

В.М.Бузоверя, М.Т.Бузоверя, Ю.С.Семенов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В ШАХТЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ РАЗНЫХ ОБЪЕМОВ

Обобщены результаты исследования процессов восстановления в рабочем пространстве доменных печей объемом 2000, 2700 и 5000 м³. Показано изменение температуры, состава газовой фазы и шихтовых материалов, степени восстановления оксидов железа по радиусам шахты печи. Приведены температурные поля и граница расположения вязкопластичных материалов в шахте доменной печи. Предложен механизм хода процессов восстановления оксидов железа за счет CO и H₂.

доменные печи объемом , температура, состав газа и шихты, степень достижения равновесия, константы скорости восстановления

Постановка задачи. Головные образцы доменных печей объемом 2000, 2700 и 5000 м³ металлургического комбината «Криворожсталь» были оборудованы установками радиального зондирования не только под защитными плитами колошника, но и на среднем и нижнем горизонтах шахты, а также в распаре, кроме печи объемом 5000 м³ (в районе распара расположено кольцевой воздухопровод горячего дутья). При помощи этих установок исследовали состав и температуру газовой фазы, отбирали пробы шихтовых материалов по радиусам исследуемых горизонтов (пробы шихтовых материалов по радиусу колошника на доменных печах объемом 2000 и 2700 м³ не отбирались). Усреднённые результаты этих исследований представлены на рис.1.

Изложение основных материалов исследования. Показатели работы доменных печей в периоды исследования представлены в табл.1 [1–4]. Полученный обширный экспериментальный материал позволил сравнить фактический состав газа с равновесным (рис.2) для реакции $\text{FeO} + \text{CO} \leftrightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$, а для доменной печи объемом 2000 м³, на которой экспериментально определялась влажность печного газа [4], также и для реакции $\text{FeO} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ (рис.3). Приведенные данные свидетельствуют, что в значительной части рабочего пространства доменной печи состав газовой фазы далек от равновесного, что обеспечивает значительную скорость процессов восстановления в данных участках. Более близок газ к равновесию при температурах ниже 900⁰С. При температурах 500–700⁰С в определенном объеме печи состав газа по содержанию CO₂ превышает равновесный в результате наложения реакции водяного газа: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$, т.к. по содержанию H₂O ни в одной точке состав газа не переходит за равновесие.

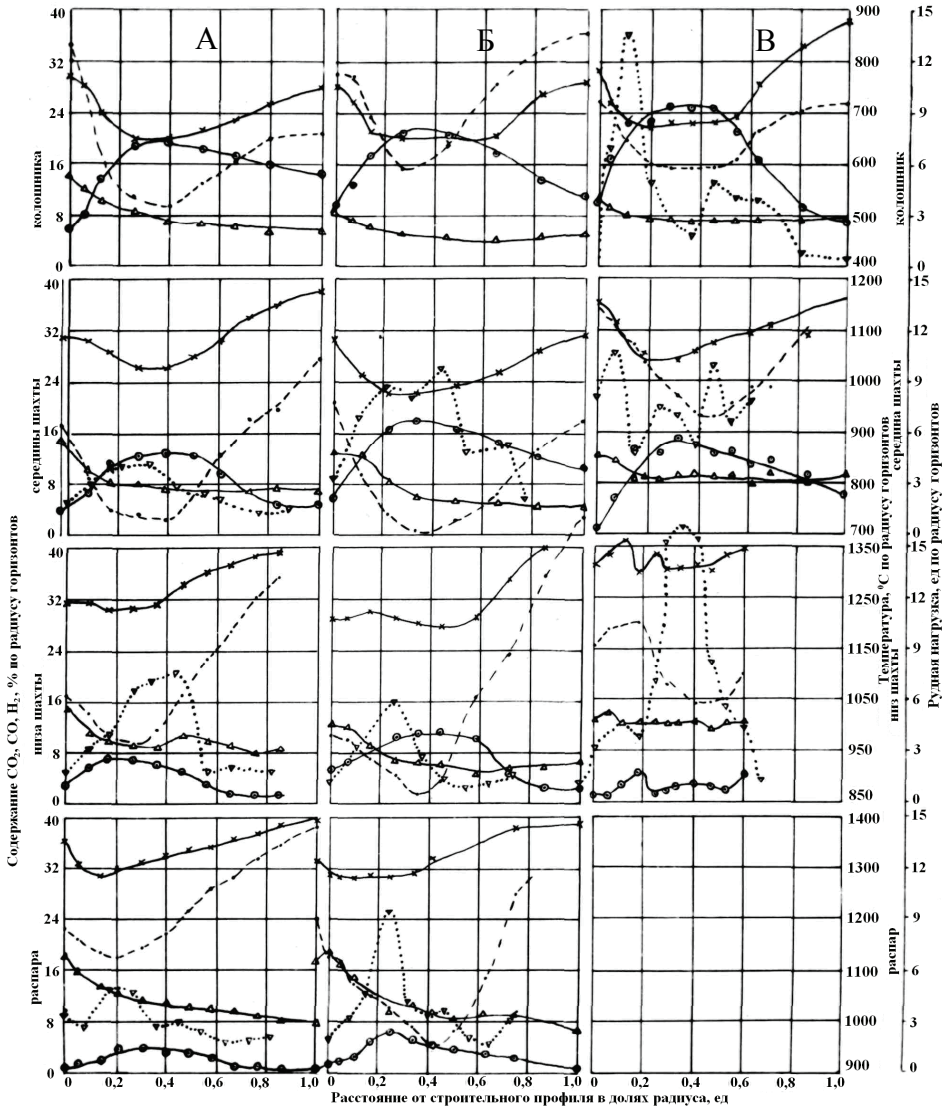


Рис.1. Результаты исследования доменных печей объемом 2000 м^3 (А), 2700 м^3 (Б) и 5000 м^3 (В).

○—○ — CO_2 ; ×—× — CO ; △—△ — H_2 ; ▽—▽ — рудная нагрузка
 ----- — температура, $^{\circ}C$

Таблица 1. Показатели работы доменных печей объемом 2000, 2700 и 5000 м³ в период исследования

Показатели	Доменные печи, м ³			
	2000	2700	5000	
			период I	период II
Среднесуточное производство по весу в ковшах, т	3136	4460	8688	9164
Расход кокса, кг/т чугуна	488	489	490	477
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	113	93	94,1	107
Содержание O ₂ в дутье, %	23,8	22,5	23,3	26,9
Расход дутья, м ³ /мин.	3280	3912	7861	7973
Температура дутья, °С	1070	1137	1225	1271
Давление дутья, МПа	0,269	0,322	0,380	0,391
Давление газа под колошником, МПа	0,140	0,170	0,225	0,229
Температура колошника, °С	375	332	192	183
Интенсивность горения кокса, кг/м ³ сутки	765	775	850,7	867
То же, суммарного углерода, кг/м ³ сутки	754	760	817,2	812
Выход горнового газа, м ³ /мин	4567	5385,3	10894	11529
То же, м ³ /мин*м ² сечения колошника при давлении газа под колошником	45,47	38,71	34,06	37,83
Состав горнового газа, %:				
CO	34,2	32,7	34,06	37,2
H ₂	11,1	11,0	10,58	12,2
N ₂	54,7	56,3	53,38	50,6
Состав колошникового газа, %:				
CO ₂	16,1	17,7	19,0	18,2
CO	24,2	23,0	24,3	23,6
H ₂	7,9	7,4	7,5	6,9
N ₂	49,5	49,5	49,2	46,8
H ₂ O	2,3	2,3	2,1	4,5
Степень использования H ₂	22,56	24,49	21,9	39,47
Степень косвенного восстановления (R _i), %	66,2	62,6	62,5	75,4
Выход шлака, кг/т чугуна	593	463	440	440
Расход агломерата, кг/т чугуна	2007	1798	1802	1802

С использованием разовых значений температуры и состава газа в исследованных точках (средние значения в каждой точке представлены на рис.3) доменной печи объемом 2000 м³ определены статистические зависимости от температуры степеней использования CO и H₂ (η_{CO} , η_{H_2}), а также степеней достижения равновесия (β_{CO, H_2}) реакциями восстановления оксида железа за счет CO и H₂, а изменения последних по трем радиусам шахты и по одному в распаре показаны на рис.4.

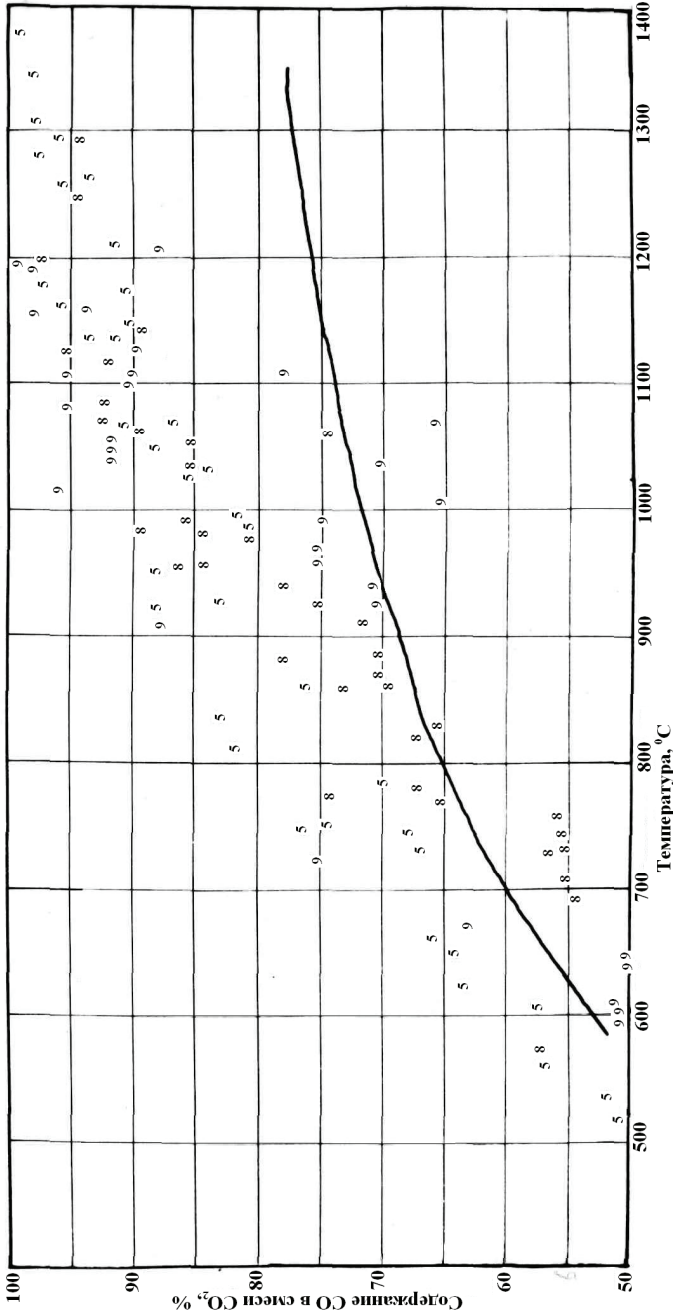


Рис.2. Расположение (экспериментальных) фактических составов газа в исследованных точках относительно равновесной кривой для реакции $\text{FeO} + \text{CO} \leftrightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$

5 – доменная печь объемом 2000 м³; 8 – доменная печь объемом 2700 м³

9 – доменная печь объемом 5000 м³

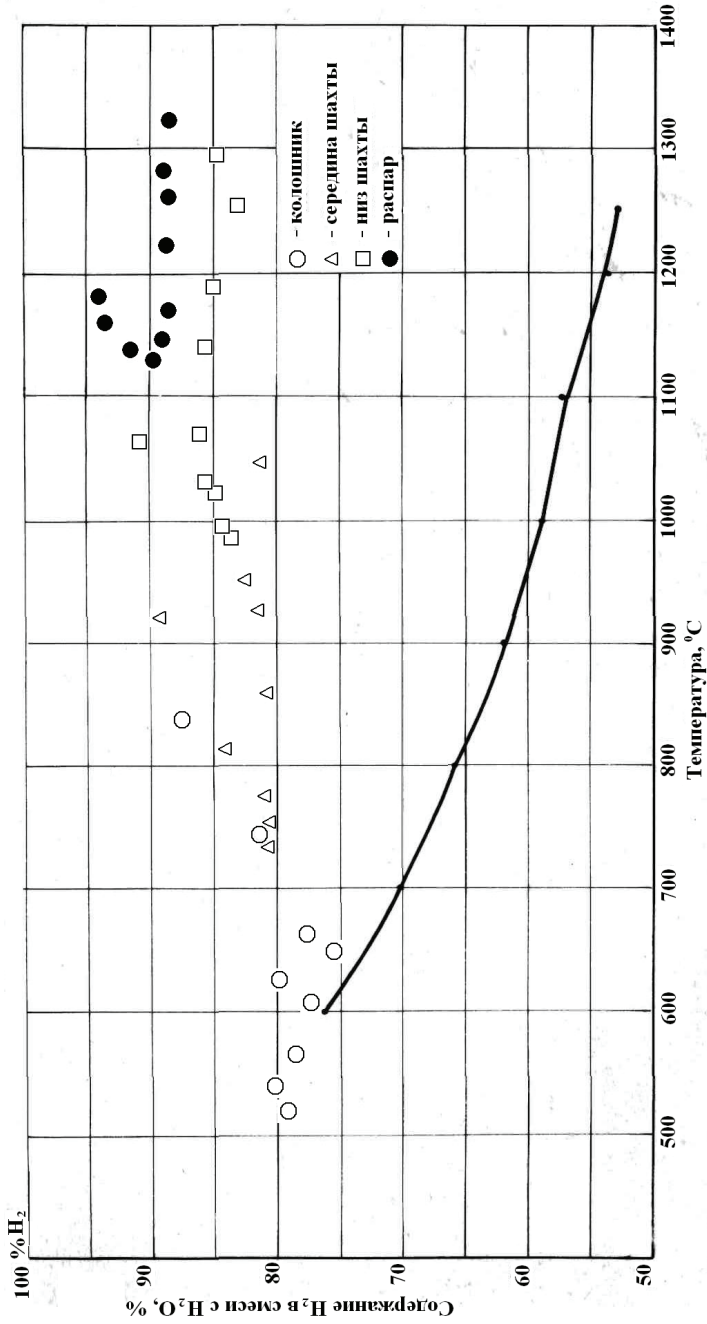


Рис.3. Расположение фактических составов газа, отобранных из шахты доменной печи объемом 2000 м³ относительно кривых равновесия реакции $\text{FeO} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$

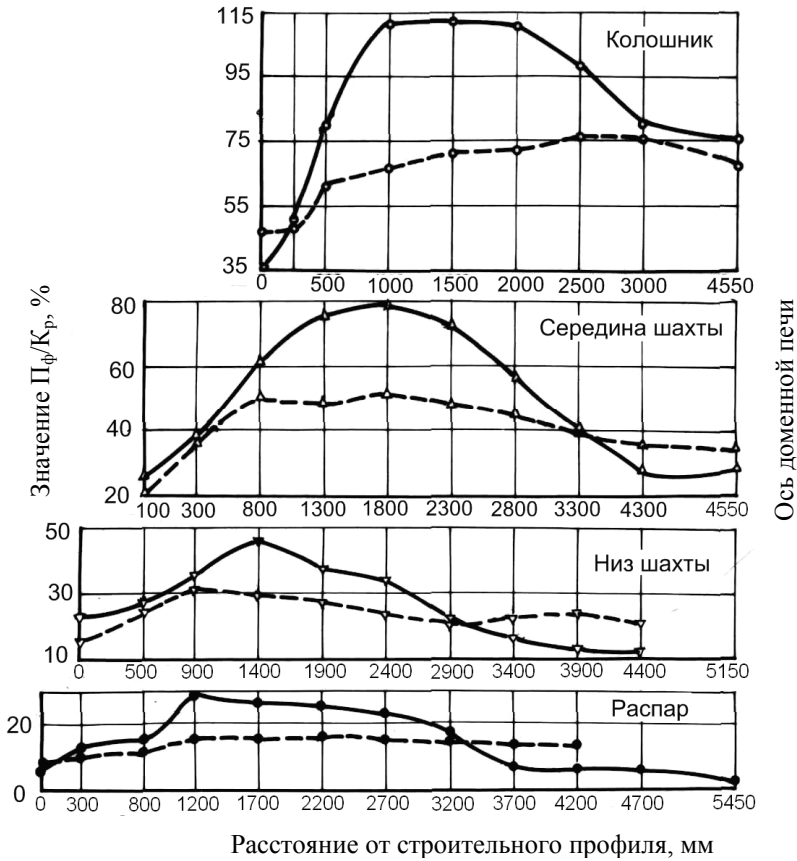


Рис.4. Изменение степени достижения равновесия

○ – колошник; Δ – середина шахты; ▼ – низ шахты, ● – распар,
 ——— степень достижения равновесия реакцией $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$
 - - - - - степень достижения равновесия реакцией $\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$

Таблица 2 – Средневзвешенные значения долей железа разной валентности на исследованных горизонтах доменных печей

Параметр	Горизонт	Доменные печи объемом, м ³		
		2000	2700	5000
Fe ³⁺	Колошник			86,02
Fe ²⁺				13,98
Fe _{мет}				–
CB				4,67
Fe ³⁺	Середина шахты	9,4		27,13
Fe ²⁺		60,1		58,29
Fe _{мет}		30,5		14,53
CB		47,0		23,97
Fe ³⁺	Низ шахты	5,2	13,2	8,52
Fe ²⁺		58,4	69,6	65,72
Fe _{мет}		36,4	17,2	25,76
CB		52,7	40,4	47,67
Fe ³⁺	Распар	2,1	2,2	
Fe ²⁺		38,8	33,4	
Fe _{мет}		59,1	64,4	
CB		70,1	75,6	

Указанные уравнения имеют вид:

$$\eta_{CO} = 0,638 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 17,604 \frac{T}{100} + 125,036\%; r = 0,914;$$

$$\eta_{H_2} = 0,520 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 2,368 \frac{T}{100} + 33,940\%; r = 0,892;$$

$$\beta_{CO} = 2,171 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 54,149 \frac{T}{100} + 350,588\%; r = 0,974;$$

$$\beta_{H_2} = 1,164 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 29,820 \frac{T}{100} + 210,073\%; r = 0,951,$$

где: T – температура в точке исследования, °К.

Коэффициент корреляции приведенных зависимостей очень высок, что свидетельствует о почти функциональной связи между рассматриваемыми величинами. Указанные зависимости могут быть использованы при моделировании процессов в шахте доменной печи. Средневзвешенные значения долей железа разной валентности и степени его восстановления

по потерянному кислороду (от Fe_2O_3) на исследованных горизонтах шахты и в распаре приведены в табл.2. Такой характер восстановления оксидов железа обусловлен работой газового потока, температура и состав которого представлены на рис.5–7. Распределение температуры по радиусу печи сохраняет известную закономерность: минимальная температура на каждом горизонте соответствует гребню рудных материалов, а к оси и периферии – повышается. При этом с увеличением объема печи минимум температуры приближается к периферийной зоне [5].

Состав газовой фазы (рис.5,6) соответствует температурному режиму (рис.7). Максимальное содержание диоксида и минимальное оксида углерода совпадает с минимальными значениями температуры, с ростом которой к стенке печи и к осевой зоне содержание CO_2 снижается, а CO – растет. Содержание водорода в газе (рис.5) практически не зависит от температуры и из-за периферийного подвода природного газа в пристенном участке содержание H_2 более чем в два раза превышает его концентрацию в газе осевой зоне доменной печи.

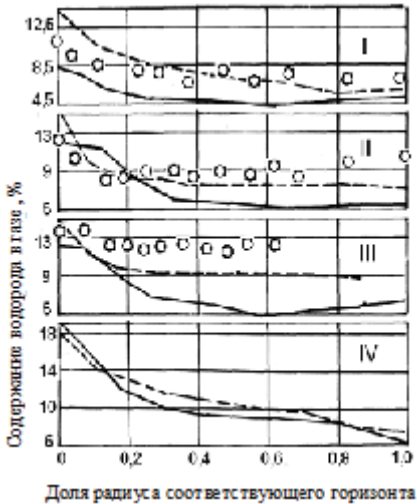


Рис.5. Содержание H_2 по радиусам исследованных горизонтов доменных печей объемом 2000 м^3 (—), 2700 м^3 (- - -) и 5000 м^3 (о о о)

I – колошник, II – середина шахты, III – низ шахты, IV – распар

При движении газа от распара до колошника содержание H_2 у стен уменьшается от 18–19 до 8,5–13,0%, в то время как в осевой зоне оно практически не изменяется.

Изменение температуры в рабочем пространстве печи от горна

до колошника (рис.8) свидетельствует, что только в отдельных сечениях имеются явно выраженные участки замедленного теплообмена (например, периферия доменных печей объемом 2000 и 5000 м^3 и ось 5000 м^3), а в остальном объеме печей градиенты изменения температуры достаточно высоки по всей высоте печи.

При увеличении объема печи и степени обогащения дутья кислородом содержание CO_2 в гребне рудных материалов под защитными плитами колошника увеличивается от 19 до 24% и, естественно, увеличивается его содержание в общем колошниковом газе (от 16,5 до 19%). При увеличении объема печи увеличивается и максимальное значение руд-

ной нагрузки, причем локализация максимума практически одинакова для всех печей (все печи оборудованы конусными загрузочными устройствами).

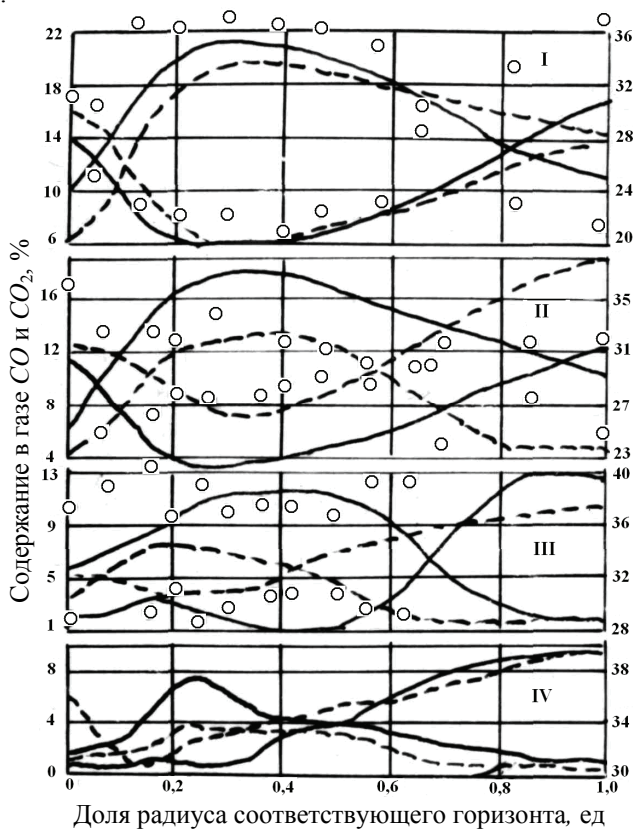


Рис.6. Содержание CO и CO₂ в печном газе на исследованных горизонтах доменных печей (обозначения как на рис. 5)

Полученный экспериментальный материал о составе и температуре газа и шихты в шахте позволяет определить тепловые характеристики потоков шихты и газа (рис.9): плотность печного газа, теплоемкости и теплосодержания газа и шихты по радиусам исследованных горизонтов.

Теплоемкости газа и шихты изменяются по радиусам печей на всех горизонтах шахт однообразно. Плотность газа изменяется по исследованным радиусам плавно и максимальные значения ее соответствуют гребням рудных материалов, где теплоемкости и теплосодержания как газа, так и шихты минимальны.

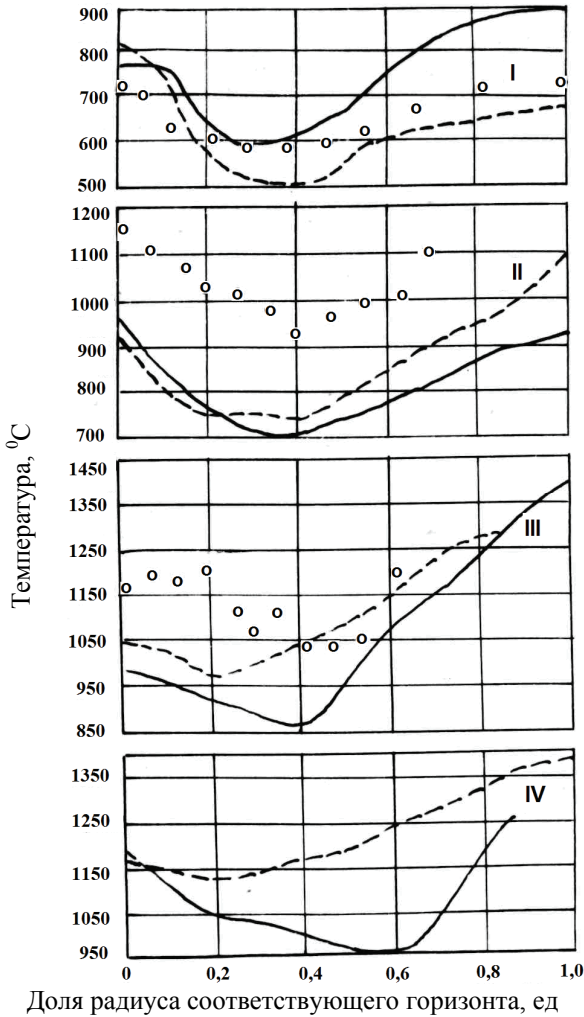


Рис.7. Температура газовой фазы по радиусу исследованных горизонтов доменных печей объемом 2000 м^3 (———), 2700 м^3 (- - - - -) и 5000 м^3 (○ ○ ○)

По приведенным на рис.1 результатам с привлечением суммарных расходов шихтовых материалов и выхода горновых газов можно оценить характер распределения газового потока по сечению печи. Такой подход может быть использован для контроля точности распределения газа по сечению печи, оцениваемого другими способами.

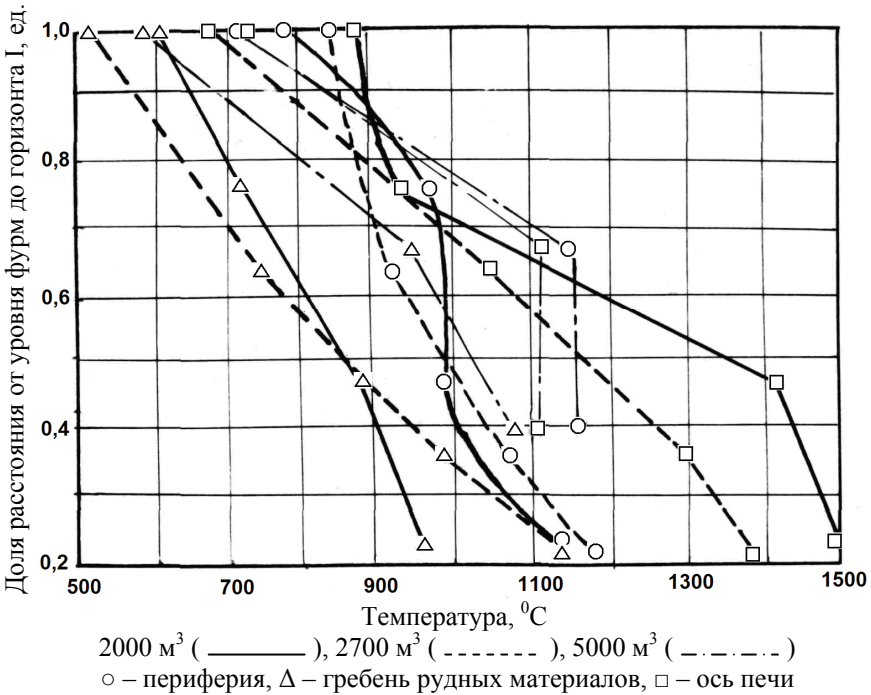


Рис.8. Изменение средневзвешенной температуры по высоте доменных печей объемом

Распределение газового потока обычно идентифицируется с содержанием CO_2 в радиальном газе или температурой этого газа, хотя строгого доказательства такой идентичности нет [6]. Авторами названной работы выполнены измерения скорости газового потока пневмометрическими трубками, с применением радиоактивных изотопов, инертных и других газов, а также разработан прибор (термоанемометр), позволяющий оперативно измерять скорости газа в широком диапазоне температур при высокой его запыленности. Исследования с помощью термоанемометра выявили существенную неравномерность скоростей газа по радиусу печи. При этом максимум скорости всегда располагался между гребнем рудных материалов и осью печи, а минимум соответствовал центру. Кроме того, установлено отсутствие тесной связи между скоростью газа и его составом или температурой.

Аналогичные результаты получены и в данной работе расчетным путем по экспериментальным данным о составе газа (четыре горизонта) и шихтовых материалов (три горизонта) в шихте и распаре доменной печи объемом 2000 м³.

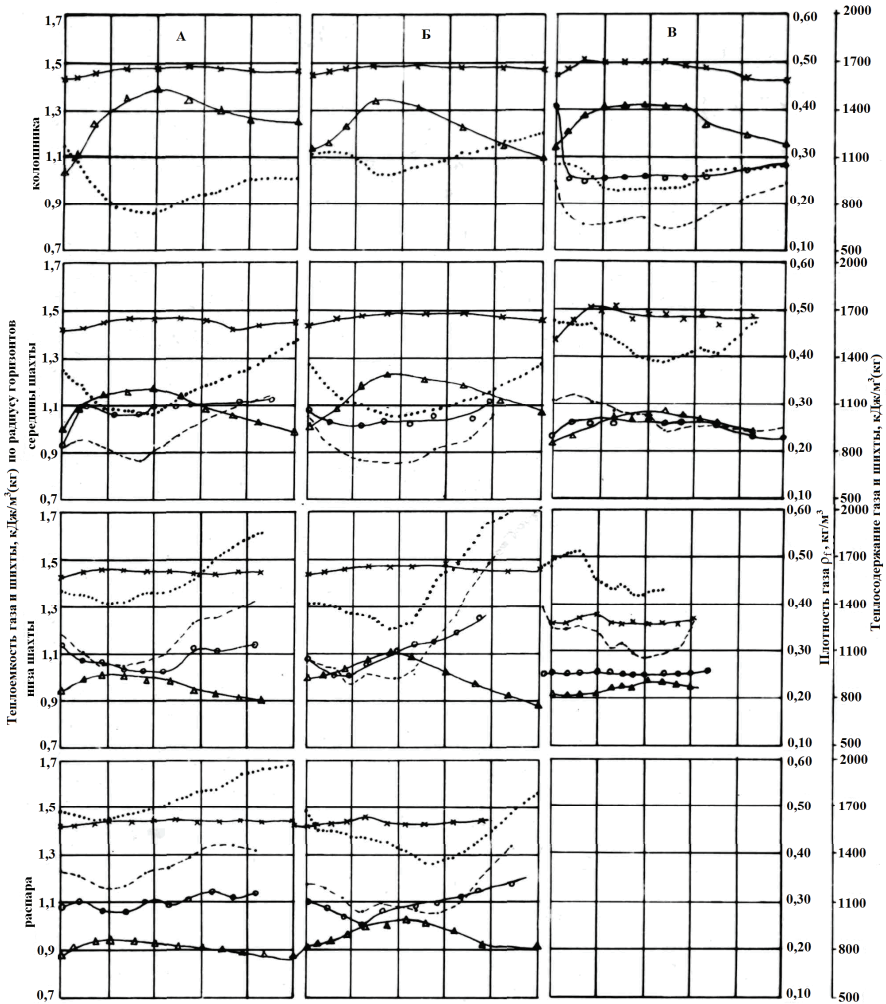


Рис.9. Теплотехнические характеристики потоков шихты и газа в шахте доменных печей объемом 2000 м^3 (А), 2700 м^3 (Б), 5000 м^3 (В)

○—○ — теплоемкость шихты; ---- — теплосодержание шихты
 ×—× — теплоемкость газа; △—△ — плотность газа,
 — теплосодержание газа

Расход газа в каждой исследованной точке получали делением объема кислорода шихты, отнятого на пути между двумя горизонтами, на прирост содержания его в газе между этими горизонтами. Результаты расчетов представлены на рис.10, где распределение количества газа между горизонтами рассчитано для отличающихся режимов (табл.3).

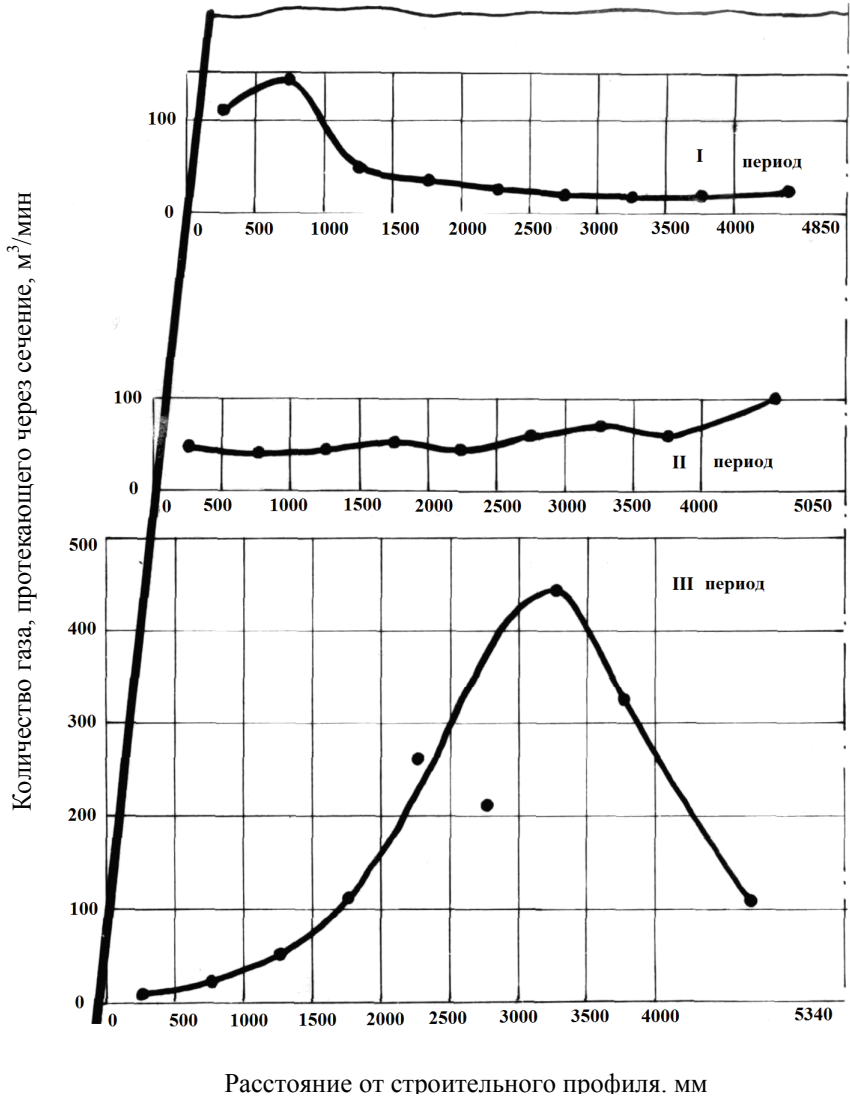


Рис.10. Изменение расхода газа по радиусу доменной печи объемом 2000 м^3 между исследованными горизонтами

Таблица 3 – Основные технико–экономические показатели работы доменной печи объемом 2000м³, при которых рассчитано распределение количества газа по ее сечению

Показатели	периоды		
	I	II	III
Производительность, т/м ³ ·сутки	1,36	1,48	1,56
Интенсивность горения кокса, т/м ³ ·сутки	0,734	0,756	0,785
Интенсивность горения по суммарному углероду, т/м ³ *сутки	0,689	0,723	0,773
Расход дутья, м ³ /мин.	3559	3500	3270
Температура дутья, °С	895	1024	1070
Содержание кислорода в дутье, %	20,8	20,8	23,5
Давление дутья, МПа	273	264	271
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	83,4	95,1	118,3
Расход кокса, кг/т чугуна	539	510	502,5
Содержание железа в агломерате, %	45,7	47,2	50,3
Выход шлака, кг/т чугуна	762	743	625

Несмотря на то, что данные о количестве газа, проходящего через шихту на исследуемых горизонтах, имеют качественный характер, заметна тенденция к перемещению максимума от периферии к осевой зоне при увеличении интенсивности работы печи. Информация о характере распределения газового потока по сечению рабочего пространства печи позволит более квалифицированно управлять ходом плавки, своевременно корректировать величину рудной нагрузки в отдельных зонах колошника, поэтому весьма важным, с практической точки зрения, является разработка способа оперативной оценки количества или скорости газа на отдельных участках радиуса сечения колошника.

Одним из таких методов, наряду с термоанемометрами и расчетом по составу газа, может быть измерение мощности шума по сечению рабочего пространства, которая должна быть пропорциональной скорости газового потока, а частота звука звуковых колебаний – обратно пропорциональной величине размера кусков шихты.

В работе [7] высказано предположение о равенстве количества движения элементарных струй газового потока в шахте доменной печи, т.е.

$$\frac{q\gamma\omega}{g} = const$$

где: q – расход газа в элементарной струе, м³/с;

γ – фактическая плотность газа, кг/м³;

ω – скорость газа в элементарной струе, м/с;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Основывается такое предположение на том, что кривая, характеризующая изменение плотности газа, плавно изменяется по радиусу печи (рис. 11), несмотря на довольно существенный разброс его состава и температуры. Значение постоянной величины, по-видимому, равно количеству движения всего газового потока средневзвешенных состава и температуры, проходящего через поперечное сечение шахты, отнесенное к единице площади сечения.

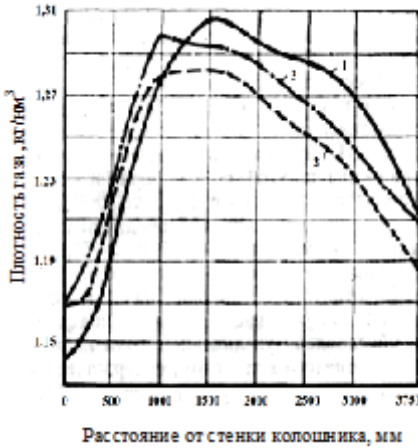
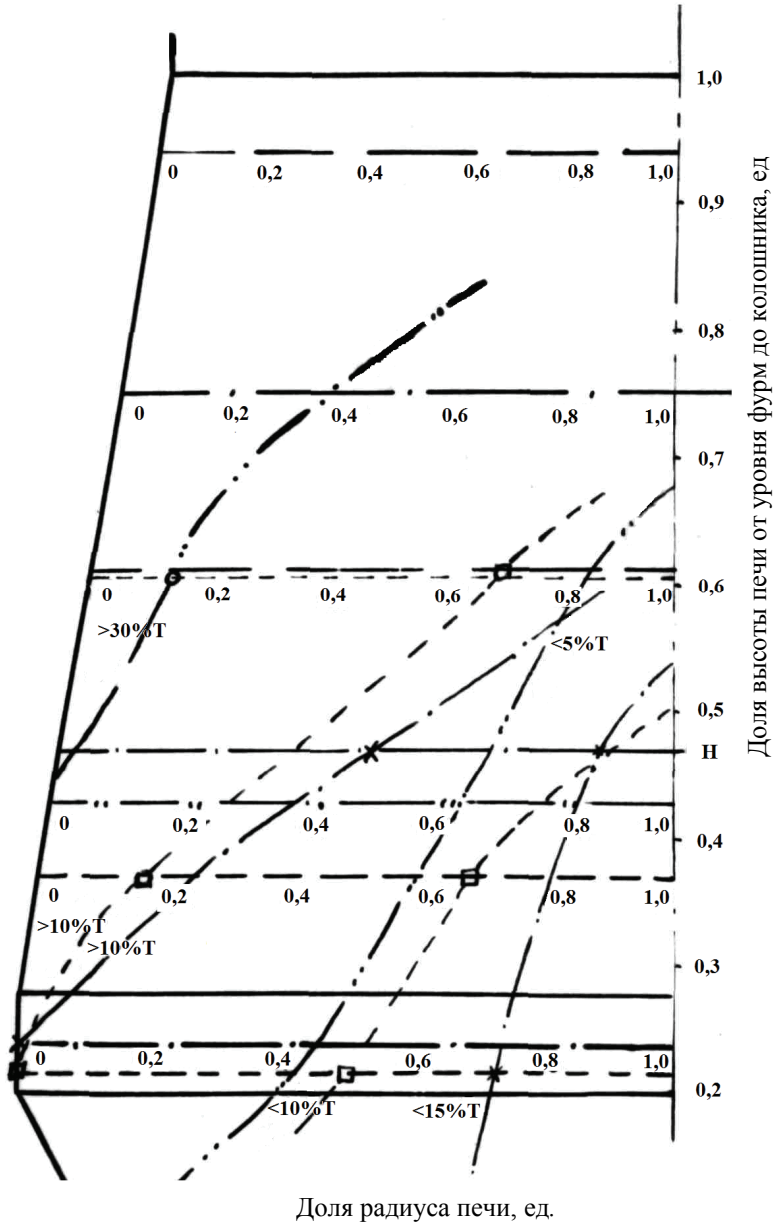


Рис.11. Плотность радиального газа под защитными плитами колошника доменной печи объемом 2000 м^3
 ————— — 27,7 % O_2 , - - - - - — 30,5%, - · - · - · — 31,2 O_2 в дутье

Определяющее влияние на ход и результаты плавки оказывает состояние зоны размягчения—плавления, ее протяженность, форма и уровень расположения.

На рис.12 по результатам зондирования нанесены кривые содержания в отобранных пробах тестообразной массы для доменной печи объемом 2000 м^3 более и менее 10%, для 2700 м^3 — более 10 и менее 15%, а для 5000 м^3 — более 30 и менее 5%. Шихта доменных печей объемом 2000 и 2700 м^3 состояла из 100% агломерата, а объемом 5000 м^3 включала и 40% окатышей, поэтому тестообразная масса на этой печи в больших количествах обнаруживается уже на среднем горизонте шахты, а ее объем в пробах мало меняется как на среднем, так и на нижнем горизонтах шахты т.е. значительный объем рабочего пространства печи имеет пониженную газопроницаемость.

Такое положение с образованием вязко—пластичных масс в шахтах исследованных доменных печей коррелирует с расположением изотерм 800, 1000, 1200 и 1400°C (рис.13). Так, например, в доменной печи объемом 5000 м^3 изотерма 1400°C располагается выше, чем изотерма 1200°C доменной печи объемом 2700 м^3 . Аналогичная картина расположения вязко—пластичной зоны в шахте и при исследовании содержимого охлажденных доменных печей [8].



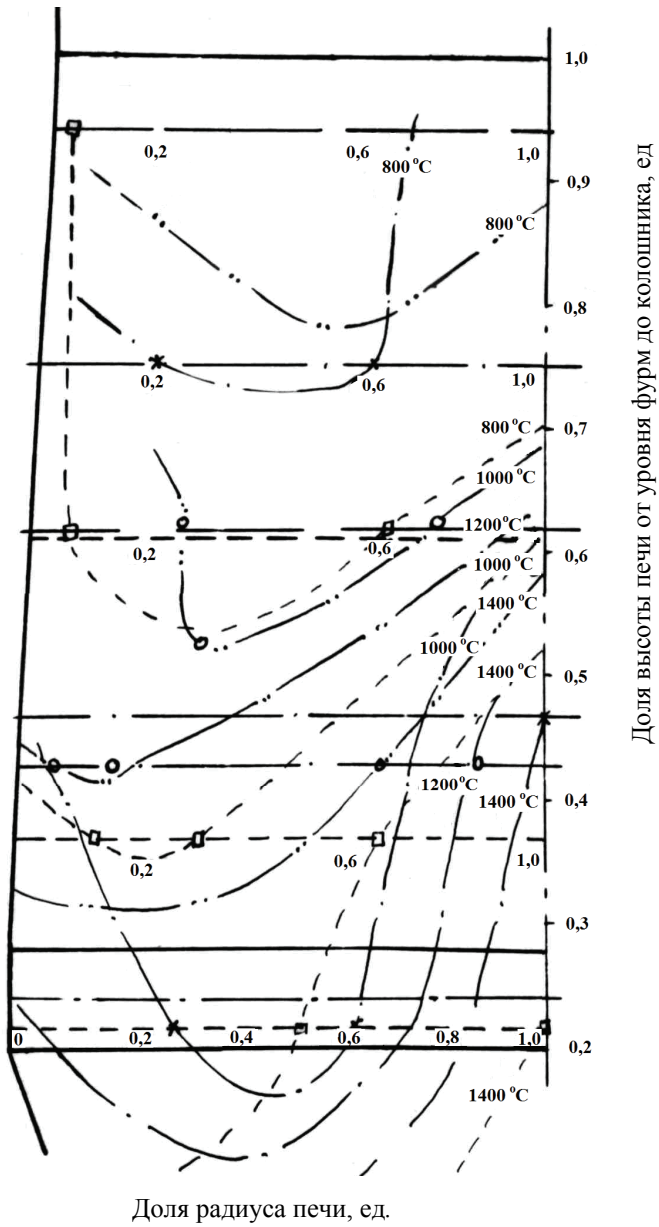
□---□ – 2000 м³ ×---× – 2700 м³ - - - - - 5000 м³

Рис.12. Расположение линий равного содержания тестообразной массы в пробах материалов, отобранных из шахты доменных печей.

Из трех исследованных доменных печей наиболее полно изучена доменная печь объемом 2000м^3 , причем на этой печи определялась и влажность печного газа по радиусам исследованных горизонтов (рис.14). Для вычисления скоростей восстановления оксидов железа за счет CO и H_2 определены фактические средневзвешенные температуры и составы газа на исследованных горизонтах этой доменной печи (табл.4). В табл.4 представлены также равновесные составы газа для фактических температур и отклонения их от средневзвешенных значений.

Таблица 4. Равновесные и расчетные средневзвешенные составы и температуры газа на исследованных горизонтах шахты доменной печи объемом 2000м^3

Показатели	Исследованные горизонты печи			
	распар	низ шахты	середина шахты	колошник
Температура газа, $^{\circ}\text{C}$	1186	1069	815	610
Фактический состав газа (в пересчете на 100%),%;				
CO_2°	6,9	13,8	24,8	40,6
CO°	93,1	86,2	75,2	59,4
$(\text{CO}_2+\text{CO})^{\circ}$	100,0	100,0	100,0	100,0
$\text{H}_2\text{O}^{\circ}$	9,7	14,1	18,0	19,3
H_2°	90,3	85,9	82,0	80,7
$(\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2)^{\circ}$	100,0	100,0	100,0	100,0
Равновесный состав газа, %				
CO_2	24,6	27,1	34,2	46,5
CO	75,4	72,9	65,8	53,5
CO_2+CO	100,0	100,0	100,0	100,0
H_2O	44,2	42,0	34,6	24,5
H_2	55,8	58,0	65,4	75,5
$\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2$	100,0	100,0	100,0	100,0
Отклонение от средневзвешенного, % абс:				
CO_2	-17,7	-13,3	-9,4	-5,9
CO	+17,7	+13,3	+9,4	+5,9
H_2O	-34,5	-27,9	-16,6	-5,2
H_2	+34,5	+27,9	+16,6	+5,2



(обозначение, как на рис.12)

Рис.13. Расположение изотерм в шахтах доменных печей

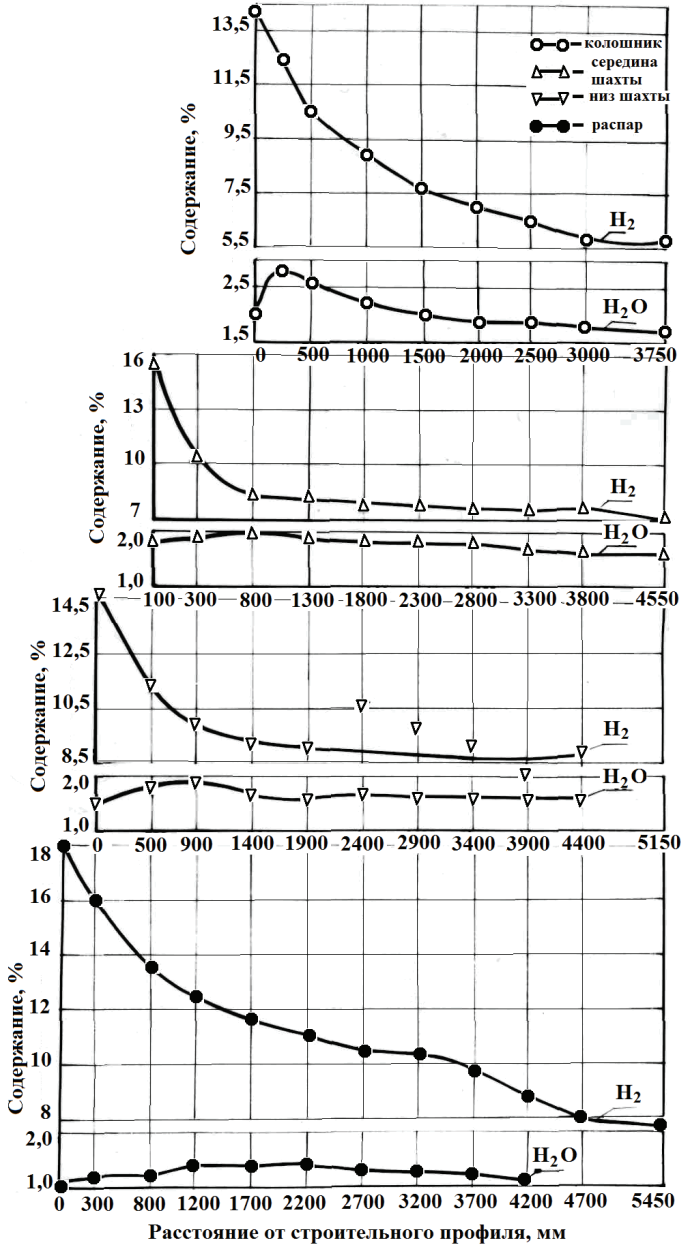


Рис.14. Содержание водорода и паров воды по исследованным радиусам доменной печи объемом 2000 м³

По данным табл.4 и [1–6] вычислены скорости восстановления оксидов железа в шахте за счет CO и H_2 и состав газа без учета реакции водяного газа на исследованных горизонтах печи (табл.5). На рис.15 приведен состав и температура газа в зависимости от времени его контакта с шихтой. По вычисленным скоростям восстановления оксидов железа определены константа скорости реакции и отношение эффективного коэффициента внутренней диффузии к длине капилляра. Значение и их зависимость от времени контакта с шихтой приведены на рис.16.

Таблица 5. Скорость восстановления за счет CO и H_2 и состав газа без учета реакции водяного газа на исследованных горизонтах доменной печи объемом 2000м^3

Показатели	Участок шахты печи		
	Распар- низ шахты	Низ- середина шахты	Середина шахты – колошник
Скорость восстановления за счет CO , литров $O_2/(\text{м}^3/\text{с})$	10,29	10,47	11,57
То же, за счет H_2 , л $O_2/(\text{м}^3/\text{с})$	4,44	2,31	1,56
Суммарная скорость восстановления, л $O_2/(\text{м}^3/\text{с})$	14,73	12,78	13,13
Расчетная скорость восстановления за счет CO , л $O_2/(\text{м}^3/\text{с})$	6,35	5,57	5,83
То же, за счет H_2 , л $O_2/(\text{м}^3/\text{с})$	8,38	7,21	7,30
Отношение расчетной скорости восстановления за счет H_2 к скорости за счет CO , л $O_2/(\text{м}^3/\text{с})$	1,31	1,30	1,25
Содержание CO_2 в газе с учетом хода реакции водяного газа, %	10,40	19,30	32,70
То же, H_2O , %	11,90	16,95	18,65
Расчетное содержание CO_2 в газе без учета хода реакции водяного газа, %	6,40	10,27	16,48
То же, H_2O , %	22,10	50,23	87,18
Равновесное содержание CO_2 в газе [4,6], %	25,85	30,65	40,35
То же, H_2O в газе [5,6], %	4,31	38,30	29,55

В нижней части шахты константа скорости химической реакции будет представлять собой эффективный коэффициент внутренней диффузии (в связи с высокой скоростью газового потока – около 20 м/с, внешняя диффузия не влияет на скорость восстановления), поэтому можно сказать, что скорость восстановления равна скорости диффузии, т.е.

$$V_p = V_\partial = \frac{dQ_g}{d\tau} = D_e \frac{C^0 - C'}{b}$$

где: V_p, V_∂ – скорости реакции и диффузии, причем $V_p = k C'$,
 dQ_∂ – количество диффундирующего газа; $d\tau$ – время;
 D_e – эффективный коэффициент диффузии; b – длина капилляра, см;
 C^0 – концентрация компонента в печном газе;
 C' – концентрация компонента в газе на границе раздела фаз;
 k – константа скорости реакции восстановления.

Как следует из рис.16, константа скорости реакции восстановления оксидов железа при помощи CO с течением времени увеличивается, что по-видимому, связано с уменьшением скорости газификации твердого углерода за счет CO_2 при снижении температуры, а также с развитием реакции водяного газа, в результате которой содержание CO_2 увеличивается, а CO – снижается. Константа скорости реакции восстановления за счет H_2 , наоборот, с течением времени уменьшается, т.к. реакция водяного газа увеличивает содержание водорода в газе за счет регенерации паров воды.

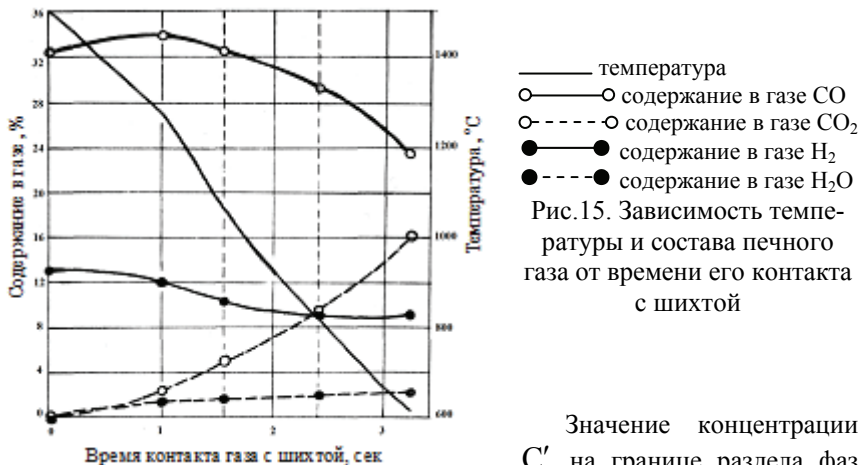


Рис. 15. Зависимость температуры и состава печного газа от времени его контакта с шихтой

Значение концентрации C' на границе раздела фаз будет отвечать равновесному для данной реакции при данной температуре [9–11], поэтому можно вычислить C^0 и $C^0 - C'$ на исследованных горизонтах (эти данные приведены в табл. 4). По данным табл. 4 и 5 можно определить величину отношения $\frac{D_e}{b}$ (приведено на рис.16). Из рис.16

следует, что эффективный коэффициент диффузии в случае восстановления водородом на порядок ниже, чем для CO (длина капилляров « b » в обоих случаях одинакова), что, учитывая физические свойства молекул H_2 и CO [11] и результаты экспериментальных работ [12], не возможно. Дру-

гими словами, на конечные результаты реакции восстановления оксидов железа водородом оказывает влияние реакция водяного газа, при помощи которой кислород оксидов железа, отнятый водородом у границы раздела фаз Fe–FeO, передается оксиду углерода на выходе из капилляров.

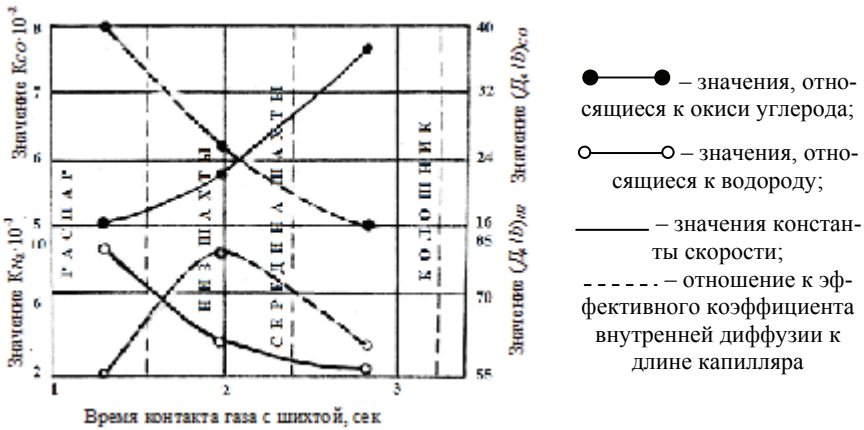


Рис. 16. Изменение константы скорости реакции восстановления CO и H_2 и отношения длины капилляра к эффективному коэффициенту диффузии

Вывод. Проведенный анализ данных экспериментальных исследований состава и температуры газовой фазы в шахте доменной печи объемом 2000 м^3 на четырех ее горизонтах показывает, что константа скорости восстановления оксидов железа за счет CO увеличивается от 0,05 до 0,08 при снижении температуры во всем исследуемом диапазоне ($1300 - 600^\circ\text{C}$), т.е. ведет себя противоположно известному закону зависимости скорости реакции от температуры [13], что находит свое объяснение в возможном механизме протекания реакции. Этот механизм может быть представлен следующим образом. В капиллярах на границе раздела фаз Fe–FeO кислород оксида отнимается водородом и транспортируется до выхода из капилляра в составе молекулы H_2O (величины молекул и скорости их диффузии значительно отличаются от аналогичных характеристик для молекул CO и CO_2), а на выходе из капилляра по реакции водяного газа $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ кислород соединяется с молекулой CO и в виде CO_2 уходит в газовую фазу, повышая при этом концентрацию диоксида, т.е. повышает кажущуюся скорость восстановления за счет CO . Освободившийся водород (концентрация его у входа в капилляр возрастает) снова возвращается к разделу фаз во внутрь куска и повторно участвует в реакции восстановления. Последнее подтверждается исследованиями С.Т.Ростовцева [8], показавшего, что при восстановлении кусков оксидов железа, давление внутри куска в несколько раз превышает внешнее.

Выявленные закономерности изменения константы скорости восстановления оксидов железа водородом и оксидом углерода, а также ряда других характеристик процессов восстановления могут быть использованы при составлении уточненной модели доменного процесса для систем автоматического управления.

1. Некрасов З.И., Покрышкин В.Л., Бузовера М.Т. Исследование состава твердых и жидких материалов в шахте и распаре доменной печи объемом 2000м^3 // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №4. – 1968. – С.3–12.
2. Исследование состава газа в горне и шахте доменной печи объемом 5000м^3 / М.Т.Бузовера, С.Т.Шулико, В.И.Шевченко и др. // В. Сб. «Опыт эксплуатации доменных печей объемом 3000м^3 и более». – М. *Металлургия*, 1982. – С.33–38.
3. Бузовера М.Т., Москалина Ф.Н., Тарановский В.В. Исследование состава газовой фазы и температуры в шахте доменной печи объемом 5000м^3 . // В сб. «Вопросы теории и практики производства чугуна». *Металлургия чугуна*. – М. *Металлургия*, 1983. – С.34–45.
4. Некрасов З.И., Бузовера М.Т. Исследование процессов восстановления в шахте доменной печи объемом 2000м^3 // *Сталь*. – 1969. – №2. – С.110–115.
5. Некрасов З.И., Бузовера М.Т., Хомич И.Т. Способ ведения доменной плавки // *А.с. СССР № 827545* // *Бюлл. № 17*. – 1981. – С.98.
6. Китаев Б.И. Теплотехника доменного производства. / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Е.Л.Суханов и др. – М. *Металлургия*, 1978. – 243с.
7. Некрасов З.И., Бузовера М.Т., Москалина Ф.Н. Восстановительно–тепловая работа доменной печи, работающей на комбинированном дутье, содержащем 32% кислорода. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1977. – №4. – С.3–6.
8. Балон И.Д. Фазовые превращения материалов при доменной плавке. / И.Д.Балон, И.З.Буклан, В.Н.Муравьев и др. – М. *Металлургия*, 1984. – 152с.
9. Матсубара А. Химическое равновесие между железом, углеродом и кислородом. // *ЖРМО*. – 1925. – Ч.II. – С.94–107.
10. Шодрон Г. Обратимые реакции водорода и окиси углерода с окислами железа // *ЖРМО*. – 1925. – Ч.II. – С.108–112.
11. Даркен Л.С., Гарри Р.У. Поле вюститита и относительное равновесие / «*J. American Chemical Soc.*». – 1945. – №8. – Т.67. – С.1308–1312.
12. Ростовцев С.Т. Некоторые кинетические закономерности косвенного и прямого восстановления. / С.Т.Ростовцев, А.П.Ем, Л.Н.Руденко, В.К.Симонов // *Бюллетень ЦИИНЧМ*. – №18. – 1958. – С.13–19.
13. Жуховицкий А.А. Шварцман И.А. *Физическая химия*. – М.: *Металлуриздат*, 1963. – 676с.
14. Ростовцев С.Т., Мойсик М.Р. Диффузионно–кинетическая характеристика процессов восстановления железных руд // *Сталь*. – №8. – 1963. – С.679.

*Статья рекомендована к печати
Академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

Бузоверя В.М., Бузоверя М.Т., Семенов Ю.С.

Дослідження процесів відновлення в шахті доменних печей різних об'ємів.

Узагальнено результати дослідження процесів відновлення в робочому просторі доменних печей об'ємом 2000, 2700 і 5000 м³. Показано зміни температури, складу газової фази і шихтових матеріалів, ступінь відновлення оксидів заліза по радіусах шахти печі. Приведено температурні поля і межі розташування в'язкопластичних матеріалів в шахті доменної печі. Запропоновано механізм відновлення оксидів заліза за рахунок CO і H₂.