовых превращений рассматривается в 12 вертикальных температурных зонах (ВТЗ) по высоте столба шихты и 10 радиальных кольцевых зонах (РКЗ) по горизонтали и описывается в модели дискретно системой материально–тепловых балансов. На основе структурной увязки многозонных по высоте и радиусу доменной печи и общих балансов масс и теплоты увеличены прогнозные возможности модели, в том числе по установлению новых количественных связей процессов и выявлению влияния неравномерности распределения материалов по радиусу печи на показатели плавки.

Для анализа разрабатываемой новой технологии доменной плавки с вдуванием ГВГ–ПГУ, получаемых в специальных газификаторах, ранее разработанная модель ДП дополнена модулем расчета прифурменной газификации (ПФГ) углей. На вход модуля ПФГ задают количества, составы и температуры газифицируемого агента и окислителя, а на выходе получают расчетные параметры ПГУ (количество, температура, состав) и задают их на вход модели ДП.

В качестве базы для расчетов приняты условия работы ДП № 5 ОАО «Северсталь» (далее «ССТ») объемом 5500 м<sup>3</sup> и ДП № 9 ПАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» (далее «АМКР») объемом 5000 м<sup>3</sup>. Указанные ДП

работали в базовом режиме при следующих распределениях относительной рудной нагрузки (РН) в РКЗ на колошнике:

ДП	№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ 5	РН	0,45	1,03	1,15	0,97	0,98	1,04	1,08	1,14	1,2	1,24
№ 9	РН	0,49	0,98	1,08	1,08	1,08	1,03	1,08	1,09	1,09	1,23

Расчетные варианты включают (при исключении природного газа – ПГ):

1. Вдувание ПУТ из высокосортных углей (ПУТ<sub>ВС</sub>) – 250 кг/т чугу. (ПУТ<sub>ВС250</sub>).

2. Вдувание ПУТ из низкосортных углей (ПУТ<sub>НС</sub>) – 400 кг/т чугуна (нереализуемый вариант, рассчитываемый условно для анализа – ПУТ<sub>НС400</sub>).

3. Вдувание ПГУ из низкосортных углей (ПГУ<sub>НС</sub>) при подаче в ПФГ угля – 400 и 450 кг/т чугуна и части (соответствующего количества) горячего дутья, вдуваемого через воздушные фурмы ДП (ПГУ<sub>НС400</sub>, ПГУ<sub>НС450</sub>).

4. То же, что п. 3, но с вдуванием через воздушные фурмы ДП не подогретого кислорода вместо горячего дутья (ПГУ<sub>НС400О</sub>, ПГУ<sub>НС450О</sub>).

При расчете вариантов 3 и 4 с вдуванием ПГУ учитывается потеря 10% теплоты в ПФГ. Принятые для расчетов составы углей приведены в табл.1.

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

Угли	Зола	Лет.	S	H	N	O	H <sub>2</sub> O	C <sub>лет</sub>	C <sub>γ</sub>	C <sub>цел</sub>
ПУТ <sub>ВС</sub> АМКР	10	13	1,2	4,0	1,5	2,5	1,0	5,0	79,8	74,8
ПГУ <sub>НС</sub> АМКР	25	25	1,2	5,0	2,5	7,5	1,0	10	57,8	47,8
ПУТ <sub>ВС</sub> (ССТ)	10	13	0,5	4,0	1,5	2,5	1,0	5,0	80,5	75,5
ПГУ <sub>НС</sub> (ССТ)	25	25	0,5	5,0	2,5	7,5	1,0	1,0	58,5	48,5

В табл.2,3 приведены основные расчетные показатели и параметры процессов для ДП № 5 «ССТ» и ДП № 9 «АМКР» соответственно, а на рис. 1–2 – соответствующие результаты в графической форме.

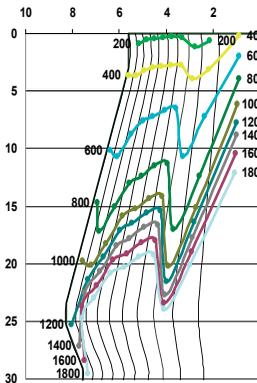
Величина сокращения расхода кокса (Δк, кг/т чугу.) при вдувании ПУТ и ПГУ взамен ПГ определялась не только содержанием углерода и золы в углях (табл.1), но также изменением в ДП количества шлака (ΔШ, кг/т чугу.), сырого известняка (ΔИ, кг/т чугу.), температуры колошникового газа (Δt<sub>к</sub>, град), степени восстановления (Δг, %) и потерь теплоты (Δq<sub>», % отн.). Указанные величины, а также полученный эквивалент замещения кокса углем (Э<sub>», кг/кг), составили:</sub></sub>

ССТ ДП-5	ПУТ <sub>BC250</sub>	ПУТ <sub>HC400</sub>	ПГУ <sub>HC400</sub>	ПГУ <sub>HC400O</sub>	ПГУ <sub>HC450</sub>	ПГУ <sub>HC450O</sub>
ПГУ, м <sup>3</sup> /т	-	-	1389	1546	1563	1739
Δк, кг/т	-188	-187	-160	-148	-177	-138
ΔШ, кг/т	+23	+121	+124	+125	+140	+140
ΔИ, кг/т	+5	+75	+78	+79	+89	+90
Δt <sub>к</sub> , град	-58	-15	-24	+35	-24	-13
Δг, %	+6,9	-2,5	-3,8	-19,0	-3,8	-7,4
Δq <sub>з</sub> , %	-1,6	-1,1	+5,9	-2,0	+9,0	+7,3
Э <sub>з</sub> , кг/кг	1,108	0,693	0,625	0,595	0,593	0,507

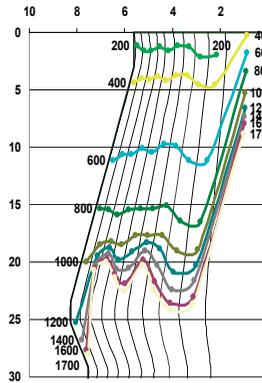
АМКР ДП-9	ПУТ <sub>BC250</sub>	ПУТ <sub>HC400</sub>	ПГУ <sub>HC400</sub>	ПГУ <sub>HC400O</sub>	ПГУ <sub>HC450</sub>
ПГУ, м <sup>3</sup> /т	-	-	1282	1282	1443
Δк, кг/т	-172	-177	-162	-74	-186
ΔШ, кг/т	+26	+119	+121	+121	+148
ΔИ, кг/т	+8	+90	+95	+95	+108
Δt <sub>к</sub> , град	+31	+1	+25	+25	+33
Δг, %	+2,9	-6,7	-10,1	-10,1	-12,3
Δq <sub>з</sub> , %	-1,6	+1,0	+2,1	+30,5	+30,5
Э <sub>з</sub> , кг/кг	1,09	0,69	0,61	0,39	0,59

## База ССТ

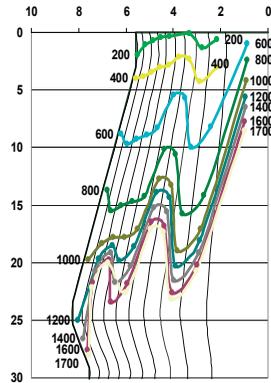
Температура газов : Т, °С

ПУТ<sub>BC250</sub>

Температура газов : Т, °С

ПУТ<sub>HC400</sub>

Температура газов : Т, °С



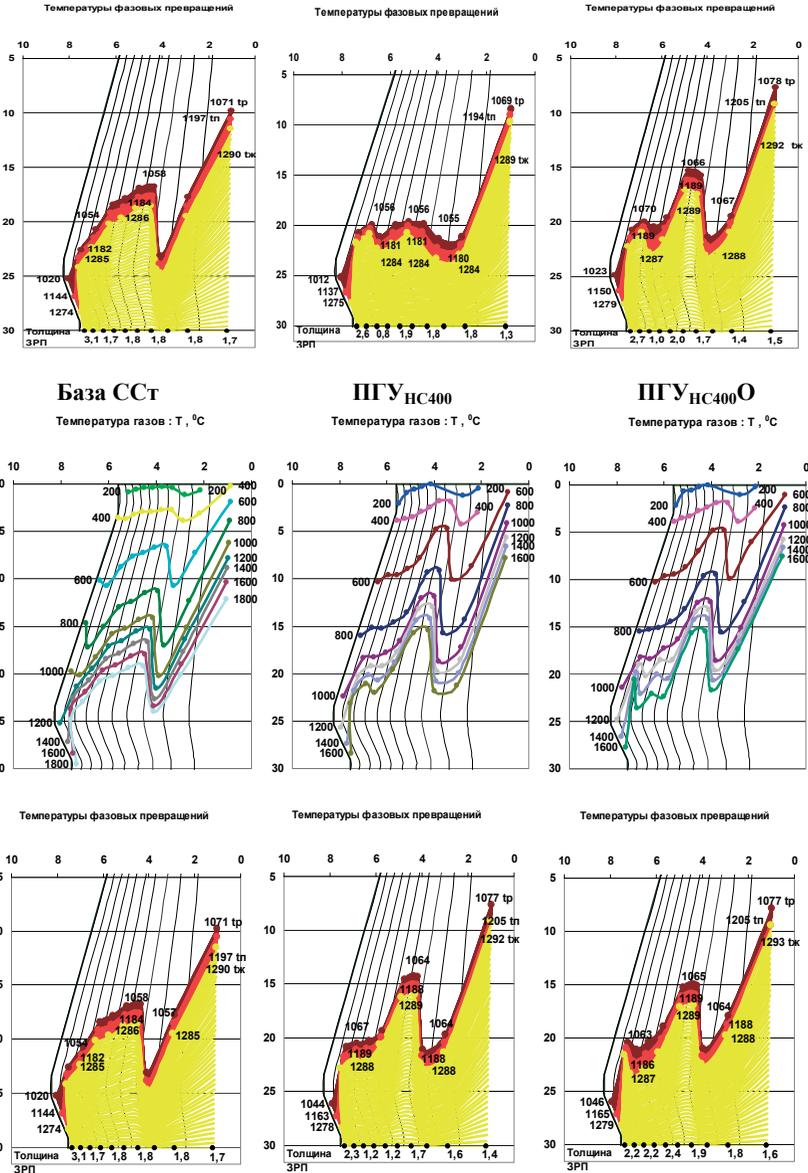
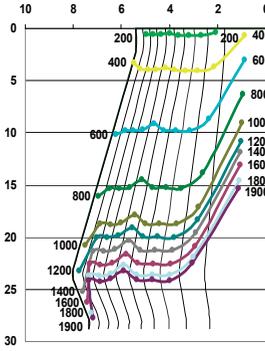


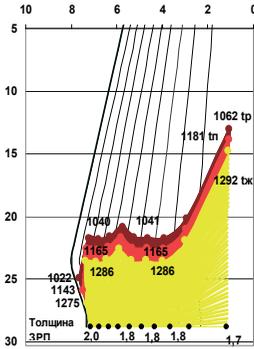
Рис.1. Распределение температур газа и положение зоны размягчения и плавления в объеме ДП-5 ОАО «Северсталь» при разных параметрах плавки. По горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха (технологического нуля), м. Температура начала размягчения –  $t_p$ , плавления -  $t_n$ , жидкофазного течения –  $t_ж$ .

**База АМКР**

Температура газов : T, °C

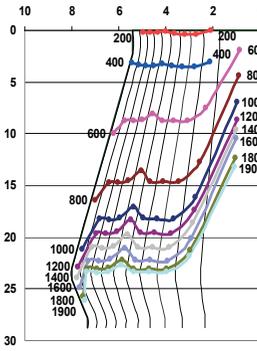


Температуры фазовых превращений

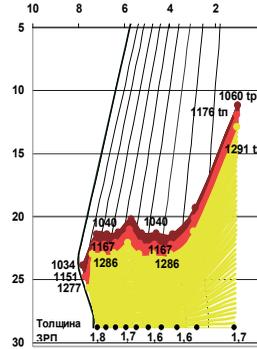


**ПУТ<sub>BC250</sub>**

Температура газов : T, °C

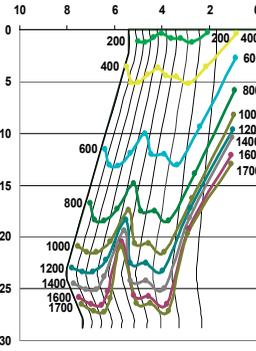


Температуры фазовых превращений

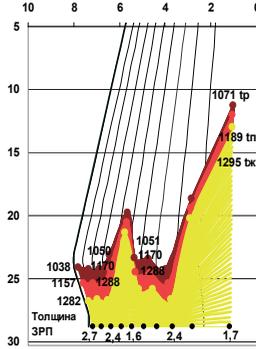


**ПУТ<sub>HC400</sub>**

Температура газов : T, °C

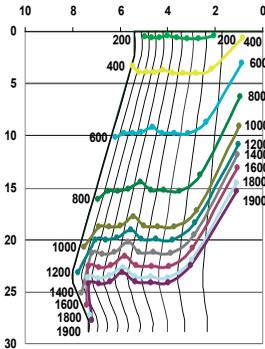


Температуры фазовых превращений



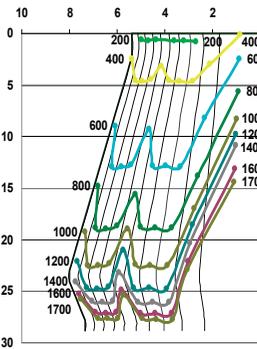
**База АМКР**

Температура газов : T, °C



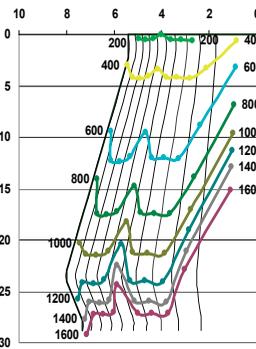
**ПУТ<sub>HC400</sub>**

Температура газов : T, °C



**ПУТ<sub>HC400O</sub>**

Температура газов : T, °C



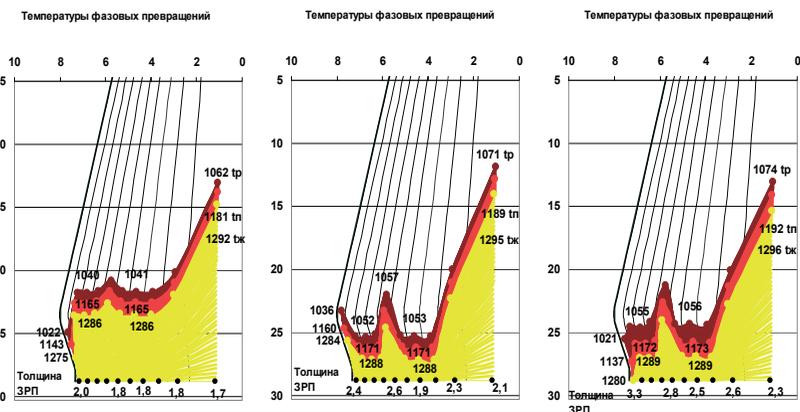


Рис.2. Распределение температур газа и положение зоны размягчения и плавления в объеме ДП-9 ПАО «АМКР» при разных параметрах плавки. По горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха (технологического нуля), м. Температура начала размягчения –  $t_p$ , плавления -  $t_n$ , жидкофазного течения –  $t_{ж}$ .

Из приведенных данных следует, что для получения величины экономии кокса от вдувания 250 кг/т высокосортного ПУТ в случае его замещения низкосортным потребуется увеличить расход до 400 кг/т. Этот вариант является условным, т.к. при вдувании ПУТ из высокосольных углей (особенно в больших количествах) резко сокращается полнота сжигания углерода и ожигения зольной части, что препятствует реализации технологии. Технология может быть реализована при условии предварительной газификации ПУТ с подачей в фурменные очаги ПГУ (см. выше). В этом случае экономия кокса несколько уменьшится за счет дополнительных потерь теплоты при охлаждении ПФГ (вар. ПГУ<sub>НС400</sub>), а при замене горячего дутья неподогретым кислородом экономия сократится дополнительно (вар. ПГУ<sub>НС400</sub>О). Повышение величины экономии кокса возможно при увеличении количества ПГУ (вар. ПГУ<sub>НС450</sub> и ПГУ<sub>НС450</sub>О).

Температурное поле шихты и газового потока в объеме печи, а также расположение ЗРП, изменяются при увеличении расхода ПГУ аналогично изменениям при увеличении ПУТ (рис.1–2) и под влиянием тех же тенденций, что при вдувании природного и коксового газов [1], однако количественно не столь значительно и неоднозначно для разных условий и распределений шихты. При замене ПГ (95 и 106 м<sup>3</sup>/т) на ПГУ (1282–1739 м<sup>3</sup>/т) на обоих ДП имеет место снижение степени прямого восстановления. При этом в ряде вариантов, где её значение сокращается ниже 20%, наблюдается тенденция ускорения роста температуры колошникового газа с увеличением расхода ПГУ. Это соответствует ранее установленной закономерности о трансформации двухступенчатой схемы теплообмена в ДП по мере сокращения внутреннего потребителя теплоты в шихте в области прямого восстановления и диссоциации карбонатов [1].

Таблица 2. Ожидаемые показатели доменной плавки на доменной печи 5500 м<sup>3</sup> при вдувании ПУТ, ПГУ и кислорода (О)

ПОКАЗАТЕЛИ	База	ПУТ		ПГУ		ПГУ	
		BC250	HC400	HC400	HC400 <sup>О</sup>	HC450	HC450 <sup>О</sup>
Произв-ть, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	1,736	1,739	1,533	1,441	1,523	1,373	1,403
Расход кокса, кг/т чугу.	427	239	240	267	279	249	289
Дутье: расход, м <sup>3</sup> /мин.	7853	6892	6710	2177	879	1719	715
температура, град.	1184	1184	1184	1184	20	1184	20
кислород, %	24,3	24,3	24,3	24,3	90	24,3	90
Расход ПГ, м <sup>3</sup> /т	106	0	0	0	0	0	0
Расх.вдуваем. угля, кг/т	0	250	400	400	400	450	450
Кол. газ: темп-ра, °С	263	205	248	239	298	239	250
содержание, % CO	21,7	21,2	22,9	22,5	22,5	23,1	25,3
CO <sub>2</sub>	19,1	22,8	19,6	18,1	21,8	17,1	17,8
H <sub>2</sub>	7,5	4,3	7,8	7,3	7,1	8,0	8,2
Изв./конв. шлак, кг/т	3/5	8/5	78/5	81/5	82/5	92/5	93/5
Агл.+Окат.+Руда, кг/т	1585	1581	1565	1566	1565	1563	1563
В шлаке*, %: кремнезем	36,61	34,66	35,37	35,52	35,64	35,61	35,61
глинозем	8,42	8,00	9,76	9,86	9,92	10,07	10,07
известь	38,42	36,37	37,12	37,28	37,40	37,37	37,37
магнезия	11,56	10,73	8,86	8,84	8,84	8,62	8,62
Кол-во шлака, кг/т	270	293	391	393	394	410	410
Объем влажного газа	1857	1603	1883	2075	1965	2171	2176
Расход кисл-да (расч.), м <sup>3</sup> /т	58	51	56	19	147	16	130
Теор. темп-ра горения, °С	2007	2139	1942	1836	1876	1784	1804
Кол-во фурмен. газа, м <sup>3</sup> /т	1713	1443	1735	1929	1875	2022	2039
Кол-во сух. кол. газа, м <sup>3</sup> /т	1737	1527	1763	1958	1836	2048	2056
г <sub>в</sub> , %	26,2	33,0	23,7	22,4	7,2	22,4	18,8
Использ. СО+Н <sub>2</sub> , %	46,8	51,9	46,0	44,5	49,1	42,3	41,1
Приход теплоты, кДж/кг	4524	4483	4804	4971	4845	5093	5098
Потребн. теплоты, кДж/кг	3178	3422	3524	3342	2963	3383	3286
Потери теплоты, кДж/кг	558	549	552	591	547	608	599
Wш/Wг	0,776	0,845	0,745	0,750	0,771	0,712	0,749
Теплов. кол. газа, кДж/м <sup>3</sup>	3551	3147	3740	3628	3611	3795	4092
Интенсив.: по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	2,238	1,935	2,004	2,076	2,078	2,069	2,12
по коксу, кг/м <sup>3</sup> сут	726	408	361	377	416	335	397
ПГУ**:							
кол-во, м <sup>3</sup> /т чугу.				1389	1546	1563	1739
температура, °С				1708	1635	1708	1635
содержание СО+Н <sub>2</sub> , %				45,5	40,7	45,3	40,7
Дутье ПГУ* <sup>0</sup> (1184°С), м <sup>3</sup> /т чугу.				943	1098	1061	1235
Эквивалент замещ-я кокса,	кг/кг	1,108	0,693	0,625	0,595	0,593	0,507

\*Во всех вариантах, %: [Si]-0,65, [Mn]-0,4, [S]-0,016 и осн. 1,05.

\*\*При заданном отношении О/С = 0,6 моль/моль

Таблица 3. Ожидаемые показатели доменной плавки на доменной печи 5000 м<sup>3</sup> ПАО «АМКР» при вдувании ПУТ, ПГУ и кислорода (О)

ПОКАЗАТЕЛИ	База	ПУТ BC250	ПУТ HC400	ПГУ HC400	ПГУ HC400-О	ПГУ HC450
Удельн. произ-сть, т/м <sup>3</sup> сут	1,35	1,36	1,24	1,15	1,17	1,11
Расход Кокс/Антрацит, кг/т	469 / 25	287 / 15	282 / 15	315 / 16	398 / 21	293 / 15
Дутье: расход, м <sup>3</sup> /мин.	5644	5281	5114	2196	987	1879
температура, град.	1100	1100	1100	1100	20	1100
кислород, %	27	27	27	27	90	27
ПГ, м <sup>3</sup> /т	95	0	0	0	0	0
Расход вдуваем. угля, кг/т	0	250	400	400	400	450
Кол. газ: температура, °С	240	271	241	265	265	273
содержание, % CO	26,2	25,8	26,5	25,8	31,8	25,8
CO <sub>2</sub>	17,7	20,5	18,5	17,3	17,7	16,8
H <sub>2</sub>	7,6	4,8	8,2	7,6	8,3	8,3
Агл.+Окаг.+Руда, кг/т	1630	1631	1612	1611	1611	1608
Конв. шл. обог./Известняк	119 / 21	119 / 29	118 / 111	118 / 116	118 / 116	117 / 129
В шлаке*, %: кремнезем	38,3	37,0	36,7	36,9	36,9	36,7
глинозем	6,5	6,2	7,6	7,8	7,8	7,9
известь	46,7	45,1	44,7	45,0	45,0	44,8
магнезия	4,9	4,7	4,2	4,2	4,2	4,1
Количество шлака, кг/т	438	464	567	569	569	586
Расход дутья, м <sup>3</sup> /т	1196	1110	1183	546	241	484
Объем влажного газа, м <sup>3</sup> /т	1917	1737	1976	2185	2187	2264
Расход O <sub>2</sub> (расч.), м <sup>3</sup> /т	106	99	105	49	240	43
Теор. темп-ра горения, °С	2122	2227	2023	1930	2020	1877
Кол-во фурмен. газа, м <sup>3</sup> /т	1734	1562	1810	2025	2022	2111
Кол-во сух. кол. газа, м <sup>3</sup> /т	1806	1662	1861	2069	2081	2141
г <sub>д</sub> , %	30,2	33,2	23,6	20,2	20,2	18,0
Степень использ. CO+H <sub>2</sub> , %	40,3	44,2	41,0	40,0	35,6	39,2
Приход теплоты, кДж/кг	4877	5020	5205	5464	5569	5564
Потребн. теплоты, кДж/кг	3751	3904	4073	3795	3801	3789
Потери теплоты, кДж/кг	380	374	384	488	496	497
Отношение водяных чисел	0,802	0,832	0,757	0,807	0,854	0,772
Теплотвор. кол. газа, кДж/м <sup>3</sup>	4140	3783	4238	4091	4913	4162
Интенсивность по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	1,797	1,641	1,697	1,745	1,776	1,745
то же по коксу, кг/м <sup>3</sup> сут	653	403	359	373	480	335
ПГУ*: кол-во, м <sup>3</sup> /т чугу.				1282	1282	1443
температура, °С				1706	1568	1706
содержание: CO + H <sub>2</sub> , %				48,6	48,8	48,6
Эквивалент замены кокса, кг/кг		1,09	0,69	0,61	0,39	0,59

\*Во всех вариантах, %: [Si]-0,81, Mn-0,48, S-0,022 и осн. шлака 1,22.

\*\*При заданном отношении O/C = 0,6 моль/моль.

Удельные тепловые потери изменяются под влиянием некоторого уменьшения температур газов в нижней части ДП при значительном сокращении производительности агрегата. В результате в основных вариантах они увеличиваются. Указанные результаты характерны для обеих ДП применительно к технологии с подачей части горячего дутья из коллектора в ПФГ для газификации ПУТ, а другой части – в фурменные очаги для сжигания кокса.

Несколько отличаются результаты для случая замены горячего дутья не подогретым кислородом, предложенного с целью применения более компактной конструкции прифурменных устройств. В этом случае для ДП-5 «ССт» при низком исходном и прогнозируемом расходе углерода кокса у фурм потребность кислорода дутья на его сжигание мала, что приводит при выводе нагретого дутья к небольшому увеличению расхода кокса, которое может быть приемлемым при одновременном увеличении производительности ДП. Для условий же ДП-9 «АМКР» при более высоком исходном и прогнозируемом расходе углерода кокса у фурм потребность кислорода дутья на его сжигание достаточно велика, что приводит при выводе нагретого дутья к увеличению расхода кокса, соизмеримому с экономией от вдувания ПГУ, а также к деформации процессов с нарушением их устойчивости.

Путем корректировки полученной в каждом варианте величины экономии кокса на коксовый эквивалент выведенного из ДП природного газа и деления на расход газифицируемого угля установили эквивалент замещения им кокса (кг/кг). Как следует из приведенных выше результатов, значения  $\Xi$ , соответствующих вариантов двух ДП близки, исключая вариант технологии с заменой горячего дутья не подогретым кислородом, особенности которого рассмотрены выше. Отношение эквивалентов замещения кокса углями принятого состава – низкосортным (в виде ПГУ) и высокосортным (в виде ПУТ) составляет 0,56 – при расходе первого 400 кг/т и 0,54 – при расходе его 450 кг/т. Указанное отношение может быть использовано при оценке допустимой стоимости низкосортных углей относительно замещаемых высокосортных. При этом следует учесть возможность ввода дополнительного известняка для офлюсования золы в состав агломерата, что приведет к повышению эффективности технологии и увеличению указанного отношения по меньшей мере до 0,65 при отношении содержания нелетучего углерода 0,64 (табл.1).

Возможности сокращения расхода кокса на заданную величину определяются на основе выбора рациональных параметров технологии доменной плавки, к числу которых при вдувании ПГУ из низкосортных углей относятся:

- величина температуры дутья и содержания в нем кислорода, а также способ подачи дутья и кислорода на газификацию кокса у фурм ДП и угля в ПФГ;

- величина мольного расхода кислорода на газификацию углерода газифицируемого угля, вычисляемая как отношение  $O/C$ , моль/моль;
- способ ввода дополнительного флюса в шихту в связи с возрастанием его расхода при использовании высокозольных углей.

Для оценки этих возможностей выполнены дополнительные варианты расчетов, результаты которых (табл.4–6) включают вариации значения  $O/C=0,4÷0,7$  моль/моль, а также условия, обеспечивающие минимизацию расхода кокса.

Таблица 4. Расчетные показатели и параметры плавки на ДП-5 ОАО «ССТ» при вдувании горячего дутья и получаемых при разных значениях  $O/C$  продуктов газификации углей (ПГУ) с минимизацией расхода кокса ( $K_{мин} \Phi_{PH}$  и  $K_{мин} P_{PH}$ ).

Показатели	$O/C=0,4$	$O/C=0,5$	$O/C=0,6$	$O/C=0,7$	$K_{мин} \Phi_{PH}$	$K_{мин} P_{PH}$
Удельн. произв-ть, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	1,501	1,482	1,399	1,359	1,556	1,651
Расход кокса, кг/т чугу.	267	269	280	303	241	212
Дутье: расход, м <sup>3</sup> /мин	3522	2613	2048	1560	2200	1686
температура, °С	1184	1184	1184	1184	1300	1300
содержание кислорода, %	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3
Расход тех. кислорода, м <sup>3</sup> /т	30,2	22,7	18,8	14,8	18,2	13,1
Расход угля, м <sup>3</sup> /т	400	400	400	400	400	400
Колошн. газ: тем-ра, °С	247	248	247	235	249	123
содержание, %: CO	23,3	23,4	22,2	22,8	22,9	22,5
CO <sub>2</sub>	18,8	18,7	17,7	17,0	18,9	19,8
H <sub>2</sub>	7,5	7,5	7,1	7,0	7,9	8,1
Известняк, кг/т	81	80	82	84	4	0
Агл.+Окатыши+Руда, кг/т	1566	1566	1565	1565	1608	1609
Рудная нагрузка, т/т	6,2	6,1	5,9	5,5	6,7	7,6
В шлаке, %: кремнезем	35,6	35,5	35,6	35,8	35,4	35,1
глинозем	9,9	9,8	9,9	10,0	9,7	9,6
известь	37,3	37,2	37,4	37,6	37,1	36,8
магnezия	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
Количество шлака, кг/т	394	393	394	395	392	390
Расход дутья, м <sup>3</sup> /т	614	461	383	301	370	267
Объем влажного газа, м <sup>3</sup> /т	2002	2008	2154	2256	1874	1746
Теор. тем-ра горения, °С	1810	1874	1838	1824	1901	1843
Количество фурм. газа, м <sup>3</sup> /т	1856	1860	2014	2112	1745	1615
Кол-во сух. колошн. газа, м <sup>3</sup> /т	1885	1892	2037	2142	1756	1625
$\gamma_{с}$ , %	22,5	22,9	20,5	20,9	25,3	26,8
Использование CO+H <sub>2</sub> , %	44,5	44,2	44,2	42,6	45,2	46,9
Общ.приход теплоты, кДж/кг	4695	4898	5175	5350	4712	4258
Потребн. теплоты, кДж/кг	3287	3317	3318	3386	3177	3201
Энтальпия колошн. газа, кДж/кг	908	1013	1138	1184	959	443
Потери теплоты, кДж/кг	499	568	718	780	575	614
Отношение водяных чисел	0,765	0,764	0,744	0,730	0,776	0,783
Теплов. колошн. газа, кДж/м <sup>3</sup>	3765	3782	3577	3636	3750	3721

Интенсивность:						
по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	2,09	2,07	2,09	2,13	2,03	2,00
по коксу, кг/м <sup>3</sup> ·сут.	393	391	383	403	367	343
ПГУ: количество, м <sup>3</sup> /т чугу.	1078	1277	1451	1576	1277	1277
температура, °С	1411	1561	1777	2027	1624	1624
содержание СО+Н <sub>2</sub> , %	55,1	52,8	40,3	32,2	52,8	52,8
Дутье для газиф. угля, м <sup>3</sup> /т чугу.	629	786	1031	1196	786	786

Таблица 5. Расчетные показатели и параметры плавки на ДП-5 ОАО «ССТ» при вдувании неподогретого кислорода и получаемых при разных значениях О/С продуктов газификации углей с минимизацией расхода кокса ( $K_{\min \Phi_{PH}}$  и  $K_{\min P_{PH}}$ ).

Показатели	О/С=0,4	О/С=0,5	О/С=0,6	О/С=0,7	$K_{\min \Phi_{PH}}$	$K_{\min P_{PH}}$
Удельн. производ-ть, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	1,7	1,6	1,43	1,36	1,65	1,71
Расход кокса кг/т чугу.	328	317	351	375	271	216
Дутье: расход, м <sup>3</sup> /мин	1476	1071	934	785	865	574
температура, °С	100	100	100	100	100	100
содержание кислорода, %	90	90	90	90	90	90
Расход тех. кислорода, м <sup>3</sup> /т	221	170	166	147	133	85
Расход угля, м <sup>3</sup> /т	400	400	400	400	400	400
Колошн. газ: тем-ра, °С	256	244	258	239	242	130
содержание, %: СО	31,5	28,5	26,8	26,0	26,0	22,7
СО <sub>2</sub>	22,6	20,8	18,1	16,8	20,9	21,6
Н <sub>2</sub>	9,0	8,3	7,5	7,1	8,4	8,2
Известняк, кг/т	87	83	87	91	6	0
Аглом.+Окат.+Руда, кг/т	1565	1565	1565	1564	1609	1610
Железо в шихте, %	57,9	58,0	57,9	57,9	58,0	58,2
Рудная нагрузка, т/т	5,1	5,2	4,7	4,4	6,0	7,5
В шлаке, %: кремнезем	36,0	35,7	36,0	36,4	35,7	35,2
глинозем	10,1	10,0	10,1	10,3	9,9	9,6
известь	37,8	37,5	37,8	38,2	37,5	36,9
магнезия	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
Количество шлака, кг/т	397	395	397	399	394	390
Расход дутья, м <sup>3</sup> /т	228	175	171	152	137	88
Объем влажного газа, м <sup>3</sup> /т	1762	1885	2180	2375	1786	1687
Теор. тем-ра горения, °С	2087	1990	1884	1785	1961	1840
Кол-во фурменного газа, м <sup>3</sup> /т	1621	1745	2037	2233	1671	1576
Кол-во сух. колошн. газа, м <sup>3</sup> /т	1653	1774	2072	2269	1669	1561
$\gamma_d$ , %	19,7	20,0	19,8	18,8	21,0	21,5
Использование СО+Н <sub>2</sub> , %	41,6	42,1	40,1	39,0	44,6	48,8
Общ. приход теплоты, кДж/кг	4653	4787	5235	5371	4578	4111
Потребность теплоты, кДж/кг	3218	3250	3316	3358	3084	3070
Энтальпия колошн. газа, кДж/кг	958	1018	1250	1269	958	484
Потери теплоты, кДж/кг	476	520	670	744	536	557
Отношение водяных чисел	0,828	0,8	0,772	0,707	0,802	0,781

Теплов. колошн. газа, кДж/м <sup>3</sup>	4957	4508	4210	4059	4191	3755
Интенсивн.: по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	2,08	2,09	2,17	2,23	2,05	2,01
по коксу, кг/м <sup>3</sup> ·сут.	545	497	493	498	438	362
ПГУ: количество, м <sup>3</sup> /т чугу.	1183	1408	1631	1785	1408	1408
температура, °С	1376	1509	1687	1897	1576	1576
содержание СО+Н <sub>2</sub> , %	50,3	47,9	35,8	28,4	47,9	47,9
Дутье для газиф. угля, м <sup>3</sup> /т чугу.	732	915	1213	1407	915	915

Таблица 6. Расчетные показатели и параметры плавки на ДП-9 ПАО «АМКР» при вдувании горячего дутья и получаемых при разных значениях О/С продуктов газификации углей с минимизацией расхода кокса ( $K_{\text{мин}P_{\text{PH}}}$ ).

Показатели	О/С=0,4	О/С=0,5	О/С=0,6	$K_{\text{мин}P_{\text{PH}}}$
Удельная производим-ть, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	1,191	1,183	1,095	1,386
Расход твёрдого топлива, кг/т чугу.	331	331	360	234
Дутье: расход, м <sup>3</sup> /мин	3045	2441	2229	1616
температура, °С	1100	1100	1100	1300
содержание кислорода, %	27	27	27	27
Расход тех. кислорода, м <sup>3</sup> /т	65	53	52	30
Расход угля, м <sup>3</sup> /т	400	400	400	400
Колошниковый газ: тем-ра, °С	270	267	320	166
содержание, %: СО	26,9	26,9	25,9	24,3
СО <sub>2</sub>	17,7	17,7	16,8	20,0
Н <sub>2</sub>	7,9	7,9	7,4	8,6
Известняк + конвер. шлак обогащ., кг/т	116 + 118	115 + 118	119 + 118	2 + 122
Агломерат + Окатыши + Руда, кг/т	1611	1611	1609	1672
Рудная нагрузка, т/т	5,6	5,6	5,1	7,7
В шлаке, %: кремнезем	36,9	36,8	37,0	36,4
глинозем	7,8	7,8	7,9	7,6
известь	45,0	44,9	45,1	44,4
магнезия	4,2	4,2	4,2	4,2
Количество шлака, кг/т	569	569	571	566
Расход дутья, м <sup>3</sup> /т	732	590	583	334
Объем влажного газа, м <sup>3</sup> /т	2115	2113	2314	1738
Теорет. температура горения, °С	1920	1966	1944	1954
Количество фурменного газа, м <sup>3</sup> /т	1949	1948	2159	1616
Кол-во сух. колошн. газа, м <sup>3</sup> /т	2001	2000	2198	1616
Прямое восстанов. оксида Fe, %	21,8	21,9	17,6	22,8
Использование СО+Н <sub>2</sub> , %	39,5	39,5	39,2	45,2
Общий приход теплоты, кДж/кг	5225	5365	5832	4541
Потребность теплоты, кДж/кг	3799	3818	3788	3528
Энтальпия колошн. газа, кДж/кг	1038	1119	1537	585
Потери теплоты, кДж/кг	389	427	506	427
Отношение водяных чисел	0,786	0,784	0,768	0,825
Теплотворн. колошн. газа, кДж/м <sup>3</sup>	4259	4262	4071	3993
Интенсивность: по газу, м <sup>3</sup> /(м <sup>3</sup> ·мин)	1,75	1,74	1,76	1,67

по коксу, кг/м <sup>3</sup> ·сут.	386	383	386	317
ПГУ: количество, м <sup>3</sup> /т чугу.	1006	1186	1331	1186
температура, °С	1391	1550	1788	1653
содержание СО+Н <sub>2</sub> , %	58,6	56,3	43,6	56,3
Дутье для газификации угля, м <sup>3</sup> /т чугу.	559	699	912	699

При заданном для всех вариантов расходе угля на получение вдуваемых в доменную печь ПГУ 400 кг/т чугуна объем вдуваемых ПГУ по мере увеличения значения О/С от 0,4 до 0,7 увеличивается от 1006–1182 до 1331–1785 м<sup>3</sup>/т чугуна при повышении их температуры от 1376–1411°С до 1788–2027°С и уменьшении доли восстановительных компонентов в них от 50,3–58,6% до 28,4–43,6%. При этом величина теоретической температуры горения несколько снижается, а степень прямого восстановления изменяются незначительно.

Изменение расхода кокса по мере увеличения значения О/С определяется следующими факторами:

- существенное увеличение удельных потерь теплоты, обусловленное сокращением производительности агрегата во всех вариантах;

- уменьшение теплоотдачи ПГУ в печи за счет возрастания доли азота, вносящего теплоту нагрева дутья, меньшую, чем теплота горения у фурм, и уносящего из печи через колошник такое же количество теплоты, как восстановительные компоненты (в расчете на единицу); расчетная величина теплоотдачи для рассматриваемых вариантов составляет (кДж/кг угля):

Вариант технологии	О/С = 0,5	О/С = 0,6	О/С = 0,7
ДП-5«ССТ» (ГД)	4830	4405	3854
ДП-5«ССТ» (ХК)	5091	4714	4250
ДП-9«АМКР» (ГД)	4539	3731	

- в варианте с заменой горячего дутья для газификации кокса не подогретым кислородом (табл.5) по мере увеличения О/С происходит сокращение расхода не подогретого кислорода на газификацию кокса от 221 до 147 м<sup>3</sup>/т чугуна, что способствует сокращению расхода кокса.

Первые два фактора способствуют увеличению расхода кокса, третий – его сокращению в варианте использования не подогретого кислорода вместо горячего дутья (табл.5).

Как следует из результатов расчета (табл. 4–6), во всех вариантах технологии по мере увеличения значения О/С от 0,5 до 0,7 расход кокса увеличивается. Поэтому стремление увеличить полноту газификации угля путем увеличения избытка окислителя следует ограничить значением указанной величины  $\leq 0,5$ .

Варианты с минимизацией расхода кокса ( $K_{\min}$ ) сформированы при условии увеличения температуры дутья до 1300°С и подачи дополнительного флюса (на офлюсование золы низкосортного угля) в состав агломе-

рациональной шихты при фактическом и равномерном в промежуточных радиальных зонах распределении рудных нагрузок ( $K_{\min} \Phi_{PH}$  и  $K_{\min} P_{PH}$ ). Значение  $O/C$  принято 0,5 для всех вариантов технологии с минимизацией расхода кокса.

Результаты расчета показали принципиальную возможность достижения при использовании предлагаемой технологии минимального расхода кокса, близкого к соответствующим значениям при вдувании ПУТ из высокосортных углей (200 кг/т) [2,3]. На рис.3–4 иллюстрируются расчетные характеристики процессов плавки при новой технологии.

Во всех вариантах технологии увеличение значения  $O/C$  от 0,5 до 0,7 способствует сдвигу изотерм газа вниз с уменьшением высоты нижней ступени теплообмена при вырожденном теплообмене во всех промежуточных радиальных зонах верхней ступени теплообмена и незначительном изменении положения зоны размягчения и плавления (ЗРП) (рис.3).

Возможность достижения минимального расхода кокса реализуется за счет уменьшения теплопотребности (вывод сырого флюса из доменной шихты), увеличения температуры дутья до  $1300^{\circ}C$  и равномерного распределения рудной нагрузки в промежуточных радиальных зонах при повышенных требованиях, как и в [1–3], к металлургическим свойствам кокса и железорудного сырья. Влияние указанных изменений на температурно–концентрационное поле печного пространства выразилось аналогично результатам, показанным на рис.3, в сдвиге изотерм газа вниз с уменьшением высоты нижней ступени теплообмена при вырожденном теплообмене во всех промежуточных радиальных зонах верхней ступени теплообмена и сдвиге большинства элементов ЗРП вниз (рис.4).

**Заключение.** Выполненное с помощью разработанной в ИЧМ НАН Украины многозонной математической модели аналитическое исследование процессов доменной плавки при вдувании продуктов газификации углей показало, что при использовании продуктов газификации углей температурно–концентрационные и фазовые поля шихты и газового потока изменяются так же, как и в случае вдувания пылеугольного топлива.

Возможность значительного увеличения количества вдуваемых углей в случае их предварительной газификации с ожигением золы в прифурменных газификаторах позволяет в случае замены высокосортных углей (в виде ПУТ) низкосортными (в виде ПГУ) получить целевую величину экономии кокса. При этом за счет выбора рациональных параметров плавки возможно сокращение расхода кокса до минимального значения, близкого к 200 кг/т. Дополнительными параметрами минимизации расхода кокса являются ввод дополнительного флюса в агломерат, увеличение температуры дутья до  $1300^{\circ}C$  и равномерное распределение рудной нагрузки в промежуточных радиальных зонах колошника. Показано также, что возможная замена горячего дутья неподогретым кислородом может быть приемлема в случае низкого исходного и прогнозируемого удельного расхода кокса и дутья.

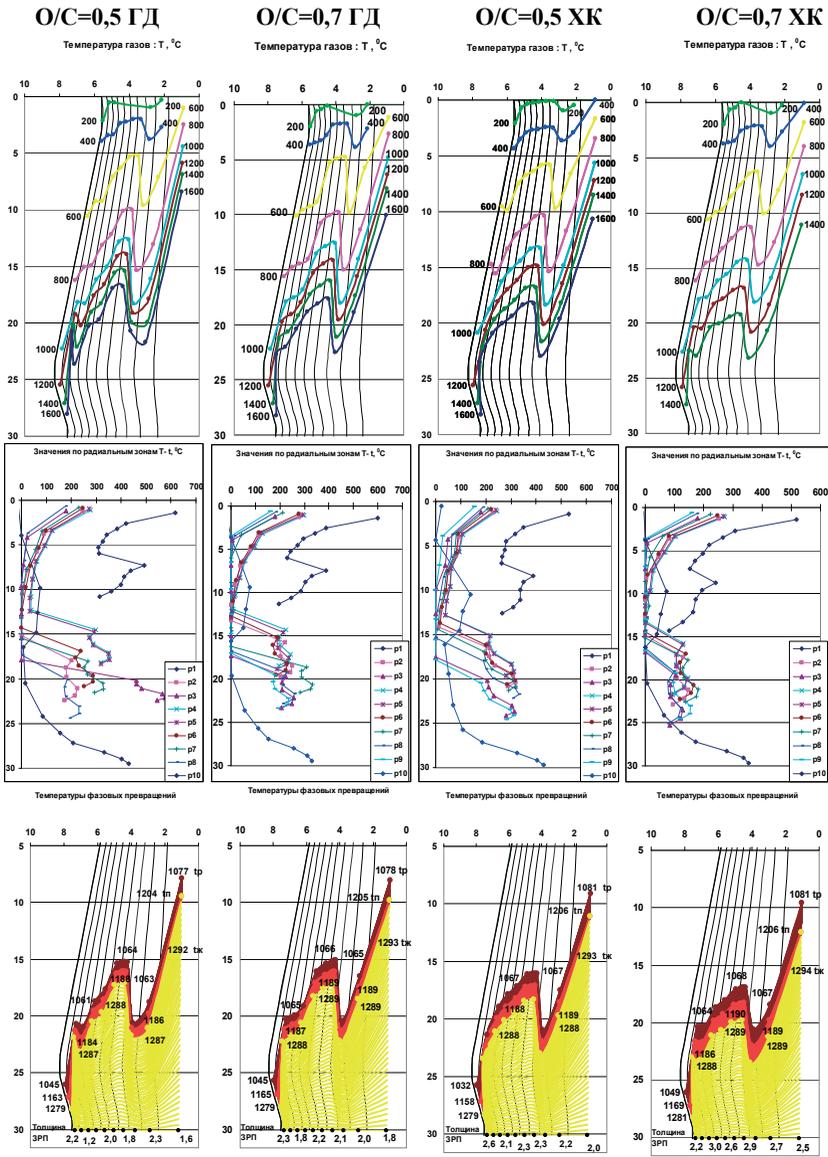


Рис. 3. Изолинии температуры газа (Т), разности температур газа и шихты (Т-т), а также параметров зоны размягчения и плавления (ЗРП) в рабочем пространстве ДП при вдувании горячего дутья (ГД) или неподогретого кислорода (ХК) совместно с получаемыми при разных значениях О/С продуктами газификации углей. По горизонтали – расстояние от оси ДП, по вертикали – расстояние от «технологического нуля», м.

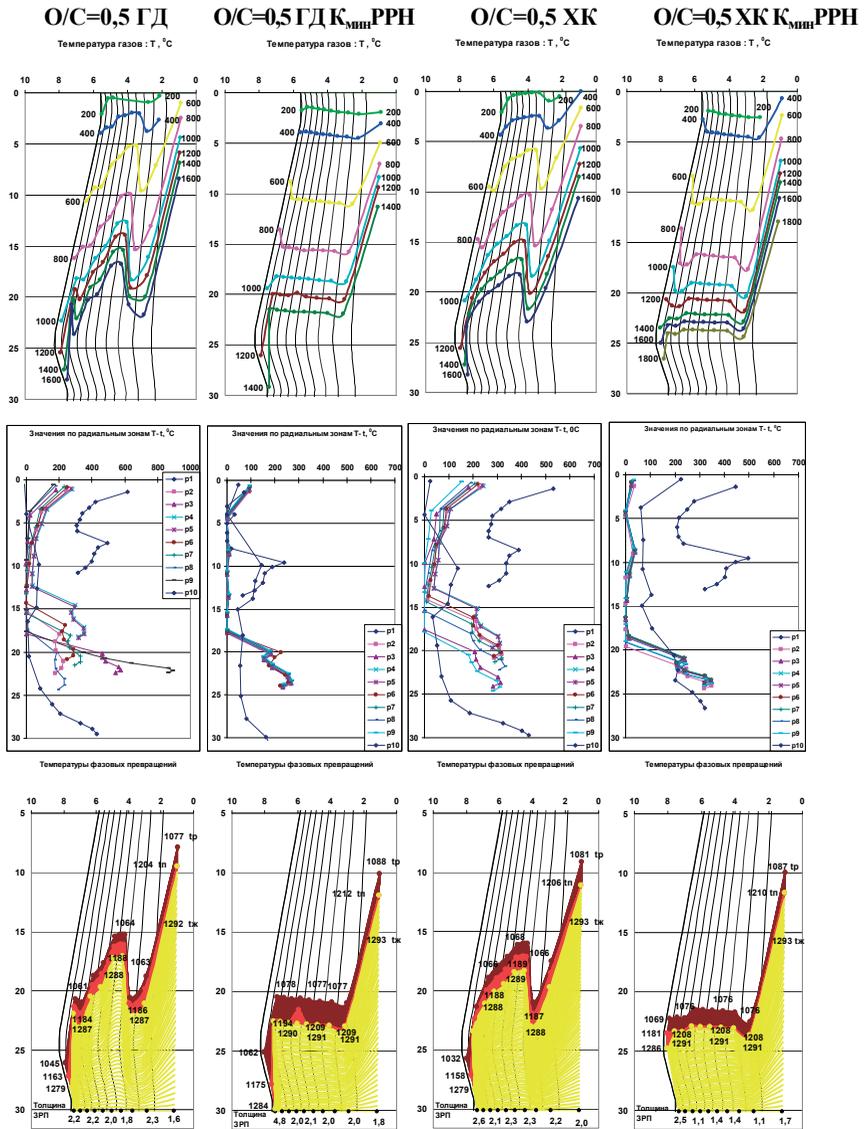


Рис.4. Изолинии температуры газа (Т), разности температур газа и шихты (Т-*t*), а также параметров зоны размягчения и плавления в рабочем пространстве ДП при вдувании горячего дутья (ГД) или неподогретого кислорода (ХК) совместно с получаемыми при заданных значениях О/С продуктами газификации углей с мини-мизацией расхода кокса (К<sub>мин</sub> РРН). По горизонтали – расстояние от оси ДП, по вертикали – расстояние от «технологического нуля», м.

Установлено також, що збільшення витрати кисню для газифікації вдуваного вугілля при відношенні  $O/C > 0,5$  моль/моль сприяє збільшенню витрати коксу в усіх варіантах технології за рахунок зростання втрат теплоти, обумовленої скороченням продуктивності ДП, а також за рахунок зменшення теплової потужності ПГУ, обумовленої зростанням частки азоту. При цьому в об'ємі ДП відбувається зміщення ізотерм вниз з зменшенням висоти нижньої ступені теплообміну. Аналогічні зміни температурного поля ДП спостерігаються в режимах з мінімізацією витрати коксу.

1. *Товаровський І.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е.* Аналітичне дослідження процесів доменної плавки. Монографія. – Дніпропетровськ: «Економіка», 2011. – 206 с.
2. *Товаровський І.Г.* Доменна плавка. Монографія. 2-е видання. – Дніпропетровськ: вид. «Пороги», 2009. – 768 с.
3. *Товаровський І.Г.* Процеси доменної плавки. Монографія. Том 1. Аналіз стану. -595 с. Том 2. Проблеми та перспективи. -406 с. // Видавничий дім LAP LAMBERT Academic Publishing. - 2012. Мова російська.

*Стаття рекомендована до друку  
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

### ***І.Г.Товаровський, О.Є.Меркулов***

#### **Аналіз процесів нової технології доменної плавки з вдуванням продуктів газифікації вугілля**

З використанням розробленої в ІЧМ НАН України багатозонної математичної моделі виконано аналітичне дослідження доменної плавки при вдуванні продуктів газифікації вугілля. Показано, що при використанні продуктів газифікації вугілля температурно-концентраційні та фазові поля шихти і газового потоку змінюються так само, як і у випадку вдування пиловугільного палива. Можливо значне збільшення кількості вдувати вугілля в разі їх попередньої газифікації.