

УДК 669.162

**Н.М.Можаренко, С.Т.Шулико, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов,
Г.И.Орел, В.С.Листопадов, К.А.Дмитренко**

*Институт черной металлургии НАН Украины
ОАО Криворожский горно-металлургический комбинат «Криворожсталь»

ВЫДУВКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОБЪЕМОМ 5000 м³ НА КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ 1–ГО РАЗРЯДА

Рассмотрены особенности выдувки доменной печи большого объема на капитальный ремонт 1–го разряда после кампании 1989–2003 гг.

Доменная печь №9 объемом 5000 м³ введена в строй 30 декабря 1974 года и является одним из крупнейших агрегатов в мире и самым крупным в Украине. Технологическое обоснование целесообразности ее строительства выполнил ИЧМ, а проект комплекса доменной печи выполнен Гипрометзом и Укгипрометзом в содружестве со специалистами комбината, научных и проектно–конструкторских организаций. Печь была оснащена уникальным на время пуска технологическим оборудованием: конвейерной подачей шихты на колошник, клапанно–конусным загрузочным устройством ВНИИМЕТМАШ–УЗГМ (1974–1980 гг.), а затем двухтрактовым бесконусным устройством с лотковым распределителем шихты фирмы «П.Вюрт» (1980г.), установками придоменной грануляции шлака, воздухонагревателями с выносными камерами горения, системой испарительного охлаждения шахты, четырьмя чугунными летками, автоматизированной системой управления процессом плавки и др.

Разработка технологии плавки и режимов работы оборудования загрузки печи выполнена Институтом черной металлургии (ИЧМ) совместно со специалистами комбината и других организаций. В работе принимали участие: Евтеев В.К., Васюченко П.А., Попов В.Н., Канаев В.В., Богачев Ю.А., Параносенков А.А.

В первую кампанию (1974–1983 гг.) на печи выплавлено 27,070 млн. т чугуна, из них до капитального ремонта в 1980г.–18,040 млн. т. Во вторую кампанию (1983–1989 гг.) произведено 20,142 млн. т чугуна. В 2003г., 14 мая, доменная печь №9 была остановлена на капитальный ремонт 1–разряда. Основной причиной для проведения капремонта явилось неудовлетворительное состояние футеровки и кожуха металлоприемника. За период третьей кампании (06.12.1989г.–14.05.2003г.) на печи выплавлено 31,609 млн. т чугуна.

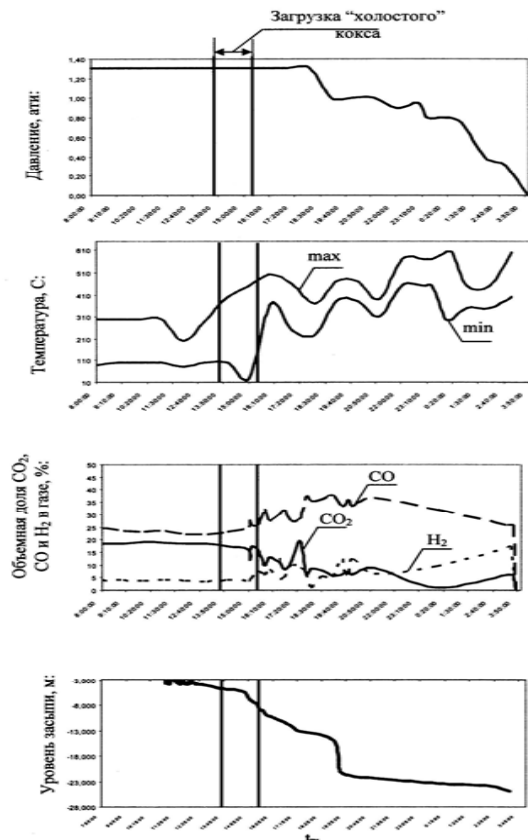
Основными задачами выдувки доменной печи на капитальный ремонт 1–го разряда являются достижение максимально возможной выдачи продуктов плавки при безопасном выполнении всех технологических операций. За основу технологии выдувки доменной печи №9 на капитальный

ремонт 1-го разряда в 2003г. были приняты положения, которые были отработаны на предыдущих капитальных ремонтах 1 и 2-го разрядов. Перед выдувкой загрузка доменной печи характеризовалась следующими параметрами. Состав рабочей подачи: кокс (К) – 29,5т, агломерат НКГО-Ка-2 (А) – 70,0т; окатыши СевГОКа (О) – 30,0 т; известняк доломитизированный (Из.) – 1,5 т. Шихтовые материалы загружались в печь на уровень засыпи – 1,5 м. В программе загрузки использовались 9...1 угловые положения распределительного лотка: КО 3–1, А 9–6, К 8–5, АО 9–4, КО 3–1, К 8–4, АО 7–4, К 8–4, АО 9–4, порция КО→К+12т О. В печь подавалось 8200÷8500 м³/мин дутья, нагретого до 1050÷1100⁰С. Давление дутья составляло 2,80÷2,90 ати, колошникового газа – 1,30 ати. Доля кислорода в дутье достигала 25,0÷25,5% при расходе природного газа 26,0 тыс. м³/ч.

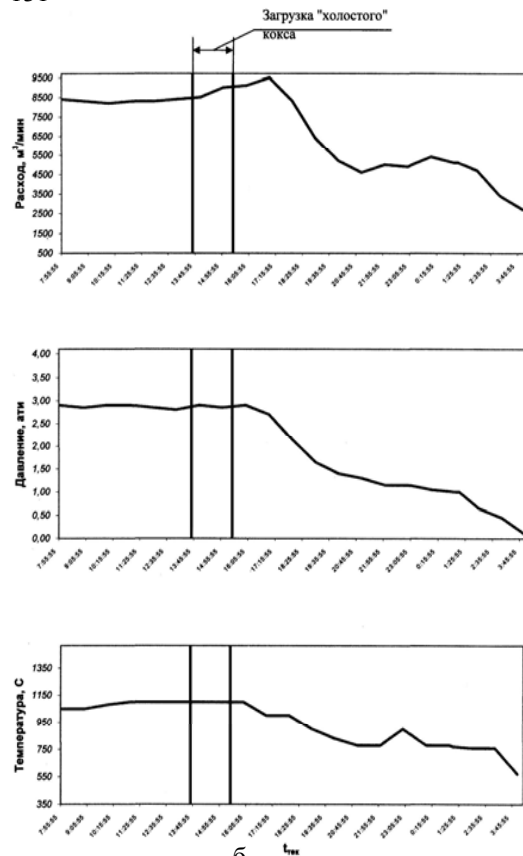
Динамика изменения основных параметров дутьевого режима плавки перед выдувной и в период выдувки печи показана на рис.1,2. Параметры загрузки и дутьевого режима обеспечивали достаточно устойчивое газораспределение по сечению печи, степень использования газа (η_{CO}) составляла 44,5–46,3%. Физический и химический нагрев продуктов плавки был удовлетворительный. Доля кремния в чугуне изменялась в пределах 0,7–1,0%, температура чугуна находилась на уровне 1475÷1485⁰С. Шлаки были подвижные, основность (CaO/SiO₂) колебалась в пределах 1,11÷1,18 ед. Температура газа у стенки и в газоотводах изменялась, соответственно, в пределах 320÷530⁰С и 100÷270⁰С. Таким образом, уровень газодинамических параметров и нагрева продуктов плавки, свидетельствовали о том, что к выдувке печь подошла с устойчивым технологическим состоянием.

Загрузка печи рабочей шихтой была прекращена 13.05.03 в 13ч 40мин. После этого в печь было загружено 260 т кокса «холостыми» порциями. Загрузка «холостого» кокса была прекращена в 15ч 20мин. За время загрузки «холостых» порций кокса уровень засыпи регистрировался электромеханическими уровнемерами и снизился до ≈ 4,0м. Дальнейшее отслеживание изменения уровня засыпи осуществлялось расчетным путем (рис.2) и при помощи радиолокационного датчика РДУ–Х2, который позволяет определять уровень поверхности засыпи. Следует отметить хорошую сходимость результатов определения положения поверхности засыпи столба шихты расчетным и радиолокационным (бесконтактным) способом и возможность использования второго способа при нормальных условиях работы печи. При возникновении подстоев столба шихтовых материалов отслеживание положения поверхности шихты выполнялось только с помощью радиолокационного датчика. Так, в течение выдувки печи, датчиком РДУ–Х2 несколько раз были зафиксированы подстои шихты, а в промежутке времени с 19 ч было отмечено длительное, в течение 15–20 мин., замедление опускания материалов. По ходу выдувки, около 20 ч, датчик достаточно четко зафиксировал обрыв материала (рис.2).

Колошник:



а



б

Рис.1. Динамика изменения параметров работы ДП№9 КГГМК «Криворожсталь» во время выдувки на капремонт 1-го разряда, 13-14 мая 2003г.

Выдувка печи осуществлялась на форсированном режиме. Динамика изменения основных параметров режима выдувки доменной печи №9 и изменения состава колошниковога газа в процессе выдувки показана на рис.1,2 и приведена в табл.1.

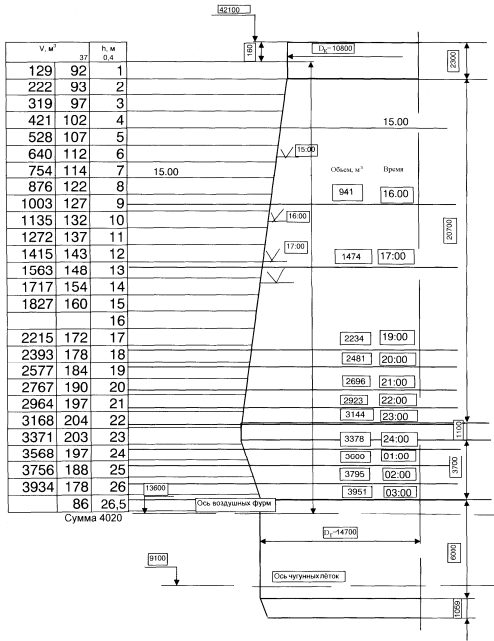


Рис.2 – Динамика выдувки (расчетный метод) доменной печи №9 КГГМК «Криворож-сталь», 13-14мая 2003 г.

С начала выдувки печи и до прекращения подачи природного газа печь работала на рабочих газодинамических параметрах по расходу дутья, кислорода и природного газа. После закрытия природного газа газодинамические параметры (расход дутья, давление дутья и колошниковога газа и др.) поступательно снижались.

В результате доля водорода в колошниковом газе снизилась от 3,5–9,9% до 1,0–7,7%. Это свидетельствовало о том, что при установленном на этом этапе выдувке дутьевом режиме и сниженном до 13 м уровне поверхности засыпи поступление водорода в колошниковый газ происходило только за счет разложения естественной влаги дутья и частично заливаемой через колошник воды.

В дальнейшем, по мере опускания поверхности засыпи и приближения к области высоких температур, содержание водорода в газе постепенно возрастало и, в промежутке от 20ч до 21ч, достигло уровня 14÷18%, что значительно превысило предельную концентрацию водорода по условиям взрывобезопасности. Однако низкий уровень доли кислорода в колошниковом газе (не выше 0,3%) обусловил возможность сохранения темпа выдувки при принятой форсировке печи. Согласно типовой технологической инструкции при выдувке печи предельно допустимые концентрации водорода и кислорода равны, соответственно, 10,0% и 2,0%. Обеспечение устойчивой низкой концентрации кислорода в дутье, как показал анализ особенностей горения углеродистых смесей, обусловлен главным образом выбором газодинамических параметров выдувки [1].

Таблица 1 Режим выдувки и состав колошникового газа ДП№9 на капремонт 1-го разряда, 13-14 мая 2003 г.

Время выдувки	Расход дутья, нм ³ /мин	Давление дутья, кгс/см ²	Температура дутья, град. С	О ₂ в дутье, %	Расход кислорода, м ³ /час	Расход прир. газа, м ³ /час	Давление колошн. газа, кгс/см ²	Перепад, кгс/см ²	Температура колошн. газа, град. С	Расход воды, м ³ /час	Анализ газа, %			
											CO ₂	CO	H ₂	O ₂
13:00	8400	2,86	1100	25	35000	26000	1,30	1,50	100-290		18,5	22,0	3,5	
14:00	8500	2,90	1100	25	35000	26000	1,30	1,60	100-400		17,7	23,5	4,8	
15:00	8000	2,85	1100	25,5	36000	26000	1,30	1,55	100-400	52/	17	25,7	4,3	
											15,6	25,8	7,5	
16:00	8000	2,85	1100	25,5	36000	24000	1,40	1,45	306-470	102/125	12,8	27,4	8,0	0,3
											11	30,1	4,4	
17:00	8200	2,80	1000	25	35000	24000	1,50	1,30	300-470	102/125	10,3	27,9	9,9	
											19,3	28,4	9,0	
18:00	6800	2,10	1000	25	35000		1,00	1,10	300-450	0/125	8,4	35,5	1,0	
											5,5	36,2	7,7	
19:00	4900	1,65	900	25	34000		1,00	0,65	300-370	15/125	5	37,7	5,8	0,5
											6	34,0	7,2	0,8
20:00	3800	1,50	830	25	34000		1,10	0,40	350-450	20/125	6	33,5	12,2	0,5
											6,7	30,0	18,4	0,31
21:00	3300	1,25	780	25	30000		1,00	0,25	300-350	0/75	5,7	32,6	14,4	0,3
											4,2	34,2	7,2	0,3
22:00	3500	1,15	780	25	30000		0,90	0,25	350-450	0/0	4,5	34,5	6,5	0,5
											3,8	33,0	6,6	0,2
23:00	3400	1,20	780	26	36000		1,00	0,20	300-450	13/0	4	34,1	7,4	0,1
											4,1	30,6	9,9	0,6
0:00	3600	1,05	760	25	36000		0,80	0,25	350-500	125/0	4,8	32,4	9,2	0,4
											4,5	30,2	10,0	0,3
1:00	3400	1,00	770	26	36000		0,75	0,25	300-450	125/0	5,5	38,8	11,2	0,4
											5,7	22,8	13,2	0,3
2:00	3000	0,60	760	20			0,40	0,2	350-450	125/0	4,9	23,6	15,6	0,6
											5,5	21,0	19,0	0,5
3:00	2400	0,60		10			0,40	0,2	300-400	0	6,6	23,0	10,2	0,4

Таблица 2 Динамика изменения теоретической температуры горения при выдувке ДП№9 КГ ГМК «Криворожсталь» на капремонт 1-го разряда, 13-14 мая 2003 г.

Время вы- дувки	Расход дутья, м ³ /мин	Расход ПГ, м ³ /мин	Содержа- ние влаги, доли ед.	Содерж. O ₂ доли ед.	Температура дутья, °С	Энтальпия дутья, ккал/м ³	Энтальпия влаги, ккал/м ³	Энтальпия, фурм, газов, ккал/м ³	Теор. темпер., °С
13:00	8400	433,33	0,0125	0,25	1100	382,99	478,59	791,93	2191,1
14:00	8500	433,33	0,0125	0,25	1100	382,99	478,59	793,24	2194,5
15:00	8000	433,33	0,0125	0,26	1100	382,99	478,59	794,87	2198,7
16:00	8000	400,00	0,0125	0,26	1100	382,99	478,59	803,87	2222,0
17:00	8200	400,00	0,0125	0,25	1000	345,68	430,90	770,47	2135,5
18:00	6800	0,00	0,0125	0,25	1000	345,68	430,90	882,83	2426,3
19:00	4900	0,00	0,0125	0,25	900	308,37	383,21	853,11	2349,4
20:00	3800	0,00	0,0125	0,25	830	282,26	349,83	832,30	2295,5
21:00	3300	0,00	0,0125	0,25	780	263,60	325,98	817,43	2257,1
22:00	3500	0,00	0,0125	0,25	780	263,60	325,98	817,43	2257,1
23:00	3400	0,00	0,0125	0,26	780	263,60	325,98	835,58	2304,0
0:00	3600	0,00	0,0125	0,25	760	256,14	316,44	811,49	2241,7
1:00	3400	0,00	0,0125	0,26	770	259,87	321,21	832,63	2296,4
2:00	3000	0,00	0,0125	0,20	760	256,14	316,44	716,07	1994,8

Интегральным тепловым показателем этого является уровень теоретической температуры горения. Динамика изменения этого параметра показана в табл.2. Высокий теплофизический потенциал фурменной зоны обусловил развитие интенсивного процесса горения в фурменном факеле и исключил «проскок» кислорода в пространство над поверхностью засыпи, даже при высоте слоя материала $2,5 \div 3,0$ м над фурменным очагом. В тоже время следует отметить, что достижение высокой степени реализации кислорода в фурменной зоне вполне обеспечивается и при уровне теоретической температуры $2250 \div 2300^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение теоретической температуры горения нежелательно, так как при теоретических температурах горения более 2300°C начинает интенсивно идти реакция разложения SiO_2 :



Моноксид кремния, увлекаемая газами, поднимается в верхние горизонты печи и уже на уровне заплечиков начинает интенсивно осаждаться в слое кокса, создавая предпосылки для сводообразования в столбе шихтовых материалов [2]. Это может вызвать подстой или даже длительное зависание материала с последующим обрушением (или обрывом) столба шихты на ходу, создав условия для «проскока» кислорода из фурменной зоны в освободившийся объем в шахте печи с газом, обогащенным водородом. Такая ситуация крайне опасна и часто приводит не только к газовым «толчкам», но и взрывам. Именно на стыке переходного режима закрытия природного газа и, следовавшего за ним, резкого подъема теоретической температуры горения до $2349 \div 2426^\circ\text{C}$ наблюдались «толчки» газа. Наличие же при этом достаточного по высоте слоя столба шихты исключило развитие этого негативного процесса. Именно эти толчки в виде обрушения материала и были отмечены радиолокационным датчиком.

В ходе выдувки печи работа фурменных очагов была устойчива, с нормальной и даже повышенной светимостью. И только за $2,0 \div 2,5$ часа до окончания выдувки в районе леток №1 и особенно №2 начал просматриваться холодный кокс, что свидетельствовало о подходе охлажденного водой материала на уровень воздушных фурм. В секторе летки № 2 расход дутья, определяемый в процессе выдувки печи, по тепловым нагрузкам на водоохлаждаемые сопла фурменных приборов был на 20–40% выше, чем в других секторах печи.

Завершение выдувки осуществлялось в соответствии с инструкцией по ведению доменной плавки и выполнению газовых работ в период выдувки печи.

Таким образом, выдувка на высокофорсированном режиме показала целесообразность принятой технологии. В целом выдувка печи прошла спокойно, без остановок и горения воздушных фурм, что особенно важно для печей большого объема. Концентрация высоких температур в нижней

зоне печи, за счет высокой температуры горения, облегчила меры по обеспечению требуемых температур под колошником (не выше 500⁰С).

Выдача продуктов плавки по ходу выдувки печи осуществлялась удовлетворительно (табл.3). Нагрев чугуна, в основной массе, был близок к его нагреву при работе печи с обычным рабочим режимом. И только последние выпуски были выданы с химическим нагревом чугуна – [Si] = 1,99–2,32%.

Таблица 3 – Химический состав чугуна в период выдувки ДП №9 КГГМК «Кри-
ворожсталь» на капремонт 1–го разряда, 13–14 мая 2003г.

Летка	Дли- на, м	Время, час мин.	№№ вып.	Вес, т	Si	Mn	S	P
3	2,7	14:20–15:20	64383	338,0	0,87	0,21	0,023	0,049
1	2,8	15:45–16:45	64384	571,0	1,04	0,22	0,026	0,052
3	2,8	17:10–18:35	64385	492,0	0,99	0,20	0,020	0,049
1	2,8	19:55–20:25	64386	196,5	1,94	0,26	0,015	0,068
3	2,0	20:55–21:35	64387	86,5	2,30	0,28	0,015	0,068
1	2,8	23:10–00:30	64388		2,32	0,26	0,014	0,063
			64389					
			64390					

«Козловой» чугун выдавался на три чугунные летки («козловые»), расположенные на отметках 6800, 5800 и 4800. «Козловые» летки №1, 3 располагались со стороны шихтоподачи, а №2–пылеуловителей. Химический состав «козлового» чугуна и его температуры приведены в табл.4. Всего чугуна было выдано 699т. Из них на первую летку выдано 298т, на вторую 401т. После открытия третьей летки было выдано незначительное количество чугуна. Химический нагрев «козлового» чугуна, практически, соответствовал нагреву чугуна последних выпусков. Содержание серы в «козловом» чугуне было повышенным, что можно объяснить длительным контактом чугуна с коксом, находящемся в металлоприемнике печи. Температура чугуна была достаточной для обеспечения его жидкотекучести, что и обусловило полную его выдачу.

Уменьшенное количество «козлового» чугуна, в сравнении с расчетным, объясняется тем, что большая часть металлоприемника была заполнена конгломератом, состоящим из кокса, шлака, остатков гарнисажных образований чугуна и незначительным разгаром лещади.

При разработке горна остаток массой до 6–8т, в основном из чугуна, был обнаружен лишь в районе 4 летки.

Шлак был выдан из печи только на выпуске из «козловой» летки №1. Химический состав шлака (табл.5) характеризуется повышенной до 1,33 – 1,40 ед. основностью (CaO/SiO₂) и повышенным содержанием в нем серы до 2,4%. На состав шлака сказались, по–видимому, попавшие в горн гарнисажные образования («монолиты»).

Таблица 4 – Химический состав «козлового» чугуна, выдувка ДП№9 КГГМК «Криворожсталь» на капремонт 1-го разряда, 13-14 мая 2003 г.

№№ «козловых» ле- ток	Время отк./зак.	№№ ков- ша	Вес чугуна	Химический состав, %					t _{чуг.} , °С	Средняя t _{чуг.} , °С
				Si	Mn	S	P	C		
1	12:30	81	105,0	1,45	0,23	0,032	0,053	н.д.	1374	1371
	13:47	108	107,5	1,31	0,23	0,034	0,051	н.д.	1360	
	14:50	159	85,5	1,48	0,24	0,033	0,034	н.д.	1380	
2	19:30	54	84,0	0,87	0,22	0,057	0,050	н.д.	1233	1238
	20:00	37	62,5	1,02	0,22	0,046	0,046	н.д.	1223	
	20:26	151	80,0	1,29	0,25	0,043	0,052	н.д.	1239	
	21:10	4	53,0	1,75	0,28	0,032	0,051	н.д.	1237	
	22:30	0,63	36,0	2,00	0,28	0,031	0,053	н.д.	1242	
	23:25	160	85,5	2,34	0,31	0,027	0,057	н.д.	1253	
3	6:45	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	1280	1280

Таблица 5 – Состав шлака из «козловых» леток, выдувка ДП№9 КГТМК «Криворожсталь» на капремонт 1-го разряда, 13-14 мая 2003 г.

№№ «козловых» леток.	Время отк./зак.	№№ ковша	Химический состав, %							Основность, ед	
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	MgO	FeO	S	$\frac{CaO}{SiO_2}$	$\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$
1	16:10/16:45	0,40	35,8	8,18	50,0	0,07	5,2	0,24	2,4	1,40	1,54
	17:45	0,48	36,5	9,00	48,0	0,08	5,2	0,45	2,4	1,33	1,47
	19:50	109									
	20:05	0,74									
	20:10	126									
	20:20	закрыта									
2	23:20	Нет данных									
3	Нет данных										

Выводы.

1. Подготовительные работы, выбор количества «холостого» кокса и технологическое состояние доменной печи №9 к началу выдувки формировались на основе опыта выдувки ее на предыдущих капитальных ремонтах первого и второго разрядов.

2. Принципиально новым в технологии выдувки печи явился выбор высокого уровня форсировки. Выдувка печи прошла при устойчивом технологическом состоянии печи, без остановок и горения воздушных фурм. Концентрация высоких температур в нижней зоне печи за счет выбора рациональных газодинамических параметров и высокой температуры фурменной зоны способствовала обеспечению требуемых температур (не более 500⁰С) под колошником. Динамика изменения уровня шихты в печи в ходе выдувки контролировалась радиолокационным измерителем уровня – РДУ–Х2.

3. Выдача «козлового» чугуна была выполнена согласно регламенту работ, предусмотренных инструкцией на выдувку печи. Уменьшенное, по сравнению с расчетным, количество выданного чугуна обуславливалось тем, что большая часть объема металлоприемника, преимущественно промежуточная между периферией и центральной зонами, была заполнена плотным конгломератом из коксовой мелочи, непроплавленным гарнисажным материалом чугуна и незначительным разгаром лещади..

4. Принятые решения при выдувке печи позволяют сформулировать следующие рекомендации по выдувке доменных печей большого объема на капитальные ремонты второго и первого разрядов:

- подачу природного газа в печь прекращать при достижении температуры колошниковых газов 450–470⁰С;
- расход кислорода на обогащение дутья держать на уровне, соответствующем рабочему режиму печи до конца выдувки;
- расход дутья и его температуру поддерживать таким образом, чтобы теоретическая температура горения на фурмах не превышала 2300⁰С;
- для обеспечения устойчивого и полного выпуска чугуна из печи через «козловые» летки обеспечить начало разделки леток при выдувке 1/3 объема печи. Это позволит в максимальной степени приблизить начало выпуска чугуна через «козловые» летки к моменту остановки печи.

1. *Лавров Н.В., Шурыгин А.П.* Введение в теорию горения и газификации топлива. – М. Изд-во АН СССР, 1962. – 214 с.
2. *Семик И.П.* Об одной из причин подвисания в доменной печи // Труды ДМИ вып.33. – Гостехиздат УССР, 1955. – С. 31-32.

*Н.М.Можаренко, С.Т.Шулико, И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов,
Институт черной металлургии НАН Украины
Г.И.Орел, В.С.Листопадов, К.А.Дмитренко,
ОАО Криворожский горно-металлургический комбинат «Криворожсталь»*

