

На правах рукописи

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ

СЕРИЯ

**КУРСОВЫХ ПОСОБИЙ
И КОНСПЕКТОВ**

№ 2

Проф. М. А. ПАВЛОВ

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

ДОМЕННЫЙ ПРОЦЕСС

Ред.-издат. бюро Московского института стали

Москва

1 9 3

НЕ
УДУНТ
(ДМетИ)

1954-1955 гг.
ПЕРЕИНВЕНТАРИЗОВАНА

1971 г.
ПРОВЕРЕНО

На правах рукописи

М. А. ПАВЛОВ
ПРОФЕССОР МОСКОВСКОГО ИНСТИТУТА СТАЛИ
ИМЕНИ И. В. СТАЛИНА

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

ДОМЕННЫЙ ПРОЦЕСС

98886
м

ИЗДАНИЕ МОСКОВСКОГО ИНСТИТУТА СТАЛИ
МОСКВА

1932

НЕ
УДУНТ
(ДМетІ)

НБ
УДЛНТ
(ДМетІ)

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Доменный процесс (Окончание)

III. ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЗОВ НА ПУТИ К КОЛОШНИКУ

Продуктом неполного горения углерода является газ, содержащий 35% по объему CO , 0,8% H_2 и 64,2% N_2 (если воздух содержит 1% по объему водяных паров или около 8 их на 1 куб. м дутья), но в горне доменной печи нет места, где бы мог быть обнаружен газ такого состава: еще раньше, чем исчезнут остатки CO_2 , в газе уже оказывается содержание CO , превышающее 35% (см. диагр. стр. 174). Это значит, что процесс восстановления на счет твердого углерода идет уже здесь (при работе на коксе — на расстоянии 800—825 мм от глаза фурм по направлению к оси горна), точно так же как и в пространстве между окислительными областями отдельных фурм и между глазом каждой фурмы и стенами горна. Здесь, в области наивысшей температуры, происходит восстановление кремния из золы кокса, железа и марганца — из пришедших сюда их силикатов, а также из шлака, покоящегося на слое чугуна.

На очень длинном пути, от горизонта фурм до тех мест шахты, где господствует температура 950° (не ниже), поднимающиеся вверх газы совершают свою восстановительную работу так, что углерод горючего окисляется кислородом руды (см. процесс восстановления, формула стр. 131) и газ обогащается окисью углерода, отчего содержание N_2 в нем падает. Расчет показывает, что при обычном составе чугуна, в зависимости от расхода горючего, содержание CO с 35% подымается до 38—40% (максимум—41%, минимум—37%); низкий расход горючего дает мало газа, максимум CO в нем и обратно. Конечно, абсолютное количество CO возрастает от увеличения в чугуне элементов, восстанавливающихся на счет твердого углерода (Si , Mn и P), но при получении такого чугуна расход горючего не может быть мал и поэтому % содер-

жания СО не доходит в этом случае до максимума в области высоких температур.

Опускающиеся плавильные материалы охлаждают поднимающиеся газы и, наконец, последние приобретут температуру ниже 950° . Как только это случится, углекислота, как продукт восстановления, перестает окислять углерод топлива и переходит в газ, заменяя СО объем за объем, отчего % содержания азота не меняется; оно вскоре начнет понижаться, однако, от затянувшегося, вследствие плохой теплопроводности известняка, разложения флюса. Разложение углекислых солей флюса увеличивает в газе сумму CO_2 и СО, понижая содержание азота и — тем значительнее, чем больше флюса идет в шихту, с одной стороны, и чем удобовосстановимее руда, — с другой. Максимум эта сумма и, в частности, CO_2 в ней достигается при работе печи с бурым или удобовосстановимым красным железняком, как рудами, содержащими железо в состоянии высшей степени окисления; магнитный железняк и шлаки, в которых имеются и Fe_3O_4 и FeO (последняя — в соединении с кремнеземом), дают меньше кислорода на одно и то же количество восстанавливающегося железа, что понижает содержание CO_2 в газах.

Наконец, при работе на древесном угле к продуктам горения и восстановления присоединяется большое количество продуктов сухой перегонки — до 500 куб. м на 1 тонну древесного угля, — что самым существенным образом меняет состав входящих через колошник газов, резко понижая в них содержание азота (до 50, иногда 49%), вследствие увеличения CH_4 и H_2 главным образом (содержание последнего может доходить до 10%, обычно оно около 7-8%). Понижается несколько и сумма $\text{CO}_2 + \text{CO}$, но отношение в ней $\text{CO}_2 : \text{CO}$ изменяется незначительно и притом, в зависимости от качества угля, различно: уголь, пережженный в печах при низкой температуре, дает летучие продукты с более высоким содержанием CO_2 , чем хороший кучной уголь; последний дает мало газов вообще и в составе их мало CO_2 (см. стр. 113-114), что понижает отношение $\text{CO}_2 : \text{CO}$ в конечном составе газов, тогда как печной уголь или не меняет его, или слегка повышает, смотря по температуре, при которой он получен.

Содержание летучих веществ в хорошем коксе настолько незначительно, что выделение их почти не отзывается на составе колошниковых газов.

Как видно из предшествующего, пять факторов устанавливают состав газов, отработавших в доменной печи: 1) расход углерода топлива, 2) количество углекислых солей в шихте, почти всегда вносимых флюсом, 3) относительное равновесие восстановления при высокой температуре, т. е. на счет

твердого углерода, 4) степень окисления железа в руде, 5) количество и состав летучих веществ горючего. Зная всегда 4 фактора и задаваясь неизвестным пятым, т. е. степенью восстановления железа твердым углеродом (количества восстановляющихся Si, Mn и P даются анализом чугуна), можно определять состав колошниковых газов расчетом по методу профессора М. А. Павлова. Ниже даются 3 примера такого расчета для 3 характерных случаев практики.

1. Определение состава колошниковых газов

Пример 1. Работа южных печей Союза, выплавляющих мартеновский чугун.

	C	Si	Mn	P	S	Fe
А. Состав чугуна	3,65	1,0	2,0	0,1	0,005	93,0%
	C	H ₂	O ₂	N ₂	Зола и влага	
Б. Состав кокса	82,6	0,601	0,699	0,5	15,6%	

Состав газов, выделяемых горючим (по Ч. Беллу)

CO ₂	CO	OH ₄	H ₂	N ₂	
35	37	4	6	18	(весовых)

Количество этих газов — 1,5% веса кокса.

В. Относительный расход кокса — 1,0

Г. Степень окисления руды: 100% железа поступает в шихту в виде Fe₂O₃.

Д. Относительный расход CaCO₃: 0,357.

Е. Относительное развитие восстановления твердым углеродом: $\frac{1}{2}$ всего железа восстанавливается твердым углеродом из FeO.

Прежде всего определяется:

а) Количество элементов, уносимое летучими веществами из кокса.

C в газах:	$\frac{3}{11} \cdot 35 + \frac{3}{7} \cdot 37 + \frac{3}{4} \cdot 4 = 28$	на 1,5 кг
		0,436 кг C
O ₂ „ „	$\frac{8}{11} \cdot 35 + \frac{4}{7} \cdot 37 = 46,6$	0,699 кг O ₂
H ₂ „ „	$6 + 4 : 4 = 7,0$	0,185 кг H ₂
N ₂ „ „	$18 = 18,0$	0,270 кг N ₂
	<hr/>	<hr/>
	100,0	1,500

УДУНТ
(ДМЕТ)

б) Количество элементов, вносимое коксом в печь.

На 1000 кг чугуна при расходе кокса 1,0—

	C	H ₂	O ₂	N ₂
кокс вносит с собою в печь:	826,00	6,01	6,99	5,00
удаляется в летучих веществах	4,26	1,05	6,99	2,70
Остается в печи:	821,74	4,96	0,00	2,30

Затем последовательно находятся:

в) Количество углерода, сжигаемого в печи
При расходе кокса=1,0 в печь на 1000 кг чугуна:

- 1) Вносится 821,740 кг С.
- 2) Затрачивается на образ. 8 кг CH₄¹⁾ 6,000 кг С.
- 3) Растворяется в чугуне 38,500 кг С.
- 4) Сжигается в печи шихтой и дутьем 777,240 кг С.
- 5) Восстановление водорода в верхних горизонтах печи по реакции: 2H₂O + C = 2H₂ + CO₂ требует на 2,5 кг H₂²⁾:

$$2,500 \cdot 3 = 7,500 \text{ кг С}$$

6) Восстановление кремния по уравнению SiO₂ + 2C = Si + 2CO требует на 10 кг кремния:

$$10 \cdot 24 : 28,3 = 8,480 \text{ кг С.}$$

7) На восстановление марганца по уравнению: MnO + C = Mn + CO расходуется (на 20 кг Mn):

$$20 \cdot 12 : 55 = 4,364 \text{ кг С.}$$

8) Восстановление фосфора из P₂O₅ по уравнению: P₂O₅ + 5C = P₂ + 5CO требует на 1 кг его:

$$1 \cdot 60 : 62 = 0,968 \text{ кг С.}$$

9) Восстановление из FeO половины (по заданию) всего железа твердым углеродом по уравнению FeO + C = Fe + CO требует на 930: 2 кг железа:

$$465 \cdot 12 : 56 = 99,643 \text{ кг С.}$$

1) Взято такое количество, чтобы получить обычное содержание CH₄ в газах — около 0,3%.

2) Взято такое количество, чтобы получить обычное содержание H₂ в газах — около 2,5%

10) Всего твердого углерода расходуется 120,955 кг С.

11) Поэтому, до фурм доходит и сжигается кислородом дутья:

$$777,240 - 120,935 = 656,285 \text{ кг С.}$$

(Это составляет: $656,285 \cdot 100 : 777,24 = 84,4\%$ всего сжигаемого углерода, что близко к максимуму).

г) Образование CO_2 восстановлением и разложением.

12) По уравнению (предполагая Mn в состоянии MnO_2 , если не указано, что он находится в шихте в виде Mn_3O_4): $\text{MnO}_2 + \text{CO} = \text{MnO} + \text{CO}_2$ на 55 кг Mn образуется 22,4 м³ CO_2 , а всего на $4/3 \cdot 20$ кг Mn^1 :

$$4/3 \cdot 20 \cdot 22,4 : 55 = 10,860 \text{ м}^3 \text{ CO}_2.$$

13) По уравнению $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{FeO} + \text{CO}_2$ на 2,56 его образуется 22,4 м³ CO_2 , а на 930 кг его получается:

$$930 \cdot 22,4 : 112 = 186,000 \text{ м}^3 \text{ CO}_2.$$

14) По уравнению $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ восстановление (по заданию) $1/2$ всего Fe из FeO дает:

$$465 \cdot 22,4 : 56 = 186,000 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

15) Всего восстановление окислов металла дает:

$$185,000 + 186,000 + 10,860 = 382,860 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

16) Разложением кокса (выделение летучих веществ) получается:

$$15,35 \cdot 22,4 : 44 = 2,673 \text{ м}^3 \text{ CO}_4$$

17) Разложение водяных паров в верхних горизонтах даст по п. 5:

$$7,5 \cdot 22,4 : 12 = 14,000 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

18) Разложение флюса дает:

$$357 \cdot 22,4 : 100 = 79,968 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

19) Всего разложением получится CO_2 96,641

¹⁾ Предполагая выход марганца 75% на 100 руды, т. е. принимая во внимание и восстановление Mn, переходящего в шлак в виде MnO .

НБ
УДУНТ
(ДМЕТ)

20) Итого углекислоты получается по п. п. 15 и 19:

$$382,860 + 96,641 = 479,501 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

д) Образование CO.

21) По уравнению п. 6 на 28,3 кг кремния образуется $2 \cdot 22,4$ куб. м CO, а на 10 кг его получится:

$$10 \cdot 2 \cdot 22,4 : 28,3 = 15,830 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

22) По уравнению п. 7 на 55 кг Mn образуется 22,4 м³ CO, а на 20 кг его получится:

$$20 \cdot 22,4 : 55 = 8,145 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

23) По уравнению п. 8 на 62 кг фосфора образуется $5 \cdot 22,4$ м³ CO, а на 1 кг его получится:

$$1 \cdot 5 \cdot 22,4 : 62 = 1,806 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

24) По уравнению п. 9 (на 56 Fe образуется 22,4 куб. м CO, а на 465 кг (или $\frac{1}{2}$ всего Fe):

$$465 \cdot 22,4 : 56 = 186,000 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

25) Сжигается непосредственно дутьем у фурм 656,286 кг CO (вывод п. 11), что дает:

$$656,286 \cdot 22,4 : 12 = 225,065 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

26) Всего окислением углерода получается (по п. п. 21...26)

$$1436,846 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

27) Разложением кокса дается:

$$15,0 \cdot 37,22,4 : 28 = 4,440 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

28) Но на образование CO₂ уходит (по выводу п. 15) 382,860 м³ CO, поэтому в газах остается (по п. п. 27, 20 и 27)

$$1436,846 - 382,860 + 4,440 = 1058,426 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

е) Образование метана.

29) Превращением 6 кг C в CH₄ (по заданию) получено:

$$6,22,4 : 12 = 11,2 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$$

30) Летучие вещества кокса дают:

$$15 \cdot 0,04 \cdot 22,4 : 16 = 0,84 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$$

31) Всего получается:

$$11,2 + 0,84 = 12,040 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$$

ж) Образование водорода.

32) Разложением влаги дутья (определено ниже в п. 41) получается:

$$0,01 \cdot 2877,094 = 28,771 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

33) Разложением водяного пара в верхних горизонтах печи по ур-нию 5 получается:

$$2,5 \cdot 22,4 : 2 = 28,000 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

34) Летучие вещества кокса и избыток водорода в них дадут:

$$(15 \cdot 0,06 + 4,96) 22,4 : 2 = 65,632 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

35) На образование CH_4 затрачивается (по п. 31)

$$2 \cdot 12,040 = 24,080 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

36) Всего свободного водорода в газах:

$$28,771 + 28,000 + 65,632 - 24,080 = 98,323 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

з) Количество азота и дутья.

37) По п. 25 у фурм образуется всего 1225,065 $\text{м}^3 \text{ CO}$, что требует:

$$1225,065 : 2 = 612,533 \text{ м}^3 \text{ O}_2$$

38) При содержании 1% об. влаги в дутье, оно заключает в себе 78,21% N_2 и 21,29% O_2 (см. ниже состав воздуха). Поэтому дутьем вносится азота:

$$612,533 \cdot 78,21 : 21,29 = 2250,175 \text{ м}^3 \text{ N}_2$$

39) Азот летучих веществ составит вместе с избытком азота кокса:

$$15 \cdot 0,18 \cdot 22,4 : 28 + 2,3 \cdot 22,4 : 28 = 4,000 \text{ м}^3 \text{ N}_2$$

ИЗДАНИЕ
УДУНТ
(ДИМЕТ)

40) Всего азота в колошниковых газах:

$$2250,175 + 4,000 = 2254,175 \text{ м}^3 \text{ N}_2$$

41) Водород влаги дутья составит (по отношению 1 : 78,21 к количеству азота)

$$1 \cdot 2250,175 : 78,21 = 28,771 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

$$42) \text{ Объем влажного дутья} = (\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2 : 2) = 612,533 + 2250,175 + 28,771 : 2 = 2877,094 \text{ м}^3$$

и) Количество и состав газов в объемных % %

43) CO ₂ . .	479,501	куб. м или	12,3%	} 39,5%
44) CO . .	1061,141	„ „	27,2 „	
45) CH ₄ . .	12,040	„ „	0,3 „	
46) H ₂ . .	98,323	„ „	2,5 „	
47) N ₂ . .	2254,175	„ „	57,7	
	3905,180		100,0	

48) Газов приходится на 1 кг кокса (и 1 кг чугуна в данном случае):

$$3905,180 : 1000 = 3,91 \text{ м}^3$$

49) Дутья:

$$2877,094 : 1000 = 2,877 \text{ м}^3$$

50) Отношение объема газов к объему дутья:

$$3,91 : 2,877 = 1,36^1)$$

к) Последовательное изменение состава и количества колошниковых газов.

	Горение у фурм		Восстановление тверд. углеродом		Восстановление окисью углерода	
	куб. м	%	куб. м	%	куб. м	%
CO ₂	—	—	—	—	382,860	10,3
CO	1225,065	34,96	1436,846	38,6	1053,986	28,3
CH ₄	—	—	—	—	—	—
H ₂	28,771	0,82	28,771	0,8	28,771	0,8
N ₂	2250,175	64,22	2260,175	60,6	2250,175	60,6
Всего	3504,011	100,00	3715,792	100,00	3715,792	100,6

¹⁾ Отношение это близко к нормальному, но несколько ниже его.

УДУНТ
(ДМет)

	Разложение флюса		Разложение воды		Присоед. летучих	
	куб. м	%	куб. м	%	куб. м	%
CO ₂	462,828	11,8	476,828	12,1	479,501	12,3
CO	1053,986	28,1	1053,986	27,7	1061,141	27,2
CH ₄	—	—	11,200	0,3	13,040	0,3
H ₂	28,771	0,8	56,771	1,5	98,323	2,5
N ₂	2250,175	59,3	2250,175	58,4	2254,175	57,7
Всего	3725,710	100,0	3848,960	100,0	3905,180	100,0

Состав воздуха, принятый для расчета: 21% O₂ + 79% N₂, что даст при 1% влаги:

O ₂ . . .	21.0,99 = 20,79%	или 21,29%
N ₂ . . .	79.0,99 = 78,21%	или 78,21%
H ₂ O	1,00	H ₂ 1,00%
	10,00	100,50

Количество влажного дутья =

$$O_2 + N_2 + H_2 : 2$$

Пример 2. Работа южной печи при выплавке ферромангана.

А. Состав чугуна.

C	Si	Mn	P	S	Fe
6,0	0,5	80	0,2	0,01	ост. %

Б. Состав кокса: углерода (всего) 82,6%; газов H₂ (свободный водород) 0,4% весовых.

В. Относительный расход горючего — 2,45.

Г. Относительный расход CaCO₃ — 0,7.

Д. Относительное восстановление твердым углеродом и газами: все железо получается из металлического скрапа, а $\frac{4}{3}$ Mn чугуна восстанавливаются до MnO газами, Mn чугуна = твердым C.

а) и б) Количество элементов, вносимых в дом. печь 1000 кг кокса.

$$C = 826 \text{ кг.} \quad H_2 = 4 \text{ кг.}$$

в) Количество C, сжигаемое в печи при относительном расходе горючего 2,45.

1) Вносится в печь горючим $826 \cdot 2,45 = 2023,7$ кг C.

НЕ
УДУНТ
(ДИАМЕТР)

2) Идет на образование $\text{CH}_4^1)$

$$\frac{12}{16} y = 0,75 y \text{ ,, ,,}$$

3) Уходит в чугун 60 ,, ,,

4) Сжигается в дом. печи шихтой и дутьем

$$1963,7 - 0,75 y \text{ кг С}$$

5) Количество $(\text{SiO}_2 + 2\text{C} = 2\text{CO} + \text{SiC})$, необходимое для восстановления кремния по реакции:

$$5.2.12 : 28 = 4,29 \text{ кг С.}$$

6) Для восстановления Mn по реакции: $\text{MnO} + \text{C} = \text{CO} + \text{Mn}$

$$800.12 : 55 = 174,55 \text{ кг С}$$

7) Для восстановления P $(\text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{C} = 5\text{CO} + \text{P}_2)$

$$\frac{2.60 : 62 = 1,945}{180,78}$$

8) Для образования x кг H_2 по реакции $2\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$

$$12x : 4 - 3 \text{ кг С}$$

9) Восстановления Fe не происходит (берется из скрапа).

10) и 11) Сгорает у фурм:

$$1963,7 - 0,75y - 180,78 - 3x = 1782,92 - 0,75y - 3x \text{ кг С}$$

г) Количество CO, получаемое от прямого восстановления:

12) кремния: $5.2.22,4 : 28 = 8,00 \text{ куб. м CO}$

13) марганца: $800.22,4 : 55 = 325,84 \text{ ,, ,, ,,}$

14) фосфора: $2.5.22,4 : 62 = 3,62 \text{ ,, ,, ,,}$

$$\text{Всего . . . 337,46}$$

1) Расчет разложения воды ведется так, чтобы получить в газе 0,2% CH_4 и 3% H_2 ; так как количество газа очень велико и его заранее трудно угадать, то приходится задаваться неизвестными x и y .

$$15) \text{ Образуется CO у фурм}^1) \frac{(1782,92 - 0,75y - 3x)22,4}{12} =$$

$$= 3338,18 - 1,4y - 5,6x$$

16) Всего CO будет:

$$337,46 + 3328,18 - 1,4y - 5,6x = 3665,64 - 1,4y - 5,6x$$

д) Образование CO_2 разложением и восстановлением.

17) По реакции $2\text{H}_2\text{O} + \text{C} = 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$ получается;

$$22,4 \cdot 3x : 12 = 5,6x \text{ м}^3$$

18) Из флюса: $700 \cdot 22,4 : 100 = 156,8$

19) По реакции $\text{MnO}_2 + \text{CO} = \text{MnO} + \text{CO}_2$

$$\frac{3/4 \cdot 800 \cdot 22,4}{55} = 434,4211 \text{ м}^3$$

20) Всего CO_2 $591,22 + 5,6x \text{ м}^3 \text{ CO}_2$

21) Количество CO, не перешедшее в CO_2

$$3665,64 - 434,42 - 5,6x - 1,4y = 3231,22 - 5,6x - 1,4y$$

е) и ж) Присоединение CH_4 и H_2 .

22) При сгорании кокса выделяется

$$4 \cdot 2,45 \cdot 22,4 : 2 = 109,76 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

23) От разложения H_2O шихты получается

$$22,4x : 2 = 11,2x \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

24) Образование CH_4

$$22,4y : 16 = 1,4y \text{ м}^3 \text{ CH}_4$$

25) Всего из кокса от разложения воды получается H_2 и CH_4

$$109,76 + 11,2x + 1,4y \text{ м}^3$$

1) Восстановление железа отсутствует.

з) Дутье и вносимое им количество H_2 .

26) Количество O_2 для сжигания С в СО у фурм

$$(3328,18 - 5,6x - 1,4y) : 2 = 1664,09 - 2,8x - 0,7y$$

27) Количество N_2 (1% влаги в дутье) получается

$$(1664,09 - 2,8x - 0,7y) \cdot 78,21 : 21,29 = 6113,03 - 10,2858x - 2,5714y$$

28) Количество H_2 от влаги дутья

$$(1664,09 - 2,8x - 0,7y) : 21,29 = 78,16 - 0,1315x - 0,0328y$$

29) Объем дутья = $(O_2 + N_2 + H_2 : 2) = 7632,36 \text{ м}^3$ (см. ниже п. п. 26—28 и 34)

и) Общее количество и состав газов.

$$CO = 3231,22x - 5,6x - 1,4y.$$

$$CO_2 = 591,22 + 5,6x$$

$$H_2 = 78,16 + 109,76 + (11,2 - 0,1315)x - 0,0328y = 187,92 + 11,0685x - 0,0328y$$

$$CH_4 = 1,4y$$

$$N_2 = 6113,03 - 10,2858x - 2,5714y$$

$$CO_2 + CO + H_2 + CH_4 + N_2 = 10123,39 + 0,787x - 2,6042y \text{ м}^3$$

По заданию водорода д. б. 3% объема газов, поэтому:

$$\frac{H_2 \cdot 100}{\text{Сумма газов}} = \frac{(187,92 + 11,0685x - 0,0328y) \cdot 100}{10123,39 + 0,7827x - 2,6042y} = 3$$

$$18792 - 1106,85x - 3,28y = 30370,17 + 2,3481x - 7,8126y$$

$$1104,5019x + 45326y = 11578,17$$

Болотного газа должно быть 0,2%, поэтому:

$$\frac{CH_4 \cdot 100}{\text{Сумма газов}} = \frac{1,4y \cdot 100}{10123,39 + 0,7827x - 2,602y} = 0,2$$
$$140y = 2024,68 + 0,15654x - 0,5208y$$
$$139,4792y = 2024,68 + 0,15654x$$
$$y = \frac{2024,68 + 0,15654x}{139,4792}$$

к) Последовательность изменения количества и % состава газов

	Горение у фурм	Восстановлен. твердым С	Восстановлен. СО	Разложение флюса	Разложение H ₂ O пара	Выделение летучих
CO	3928,1767 — — 1,4у — 5,6х = = 3249,47	3665,6367 — — 1,4у — 5,6х = = 3586,93	3231,215 — — 1,4у — 5,6х = = 3152,51	3152,51	3152,51	3152,51
CO ₂	—	—	434,42	591,22	591,2217 + + 5,6х = 649,59	649,5
H ₂	78,169 — 0,1315х — — 0.0328 + у = 76,318	76,32	76,32	76,32	76,3258 + + 11,2х = 193,04	193,04 + + 109,76 = = 302,8
CH ₄	—	—	—	—	—	20,34
N ₂	6113,0283 — — 10,285х — — 2,5714у = = 5968,47	5968,47	5968,47	5968,47	5968,47	5968,47
Всего . .	9294,25	9631,72	9631,72	9788,52	9963,61	100093,71
В п р о ц е н т а х						
CO	34,96	37,24	32,73	32,21	31,64	31,23
CO ₂	—	—	4,51	6,04	6,52	6,44
H ₂	0,82	0,79	0,79	0,78	1,94	3,00
CH ₄	—	—	—	—	—	0,20
N ₂	64,22	61,97	61,97	60,97	59,90	59,13
Всего . .	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

НЕ
УДАНТ
(ДМЕТ)

Откуда:

$$x = 10,4228; \quad y = 14,5276$$

26 bis) Количество кислорода дутья:

$$1664,09 - 2,8 \cdot 10,4228 - 0,7 \cdot 14,5276 = 1624,74 \text{ м}^3$$

27 bis) Количество водорода дутья:

$$78,16 - 0,1315 \cdot 10,4228 - 0,0328 \cdot 14,5276 = 76,30 \text{ м}^3$$

28) CO : $3231,215 - 5,6 \cdot 10,4228 - 1,4 \cdot 14,5276 =$

$$= 3152,51 \text{ м}^3 \quad 31,23\%$$

29) CO₂ $591,2217 + 5,6 \cdot 10,4228 = 649,59 \text{ м}^3 \quad 6,44\%$

30) CH₄ $1,4 \cdot 14,5276 = 20,34 \text{ м}^3 \quad 0,20\%$

31) H₂ $187,9229 + 11,0685 \cdot 10,4228 -$

$$- 0,0328 \cdot 14,5276 = 302,8 \text{ м}^3 \quad 3,00\%$$

32) N₂ $6113,0283 - 10,2858 \cdot 10,4228 -$

$$- 2,5714 \cdot 14,5276 = \underline{5966,47 \text{ м}^3 \quad 59,13\%}$$

33) Всего $10091,71 \text{ м}^3 \quad 100,00\%$

34) Газа на 1 кг кокса $10091,71 : 2450 = 4,12 \text{ м}^3$

35) Дутья „ „ „ $7629,36 : 2450 = 3,12 \text{ „}$

36) Отношение $4,12 : 3,12 = 1,32$

Это — минимум, объясняемый большим расходом горючего.

Пример 3. Расчет колошниковых газов древесно-угольной печи Урала, выплавляющей из магнитного железняка мартеновский чугун.

А. Состав чугуна: C Si Mn P S Fe
 4,3 1,6 2,5 0,07 0,01 91,52%

Б. Состав угля: углерода (всего) 80%; газов: 400 м³
на 1 тонну угля.

УДУНТ
(ДМет)

Состав газов, выделяемых горючим:

CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	
18,6	12,6	10,0	58,0	0,08%	объемных.

В. Относительный расход горючего 1,00.

Г. Относительный расход CaCO₃ (или CO₂) — нуль.

Д. Относительное развитие восстановления твердым углеродом и газами: $\frac{2}{3}$ всего железа восстанавливается твердым углеродом из FeO.

Е. Степень окисления руды: 80% железа в виде Fe₂O₃ и 20% в виде FeO, образующей Fe₃O₄.

а) Количество элементов, уносимое летучими веществами из угля.

В 100 м³ летучих содержится:

$$\begin{array}{l} 98896 \\ \hline \frac{18,6 \cdot 44}{22,4} = 36,535 \text{ кг CO}_2 \\ \frac{12,6 \cdot 28}{22,4} = 15,93 \text{ кг CO} \\ \frac{10 \cdot 16}{22,4} = 7,14 \text{ кг CH}_4 \end{array}$$

Следовательно, уносится летучими из печи (на 1 тонну угля)

$$\begin{array}{l} 36,535 \cdot 1 \cdot 4,00 = 146,14 \text{ кг CO}_2 \\ 15,93 \cdot 1 \cdot 4,00 = 63,72 \text{ кг CO} \\ 7,14 \cdot 1 \cdot 4,00 = 28,56 \text{ кг CH}_4 \end{array}$$

б) Количество углерода, вносимое в печь.

Вносится в печь углем на 1 т чугуна:

$$0,80 \cdot 1000 = 800 \text{ кг C}$$

Уносится летучими веществами:

$$\begin{aligned} \frac{12}{44} \cdot 146,14 + \frac{2}{28} \cdot 63,72 + \frac{12}{16} \cdot 28,66 &= 39,85 + 27,31 + 21,42 = \\ &= 88,58 \text{ кг C} \end{aligned}$$

Остается в печи:

$$800 - 88,58 = 711,42 \text{ кг С}$$

в) Количество углерода, сжигаемое в печи (на 1 т чугуна).

1) Вносится в печь:

$$711,42 \text{ кг С}$$

2) Растворяется в чугуне:

$$0,043 \cdot 1000 = 43,00 \text{ кг С}$$

3) Сжигается в печи шихтой и дутьем:

$$711,42 - 43 = 663,42 \text{ кг С}$$

4) Восстановление SiO_2 по реакции: $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$ требует:

$$\frac{0,016 \cdot 1000}{28,3} \cdot 12 \cdot 2 = 13,57 \text{ кг С}$$

5) Восстановление MnO ($\text{MnO} + \text{C} = \text{Mn} + \text{CO}$) берет:

$$\frac{0,025 \cdot 1000 \cdot 12}{55} = 5,45 \text{ кг С}$$

6) Восстановление P_2O_5 ($\text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{C} = 2\text{P} + 5\text{CO}$):

$$\frac{0,0007 \cdot 1000 \cdot 5 \cdot 12}{2 \cdot 31} = 0,67 \text{ кг С}$$

7) Восстановление $\frac{2}{3}$ всего железа твердым углеродом из FeO по реакции $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ требует:

$$\frac{0,9152 \cdot 1000 \cdot 12 \cdot \frac{2}{3}}{56} = 130,74 \text{ кг С}$$

8) Всего расходуется углерода на реакции восстановления:

$$13,57 + 5,45 + 0,67 + 130,74 = 150,43 \text{ кг С}$$

9) Доходит до фурм и сжигается дутьем:

$$668,42 - 150,43 = 517,99 \text{ кг С}$$

(Это составляет: $100 \cdot 517,99 : 668,42 = 76\%$ сжигаемого в печи углерода).

г) Образование CO_2 процессами восстановления и разложения.

10) По уравнению: $\text{Mn}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{MnO} + \text{CO}_2$, получится CO_2

$$2 \cdot \frac{22,4 \cdot 0,025 \cdot 1000}{3,55} = 6,78 \text{ м}^3 \text{ CO}_2^1)$$

11) По уравнению: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{FeO} + \text{CO}_2$ получается:

$$\frac{22,4 \cdot 0,80 \cdot 0,9152 \cdot 1000}{2 \cdot 56} = 146,43 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

12) По уравнению $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ получается при восстановлении $\frac{1}{3}$ всего железа:

$$\frac{22,4 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,9152 \cdot 1000}{56} = 122,03 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

13) Всего восстановление окислов дает:

$$6,78 + 146,43 + 122,03 = 275,24 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

14) Разложение флюса не имеет места.

15) Разложение угля дает:

$$0,186 \cdot 400 \cdot 1 = 74,4 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

16) Итого получается:

$$275,24 + 74,4 = 349,64 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$$

д) Образование CO .

17) По реакции восстановления Si из SiO_2 ($\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$) получается:

$$\frac{2 \cdot 22,4 \cdot 1,000 \cdot 0,016}{28,3} = 25,32 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

¹⁾ Коэф. 2 взят потому, что при древесно-угольной плавке $\frac{1}{2}$ всего Mn переходит в чугун, а $\frac{1}{2}$ в шлак, восстанавливаясь в MnO .

18) Восстановление марганца ($\text{MnO} + \text{C} = \text{Mn} + \text{CO}$) дает:

$$\frac{22,4 \cdot 0,025 \cdot 1000}{55} = 10,18 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

19) Восстановление P_2O_5 ($5\text{C} + \text{P}_2\text{O}_5 = 2\text{P} + 5\text{CO}$):

$$\frac{22,4 \cdot 5 \cdot 1000 \cdot 0,0007}{2 \cdot 31} = 1,26 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

20) Восстановление $\frac{2}{3}$ Fe твердым углеродом:

$$\frac{22,4 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,9152 \cdot 1000}{56} = 244,05 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

21) Сожигается углерода дутьем у фурм 517,99 кг, что дает:

$$\frac{517,99 \cdot 22,4}{12} = 966,91 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

22) Всего CO получается:

$$966,91 + 244,05 + 1,26 + 10,18 + 25,32 = 1247,72 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

23) Разложение угля (выделение летучих) дает:

$$400 \times 1 \times 0,126 = 50,4 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

24) По ур-ниям п. п. 15), 16) и 19) окисляется в CO_2 :

$$6,78 + 146,43 + 122,03 = 275,24 \text{ м}^3$$

25) Остается в газах:

$$1247,72 + 50,40 - 275,24 = 1022,88 \text{ м}^3 \text{ CO}$$

е) Образование CH_4 .

26) Разложение угля (выделение летучих) дает:

$$0,10 \times 400 \times 1 = 40 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$$

ж) Количество азота (и дутья).

27) У фурм образуется сжиганием углерода $966,91 \text{ м}^3 \text{ CO}$, что требует:

$$955,91 : 2 = 483,45 \text{ м}^3 \text{ O}_2 \text{ и с ним}$$

$$\frac{483,45 \cdot 78,21}{21,29} = 1775,98 \text{ м}^3 \text{ N}_2$$

28) Получается азот из летучих веществ.

$$0,008 \times 400 \times 1 = 3,2 \text{ м}^3$$

29) Всего азота в газах:

$$1775,98 + 3,2 = 1779,18 \text{ м}^3$$

30) Водород влаги дутья составит $1:78,21$ количества азота дутья, т. е.:

$$1779,18 : 78,21 = 22,71 \text{ м}^3$$

31) Объем влажного дутья:

$$483,45 + 1775,28 + 11,36 = 2271,09 \text{ м}^3$$

з) Образование H_2 .

32) Разложение влаги дутья дает:

$$22,71 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

33) Из летучих веществ угля берется:

$$400 \times 1 \times 0,58 = 232,00 \text{ м}^3 \text{ H}_2$$

34) Всего свободного водорода в газах:

$$22,71 + 232,00 = 254,71 \text{ м}^3$$

и) Количество и состав (в объемн. %) газов.

CO_2	—	349,64	м^3	=	10,1%	} 39,8%
CO	—	1 022,88	"		29,7%	
CH_4	—	40,00	"		1,2	
H_2	—	254,71	"		7,4	
N_2	—	1 779,18	"		51,6	
				<hr/>		
				3 446,41	100,00%	

35) Газов приходится на 1 кг угля

$$3446,41 : 1000 = 3,446 \text{ м}^3$$

36) Дутья на 1 кг угля:

$$2271,0 : 91000 = 2,271 \text{ м}^3$$

37) Отношение объема газов к объему дутья:

$$3446,41 : 2271,09 = 1,51$$

Это — самое высокое отношение, объясняемое влиянием летучих веществ древесного угля.

2. Влияние отдельных факторов на состав газов

Пользуясь изложенным выше методом расчета состава газов, можно для всяких данных условий работы печей (состав чугуна, качество руды) установить пределы, в которых может колебаться содержание составных частей газа при возможных изменениях тех или иных факторов и тем контролировать работу аналитиков и исправлять ошибки в расчетах, вызванные дававшимися ими неправильным составом газов (теплопроизводительная способность, количество газов, количество дутья, расход газа для разных потребностей, общий запас энергии в них и проч.). Сделав такие расчеты для условий, в которых работают наши южные печи при выплавке мартеновского чугуна (1% Si и 2% Mn), влияние отдельных факторов можно усмотреть из нижеследующих результатов расчета.

1. Расход горючего

Первые же опубликованные Л. Белл данные о составе газов кливлендских доменных печей позволили Грюнеру установить зависимость состава газов от расхода горючего: увеличение последнего уменьшает содержание углекислоты в газах и обратно — увеличение в них % CO_2 указывает на переход к более экономичной работе, с меньшим расходом горючего. Вывод этот не безусловно правилен, так как состав газов регулируется 5 факторами, и, чтобы установить влияние расхода горючего на состав газа, нужно принять в расчет, что все другие факторы не меняются. Сделавши это для случая работы наших южных печей на мартеновский чугун (2% Mn и 1% Si)

при восстановлении твердым углеродом $1/2$ всего железа и расходе CaCO_3 0,357, получим такой состав газов:

CO_2	CO	CH_4	H_2	N_2	$\text{CO}_2 + \text{CO}$	Расход кокса
11,55	27,75	0,31	1,85	58,44	39,40 %	1,0
9,60	29,01	0,30	1,84	59,34	38,51	1,2

От увеличения расхода кокса произошло увеличение количества углерода, дошедшего до фурм, остюда — увеличение количества азота, полученного печью, и понижение % содержания в газах суммы $\text{CO}_2 + \text{CO}$; но в этой сумме % содержания CO_2 стало меньше, так как восстановление газами осталось, по предположению, прежним, а объем газов увеличился, поэтому и отношение $\text{CO}_2 : \text{CO}$ в газах понизилось. Обратное: сокращение расхода горючего при всех равных обстоятельствах неизменно повышает это отношение, почему оно и было принято за характеристику степени экономичности (в отношении расхода горючего) Г р ю н е р о м.

2. Расход флюса (известняка)

Влияние этого фактора очевидно: углекислота флюса присоединяется к CO_2 , как продукту восстановления, увеличивает % содержания CO_2 в газах, понижая слегка % содержания а ота с увеличением суммы $\text{CO}_2 + \text{CO}$. Насколько резко это отзывается в анализе газов, видно из следующих цифр:

	I	II	III	IV	V
Расход CaCO_3	0,357	0,0	0,0	0,206	0,412
CO_2	11,65	9,80	9,6	12,1	14,3
CO	27,75	28,34	28,8	28,1	27,3
CH_4	0,31	0,32	1,5	1,4	1,4
H_2	1,85	1,89	5,3	5,1	5,1
N_2	58,44	59,65	54,8	53,3	51,9
$\text{CO}_2 + \text{CO}$	39,40	38,14	38,4	40,2	41,6

Анализы I и II относятся к газам наших южных печей: первый дает состав при нормальном расходе флюса (при расходе кокса 1 и восстановления $1/2$ всего железа твердым углеродом), а второй — в случае полного обжига флюса, т. е. без добавления CO_2 из флюса. Анализы III, IV и V относятся к случаю работы на древесном угле (расход 1,0) с нормальным расходом флюса (IV), с удвоенным (V), что возможно при работе на бедной руде, и, наконец, с обожженным флюсом (III). Сте-

пень восстановления железа твердым углеродом везде принята одинаковой ($1/2$).

Как видно из этих примеров, бедная руда, требуя много флюса, может создать обманчивое впечатление хорошего (экономического) хода печи.

3. Степень прямого восстановления

Нижеследующие анализы относятся к случаям работы южных печей на коксе при 3 различных степенях восстановления твердым углеродом (расход горючего 1,0, флюса — 0,357; состав чугуна — как прежде).

Степень восстановления	0,25	0,50	0,75
CO ₂	13,45	11,65	9,71 %
CO	24,25	27,75	31,46 %
CH ₄	0,30	0,31	0,32 %
H ₂	1,83	1,85	1,88 %
N ₂	60,07	58,44	56,63 %
CO ₂ + CO	37,70	39,40	41,17 %

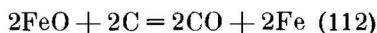
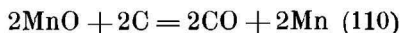
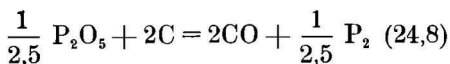
Степень прямого восстановления 0,50 — обычная для многих случаев практики, но не для наших южных печей, которые лишь изредка дают газ, содержащий 11,65 % CO₂ (при расходе кокса 1,0); это значит, что степень восстановления на счет твердого С превышает у нас 0,5; часто она выражается числом 0,6 и бывает даже несколько больше. Степень 0,75 не достигается у нас (она взята для расчета, как крайний предел), содержание же CO₂ бывает в газе 9% и даже меньше, но это зависит от большего расхода кокса (более 1,0). Первая колонка цифр дает состав газа идеальный: степень восстановления 0,25 почти нигде не достигается в действительности.

Как видно из 3 колонок цифр, содержание CO₂ быстро растет по мере увеличения восстановления окисью углерода, причем растет и азот, вследствие того, что увеличивается количество углерода, доходящее до фурм, а вместе с этим — и количество дутья. Обратно, по мере развития восстановления твердым углеродом все большее количество углерода сжигается кислородом руды, уменьшается количество дутья и вносимого им азота, отчего увеличивается сумма CO₂ + CO; но в этой сумме с уменьшением количества CO₂ увеличивается содержание CO, поэтому отношение CO₂:CO резко падает.

Наблюдения над изменением состава газов через небольшие промежутки времени показывают, что отношение CO₂:CO в них постоянно меняется, так как содержание CO₂ и CO колеблется. Имея ввиду, что расход горючего и флюса, равно

как и степень окисления руды, остаются постоянными, изменения в составе газов через короткие промежутки времени могут быть объяснены только изменением степени прямого восстановления, что указывает на постоянное изменение в распределении газов между кусками восстанавливаемой руды.

Состав чугуна оказывает влияние на состав газов постольку, поскольку в нем изменяется отношение между железом, кремнием, марганцем и фосфором. Так как эти элементы восстанавливаются только на счет твердого углерода, то увеличение их содержания в чугуне уменьшает количество азота и повышает сумму $\text{CO} + \text{CO}_2$, но — в разной степени, смотря по роду элемента. Это видно из уравнений восстановления:



Таким образом, 1% Fe, полученный путем прямого восстановления, образует столько же CO, сколько $\frac{110}{112} = 0,99\%$ Mn,

или $\frac{24,8}{112} = 0,22\%$ P, или $\frac{28,3}{112} = 0,25\%$ Si. Следовательно, по-

вышение содержания Mn мало влияет на состав газов по сравнению с P и Si. При выплавке фосфористых, марганцовистых и кремнистых чугунов сумма $\text{CO} + \text{CO}_2$ должна возрастать, но при этом действует и противоположный фактор — расход горючего, — который тоже возрастает при выплавке этих чугунов, стремясь понизить сумму $\text{CO} + \text{CO}_2$, которая может упасть до минимума при одновременном уменьшении отношения $\text{CO}_2 : \text{CO}$.

4. Степень окисления руды

При одинаковом количестве железа, восстановленного газами, в них будет тем меньше углекислоты, как продукта восстановления, чем меньше кислорода было связано с железом.

	I	II
Руда содержит:	Fe_2O_3 100%	Fe_3O_4 50% + Fe_2O_3 50%
Состав газов:	$\text{CO}_2 = 11,65\%$	10,85%
	$\text{CO} = 27,75\%$	28,55%
	$\text{CO} + \text{CO}_2 = 39,40\%$	39,40%
	$\text{CO}_2 : \text{CO} = 0,42$	0,38

Как видно из приведенного примера, степень окисления железа в руде не влияет на сумму $\text{CO}_2 + \text{CO}$, но меняет отношение $\text{CO}_2 : \text{CO}$.

Обжиг магнитных железняков обыкновенно не вполне переводит Fe_3O_4 в Fe_2O_3 (в Швеции, например, только около половины магн. окиси переходит в Fe_2O_3), поэтому при работе на магнитном железняке газы всегда беднее углекислотой, чем при работе на буром железняке. Большое количество сварочного шлака еще заметнее меняет состав газов.

5. Летучие вещества горючего

Количество летучих веществ в коксе ничтожно и колебание их количества практически не влияет на состав колошниковых газов. Влияние газов сухой перегонки весьма значительно при древесноугольной плавке: чем ниже температура перегуливания дров (печной уголь), тем выше будет в угле количество газов и содержание CO_2 в них. Особенно резко замечается повышение отношения $\text{CO}_2 : \text{CO}$ при замене части угля дровами. К такой замене иногда приходилось прибегать в доменной практике при случайном уменьшении угольного запаса у доменной печи. Бывали случаи намеренной добавки дров к углю, даже когда имелось его достаточно, — в результате всегда наблюдалось повышение % содержания CO_2 в газах. При этом водород, которого по весу заключается в угле немного, будучи легким газом, сильно понижает % содержания ($\text{CO}_2 + \text{CO}$). По количеству H_2 в газах при прочих равных условиях можно судить о качестве древесного угля, сжигаемого в печи. Нормально на Урале бывает H_2 около 7—8% при 52—50% азота в колошниковом газе. Сухой и сильно обожженный уголь дает H_2 до 5%, а азота до 53%; при слишком низкой температуре выжигает % H_2 в газах повышается до 10%.

Чтобы показать, как меняется состав газа процессом сухой перегонки угля, ниже приводятся результаты расчета для 2 случаев практики:

1. Шведская плавка на хорошем кучном угле, содержащем 83,6% C (и только 5,8% O_2); работа на бедном магнитном железняке, требовавшая расхода угля 1,0. Расход флюса (CaCO_3) в обоих случаях 0,18; степень прямого восстановления γ .

2. Выплавка чугуна из богатой бакальской руды на южно-уральском заводе; уголь печной, содержащий всего 79% С (17 O₂); расход его 0,87.

	1		2	
	До выделения	После выделения летучих	До выделения	После выделения летучих
CO ₂	11,39	11,03	15,91	16,30%
CO	28,10	26,99	25,15	23,36 „
CH ₄	—	0,96	—	1,12 „
H ₂	0,76	5,82	0,75	8,89 „
N ₂	59,75	55,20	58,19	50,03 „
CO ₂ +CO	39,49	38,02	41,06	39,66 „
Количество газа на 1 кг чугуна	3,62 м ³	3,92 м ³	2,62 м ³	3,06 м ³

3. Конечный состав газов

Так как он зависит от 5 факторов, то разные составные части в отдельности колеблются в очень широких пределах. Иногда все факторы, в двух сравниваемых случаях, действуют в одну сторону, иногда они противодействуют друг другу: в первом случае обнаруживается резкая разница в составе газов, во втором — газы могут иметь одинаковый состав (содержание CO₂ или суммы CO₂+CO) при разном расходе горючего, или различный состав при одинаковом расходе. В нижеследующей табличке даны примеры того и другого; первые три колонки анализом относятся к условиям работы древесноугольных печей.

	1	2 и 3	4	5	6
CO ₂	15,0	10,3	12,1	9,2	12
CO	24,6	29,0	28,1	30,1	27
CH ₄	1,4	6,5	1,4	0,3	0,8
H ₂	9,4		5,1	2,7	3,9
N ₂	49,6	54,2	53,3	57,7	56,3
CO ₂ +CO	39,6	39,3	40,2	39,3	39,0

Анализ 1 — работа на бакальском буром железняке, 2 — на магнитном железняке горы Высокой; в первом случае расход горючего 0,87, во втором — 1,0; расход флюса в первом 0,18, во втором — 0 (руда самоплавкая); степень восстановления твердым углем во втором случае, конечно, выше, а окисления руды — ниже.

Так как все факторы увеличивают содержание CO_2 в первом случае, то разница в составе газа разительна. Но вторая колонка дает и состав газа, получавшегося при работе на бедном буром железняке Вятского горного округа с расходом древесного угля 1,175. Газ — такой же, как и при работе на богатом Высокогорском магнитном железняке (62%) с расходом горючего 1,0. Удобовосстановимость бурого железняка и употребление известкового флюса уравновесили усиленный расход горючего — результат бедности руды (38—40%).

Анализ 4 дает состав газа от работы на том же буром железняке, но более богатом и с таким же расходом горючего, как на магнитном железняке (1,0); содержание CO_2 получилось более высокое, благодаря большому развитию непрямого восстановления.

Следующие 2 колонки (5 и 6) дают состав газа южных печей СССР и Тульского завода, работающих с одинаковым расходом горючего (немногим более 1,0), но первые — на Криворожском красном железняке, а вторые — буром, весьма удобовосстановимом. Как видно из таблицы, содержание CO_2 в тульском газе гораздо выше, вследствие большего развития непрямого восстановления; оно бывает выше даже в том случае, когда расход кокса в южных печах несколько ниже, чем в тульских, а количество CO_2 в газах первых печей подымается до 10,5 — 11%.

Из вышеизложенного следует, что принимавшееся долгое время, как аксиома, положение Грюнера, что отношение $\text{CO}_2:\text{CO}$ (по весу, обозначавшееся через m) служит мерилем совершенства хода доменной печи в смысле расхода горючего, не всегда оправдывается действительностью и что оно служит лишь мерилем совершенства хода восстановительного процесса газами. При всех одинаковых условиях плавки увеличение отношения $\text{CO}_2:\text{CO}$ сопровождается уменьшением расхода горючего, но при работе на рудах разной степени восстановимости, т.е. с разными степенями прямого восстановления, правило Грюнера нарушается тем, что дефицит тепла от большего развития прямого восстановления возмещается нагревом дутья, что позволяет иметь меньшее использование тепловой энергии углерода (низкое содержание CO_2 в газах) при малом расходе горючего. В каждом частном случае лишь тщательный анализ условий работы доменной печи и выяснение влияния каждого из 5 факторов путем расчета может указать пределы содержания составных частей газа, возможного для данного случая практики.

В руководствах по металлургии часто фигурируют неправильные данные о составе газов. Ошибки анализов объясняются главным образом неточностью определения CO , т.к.

поглощение СО медноаммиачным раствором требует много времени и часто не доводится до конца — после поглощения главной массы СО нужно повторить его со свежим раствором или определить непоглощенный раствором остаток СО путем сжигания, чего обыкновенно не делают. Отсюда — преуменьшение содержания СО и преувеличение содержания N_2 — определяемого по остатку.

Пользуясь преувеличенным отношением $CO_2:CO$ в газах для определения к. п. д. тепла в печах, часто преувеличивали приход тепла и потерю тепла от лучеиспускания. Т. к. не делалось параллельных аналитических расчетов газов, то ошибки химического анализа не замечались и служили источником дальнейших ошибок во всех расчетах ученых-металлургов (количество газов, количество дутья и т. д.).

Во многих учебниках металлургии и в технических статьях делаются ссылки на „средний газ доменной печи по Леденбуру“. Состав его указан в 1-й колонке прилагаемой таблички.

	1	2	3	4	5	6	
CO_2	12%	9,90	16,0	16,33	11,8	12,6	%
СО	24%	27,28	19,9	22,73	30,8	21,0	„
CH_4	2%	0,57	—	0,04	0,2	0,9	„
H_2	2%	3,12	—	1,99	—	2,8	„
N_2	60%	59,13	64,1	58,91	57,2	60,7	„

Это — не средний газ, а невозможный газ, т. к. нет доменных печей, в которых получалось бы одинаковое количество водорода и метана; в коксовых печах бывает 2% водорода, но никогда не бывает 2% CH_4 , такое содержание CH_4 возможно только в древесноугольных печах; но в них никогда не может быть 2% H_2 . Сумма $CO_2 + CO$ в „среднем газе Леденбура“ на 2,5 — 3% меньше нормальной. Поэтому значение N_2 , как среднее, преувеличено до невозможного. Близкое к 60% содержание N_2 может получаться в коксовых печах лишь в редких случаях, при плавке на ферросилиций и ферроманган с очень большим расходом горючего (2,5 — 2,6). Обычное же содержание N_2 в газах коксовых печей 56 — 58%, а в древесноугольных печах 50 — 52% и даже меньше при употреблении плохо обожженного угля и частичной добавке дров.

Позднее появился в литературе „средний газ коксовой доменной печи“, выведенный Веддингом в его учебнике металлургии, как средний из следующих данных: 1) газ Леденбура (и без того „средний“), 2) газ 2 силезских печей, 3) газ одной вестфальской печи и 4) одной рейнской. В 4 анализах (кроме газа Леденбура) не указан CH_4 , в одном не указан и H_2 но так как в газе одной печи показано 6,3% H_2 (чего не

бывает), а в другом — 4% (что бывает очень редко), то вследствие компенсации ошибок получился, хоть и явно искусственный, но возможный по содержанию H_2 и CH_4 газ, однако в отношении окиси углерода он грубо неверен (37,18% суммы $CO_2 + CO$ и потому очень высокое содержание азота, см. кол. 2).

Колонка 3 дает состав газа, опубликованный Гели в 1904 г. и характеризующий (будто бы) ход печи Изабелла на осушенном дутье. Этот состав послужил исходным пунктом для расчетов теплового баланса, произведенных многими, писавшими об осушенном дутье. Т. к. содержание CO указано на 3% меньше возможного, то преувеличенное отношение $CO_2 : CO$ дает больше тепла, чем могла издержать печь, что выразилось невероятно высокой цифрой потери на лучеиспускание. Через 5 лет был опубликован анализ колонки 4, относящийся к той же печи Изабелла, продолжавшей работать на осушенном дутье; но, не дожидаясь этого анализа, проф. М. А. Павлов произвел расчет теплового баланса печи Изабелла (в 1905 г.) в предположении, что определение количества CO_2 в газе Гели было произведено правильно, а сумма $CO_2 + CO$ д. б. равна 39%. Позднейший анализ дает значение этой суммы = 39,06% (кол. 4).

Наконец, колонки 5 и 6 дают совершенно невозможный состав газов древесноугольных печей Швеции и Штирии, хотя и приведенный в книге К л е м е н т с а, изданной в 1929 г.

Расчеты по теории доменного процесса и по вопросам использования тепла доменных газов вне доменного цеха предъявляют теперь строгие требования к точности анализов газов, и если химик не всегда может им удовлетворить, то доменный техник должен контролировать работу химика, корректировать ее и уметь давать точные ответы на вопросы: какова теплопроизводительная способность газа, каково его количество, сколько печь получает дутья, каково полезное действие тепла в доменной печи. Изложенный раньше метод определения состава газа расчетным путем (задаваясь разными степенями прямого восстановления) позволяет установить правильный состав газов для всяких данных условий работы печи. Он же дает возможность выбрать из имеющихся в литературе наиболее достоверные анализы, позволяющие судить о том, с какими газами в определенных условиях практики мы имеем дело.

В прилагаемой таблице даны достоверные анализы газов 13 печей, работающих на минеральном топливе и выплавляющих разные сорта чугуна. Даем краткие пояснения к этим анализам.

1. Кливлендская печь. Характерно для состава газа содержание H_2 , — оно очень низко, благодаря употреблению

АНАЛИЗЫ КОЛОШНИКОВЫХ ГАЗОВ КОКСОВЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Назв. з-да	Кливленд	Иллинойс	Иллинойс	Иллинойс	Гутенберг Юта	Гутенберг Юта	Ворошиловский	Макеевский	Петровского	Тульский	Н. Салдинский	Fe-Mn Макеевский	Иллинойс Fe-Si
№	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
расход кокса	1,12	1,2	1,0	0,8	1,12	1,25	1,1	1,0	1,0	1,05	1,1	2,5	
CO ₂	9,6	10,0	12,67	14,8	8,4	10,9	8,1	9,2	11,1	12,0	9,0	5,1	4,4
CO	31,0	28,5	26,51	25,0	32,1	28,3	31,9	30,1	28,7	27,0	30,1	33,1	33,7
CH ₄	0,2	0,2	0,2	0,22	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	0,8	0,9	0,2	0,2
H ₂	1,2	3,7	3,57	3,59	2,6	2,9	1,9	2,7	2,4	3,9	6,3	2,9	3,4
N ₂	58,0	57,6	57,05	56,39	56,5	57,8	57,7	57,7	57,4	56,3	53,4	58,7	58,3
CO ₂ +CO	40,6	38,5	39,18	39,8	40,5	39,2	40,0	39,3	39,8	39,0	39,1	38,2	38,1

НБ
УДУНТ
(ДМет)

свежеобожженной руды (полное отсутствие влаги) и сухому коксу. Сумма $\text{CO}_2 + \text{CO}$ высока, вследствие восстановления 3% кремния и 1,5% фосфора; содержание азота высоко, благодаря минимуму водорода.

II, III и IV — печь фирмы Иллинойс (Южн. Чикаго). Руда Мисаби, очень легко восстанавливаемая. Содержание в ней гидратной H_2O около 4%, а всего (с влагой) 10—12%. Вследствие разложения H_2O в верхних горизонтах печи газ содержит максимальное количество H_2 . Благодаря удобовосстановимости руды, непрямо́е восстановление (газами) очень развито. Анализы подтверждают закономерность в изменении состава газа с изменением расхода горючего. Характерно высокое содержание CO_2 при расходе горючего 0,8. Цифры — средние из многих определений, бравшихся ежедневно от всех печей завода.

V и VI. Газы немецкого завода Гутегоффнунгсгютте; первый от выплавки томасовского чугуна из минет и шведской руды; в нем характерно низкое содержание CO_2 , указывающее на значительно развитое прямое восстановление. Второй анализ относится к плавке на „гематит“. Несмотря на очень большой расход кокса (горячий кремнистый чугун, малофосфористый), содержание CO_2 и отношение $\text{CO}_2 : \text{CO}$ гораздо выше, чем в первом анализе. Это объясняется тем, что „гематит“ выплавляется из испанских бурых железняков, очень удобовосстановимых.

VII. Ворошиловский завод. Состав газа указывает на менее выгодные условия работы по сравнению с американскими печами, — руда труднее восстанавливаема. Большое количество CO в газах и низкое CO_2 указывает на значительное развитие восстановления твердым C (до 70%) при большом расходе горючего на выплавку мартеновского чугуна. Это — самый плохой газ донецких печей.

VIII. Макеевский завод. Здесь обычное для южных печей содержание CO_2 и всех других составных частей при среднем (для нашего Юга) расходе кокса.

IX. Днепропетровский завод им. Петровского. Анализ проверен аналитическим расчетом; он дает лучший для наших южных печей состав газа, устанавливающийся при степени прямого восстановления $\frac{1}{2}$.

X. Тульский завод. Здесь более высокое содержание CO_2 и отношение Грюнера (m), хотя расход горючего велик, так как руда бедна и заключает в себе много кремнистой пустой породы. Значительное содержание CO_2 объясняется большим потреблением известняка и удобовосстановимостью руды (бурый железняк). Содержание H_2 и CH_4 очень велико, так как руда

загружается в необожженном виде и происходит взаимодействие водяных паров с углеродом кокса.

XI. Н.-Салдинский завод (Урал). Работа на сибирском каменном угле; состав газа — переходный между коксовым и древесноугольным по повышенному содержанию CH_4 и H_2 , в газе заключаются также непоказанные в таблице 0,3% C_2H_4 .

XII. Макеевский завод. Плавка на ферроманган. Расход горючего очень высок, в газе поэтому CO_2 мало, а содержание H_2 выше нормы. Иногда объясняют малое содержание CO_2 при плавке на ферроманган тем, что вследствие расширения области высоких температур в верхних горизонтах печи уголь сгорает в CO_2 по реакции $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$, но это объяснение не верно: пиролизит, восстанавливаясь только газами до MnO , дает небольшое количество CO_2 , которая распределяется в громадном объеме газов (см. расчет газа) и не может дать высокого % содержания.

XIII. Завод фирмы Иллинойс (южн. Чикаго). Газ от выплавки ферросилиция, наиболее бедный углекислотой.

В следующей таблице даны анализы газов, полученных при работе древесноугольных печей, но первые два относятся к опытной плавке на торфяном угле (коксе). По содержанию H_2 эти газы — переходные от древесноугольных к коксовым, а по содержанию CO_2 — совершенно исключительные. Анализ II — средний за 8 суток работы печи Выксунского завода, а I — наиболее богатый CO_2 . Низкая температура газов (80—90°) и необычно высокое содержание CO_2 указывают на вполне равномерное распределение газов по поперечным сечениям печи, достигнутое узким поперечным сечением ее по всей высоте (2,6 м; профиль цилиндрический).

АНАЛИЗЫ КОЛОШНИКОВЫХ ГАЗОВ ДРЕВЕСНОУГОЛЬНЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

№	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Расход угля	0,81	0,9	0,87	0,96	1,0	1,1	1,0	1,0
CO_2	18,55	16,88	15,0	14,7	12,4	11,2	10,1	11,8
CO	20,85	21,56	24,6	23,9	26,6	28,4	29,7	27,9
CH_4	2,30	1,73	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,3
H_2	5,42	5,92	9,4	8,7	8,0	10,1	7,4	8,1
N_2	52,88	53,91	49,6	51,3	51,7	49,1	51,6	50,9
$\text{CO} + \text{CO}_2$	39,40	38,44	39,6	38,6	39,0	39,6	39,8	39,7

III. Ашинский завод (южн. Урал). Бакальская руда. Уголь печного выжига, поэтому H_2 максимум; поэтому же много и CH_4 . Расход горючего не велик, а руда удобовосстановима, отсюда — очень высокое содержание CO_2 .

IV. Златоустовский завод. Те же условия работы, по расход угля выше, а поэтому и содержание CO_2 ниже.

V. Вятский завод. Руда — глинистый сидерит. В плавку она идет после обжига, содержит лишь 38—40% Fe, поэтому расход горючего велик (обычно 1,175), но вследствие удобовосстановимости руды газ богат углекислотой.

VI. Алапаевский завод. Бедный бурый железняк; уголь слабо пережжен, отсюда — максимум водорода.

VII.-Н. Салдинский завод. Руда — высокогорский магнитный железняк. Обжиг ведется нерационально и после него руда содержит 13,15% FeO. Известняк не идет в шихту, так как пустая порода руды самоплавка. Восстановление твердым углеродом развито в более высокой степени, чем при буром железняке; поэтому, а также вследствие отсутствия флюса, содержание CO_2 низко. Плавка велась на бессемеровский чугуи с 1,5—2% Mn. Все эти обстоятельства понижают значение отношения $\text{CO}_2 : \text{CO}$.

VIII. Надеждинский завод. Состав газов выведен, как средний из 300 отдельных (и правильных) анализов. Руда — смесь магнитных, красных и бурых железняков; уголь печной; чугун передельный.

Как вывод из рассмотрения правильных анализов газов доменных печей, даем ниже таблицу, указывающую обычное, наименьшее и наибольшее содержание составных частей газов.

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ГАЗОВ

Сост. части газа	Плавка на коксе			Плавка на др. угле		
	Обыкновенно	Максимум	Минимум	Обыкновенно	Максимум	Минимум
CO_2	9—12	15	5,0	11—13	16	7
CO	Переменное, смотря по содержанию CO_2 и суммы $\text{CO}_2 + \text{CO}$					
CH_4	0,2—0,4	0,8	0,1	1,4	2,0	1,2
H_2	2,5—3,0	4,0	1,2	7—8	10	5
N_2	57—58	59	56	50—52	54	49
$\text{CO}_2 + \text{CO}$	39—40	41	38	39	40	38

Примечание к таблице. Минимум для содержания H_2 в коксовых печах (1,2) относится к единственному случаю — анализу Л. Белл (обоженная кливлендская руда).

Минимум для содержания CO_2 (5,0) возможен лишь при минимуме $\text{CO}_2 + \text{CO} = 38\%$, т. е. при очень высоком расходе горючего (например, при плавке на ферроманган и ферро-

силиций). Максимум CO_2 (15% — 16%) возможен при удобовосстановимой руде и очень малом расходе горючего (например, 0,8).

7% CO_2 в древесноугольных печах встречается у нас лишь при плавке на плохо обожженной гороблагодатской руде (трудновосстановимой). Сумма $\text{CO} + \text{CO}_2$ в среднем в древесноугольных печах несколько ниже, чем в коксовых, несмотря на большую экономичность хода древесноугольных печей, причина этому — большое содержание H_2 в газах. По той же причине содержание азота в них низко и колеблется в довольно широких пределах, тогда как в газе коксовых печей оно, наоборот, очень постоянно и отклонение его от указанных пределов может зависеть только от неточности анализа газа. Максимум для CH_4 — 0,8 был указан в анализе Тульского завода, однако он сомнителен. Максимум для H_2 — 4,0% в коксовых печах получается только при работе на очень влажной руде (напр., минет).

4. Применение анализов колошниковых газов к разного рода расчетам, относящимся к ходу печи

I. Определение количества газа. Древесноугольный газ имеет следующий состав:

CO_2	16,30 %
CO	23,36 %
CH_4	1,42 %
H_2	8,89 %

Расход горючего — 0,87; углерода в угле 79%. Расход CaCO_3 — 0,18 (на 1 чугуна). Содержание углерода в чугуне 36%.

1 м^3 газа содержит 0,163 м^3 CO_2 ; 0,2336 м^3 CO ; 0,0142 м^3 CH_4 . 1 м^3 каждого из этих 3 газов содержит одинаковое количество углерода — 12: 22,4 кг. Отсюда — 1 м^3 газа содержит

$$12 (0,163 + 0,2336 + 0,0142) : 22,4 = 0,22007 \text{ кг}$$

Горючее вносит в печь на 1000 кг чугуна углерода

$$0,87 \cdot 790 = 687,3 \text{ кг}$$

Флюс вносит в печь на 1000 кг чугуна углерода

$$0,18 \cdot 120 = 21,6 \text{ кг}$$

Всего поступает в печь 708,9 кг С.
 Переходит в чугуна 36 кг С.
 Переходит в газы 672,9 кг С.

Следовательно, объем газов на 1 тонну чугуна будет:

$$672,9 : 0,22007 = 3057,9 \text{ м}^3.$$

В разобранный пример газ был очень богат углеродом, вообще же содержание углерода в колошниковых газах на 1 м³ — ниже и колеблется между пределами 0,22 и 0,2, что соответствует выходу газа на 1 кг С в горючем от 4,5 до 5,0 м³.

Смотря по содержанию С в горючем, на 1 кг последнего может получиться различное количество газа. В расчетах газов указывался этот выход газа. На 1 кг кокса получается обыкновенно не более 4,25 м³ газа, часто 4 м³.

2. Определение количества дутья. Определение количества дутья, получаемого печью, делается по количеству N₂ в газах.

Выше было найдено, что на 1 тонну чугуна получается — 3057,9 м³ газа; следовательно в нем будет

$$3057,9 \times 0,5003 = 1529,77 \text{ м}^3 \text{ азота.}$$

Из них горючее внесло 3,48 м³, а на дутье его приходится

$$1529,77 - 3,48 = 1526,29 \text{ м}^3.$$

(Отсюда количество дутья (сод. 1 % влаги) на 1 тонну чугуна

$$1526,29 : 0,7821 = 1951,5 \text{ м}^3.$$

Это — наиболее простой способ. Грюнер применял способ более сложный: он определял по составу газов количество сохранившегося в них кислорода. Из последнего он вычитал кислород, отнятый от руды при восстановлении элементов, и по разности вычислял количество кислорода, азота и дутья, получаемого печью.

3. Определение количества углерода, сожженного у фурм. Определение количества углерода, сожженного у фурм, производится по количеству кислорода, внесенного дутьем, т. к. весь этот кислород (если не считать потери кислорода в окислительной зоне на окисление прежде восстановленных элементов) уходит на сжигание углерода.

Пользуемся тем же примером. Выше было найдено количество азота в дутье на 1 тонну чугуна 1526,29 м³; отсюда

количество кислорода, внесенного дутьем и ушедшего на окисление углерода —

$$1526,29 \cdot \frac{21,79}{78,21} = 415,48 \text{ м}^3.$$

Из уравнения $2C + O_2 = 2CO$ видно, что на 24 кг С требуется 22,4 м³ кислорода, поэтому сжигается дутьем

$$\frac{415,48 \cdot 24}{22,4} = 445,15 \text{ кг С}$$

Теперь можно определить и отношение количества углерода, сожженного у фурм, ко всему количеству углерода. Для этого необходимо знать состав чугуна и угля в отношении содержания в них углерода.

В разобранном примере дается чугун, содержащий 3,6% С; уголь содержит 79% С, но при сухой перегонке его уходит в газ 110,3 кг на 1 тонну угля. Относительный расход угля 0,87 на 1 тонну чугуна.

Отсюда найдем, что всего углерода поступает в печь

$$870 \cdot 0,79 = 687,30 \text{ кг}$$

Из этого количества углерода теряется при сухой перегонке угля

$$870 \cdot 0,1103 = 95,96 \text{ кг.}$$

На обуглероживание чугуна идет

$$10 \cdot 3,6 = 36 \text{ кг.}$$

Всего углерода теряется 131,96 кг.

Сжигается кислородом дутья у фурм и кислородом руды при прямом восстановлении —

$$687,30 - 131,96 = 555,34 \text{ кг.}$$

Выше было найдено, что кислород дутья сжигает у фурм 445,157 кг С что составляет

$$\frac{445,157}{555,34} \times 100 = 80,1 \%$$

всего сожженного углерода, а остальные $555,34 - 445,157 = 110,183$ кг С, или 19,9%, сожжены кислородом окислов при восстановлении элементов, перешедших в чугун.

Теперь, зная состав чугуна, можно решить вопрос: какая часть всего железа восстановилась твердым углеродом.

Состав чугуна: Fe=94,27%; Si=0,7%; Mn=1,4%; P=0,02%.

Восстановление Si требует $7,24 : 28 = 5,936$ кг С.

” Mn ” $14 \cdot 12 : 55 = 3,055$ кг С.

” P ” $0,2 \cdot 60 : 62 = 0,194$ кг С.

Всего на прямое восстановление примесей железа идет 9,185 кг С. Остаток от 110,183, т. е. 100,998 кг С, истрачен на прямое восстановление железа по уравнению $C + FeO = Fe + CO$, т. е. твердым углеродом восстановлено:

$$100,998 \cdot 56 : 12 = 471,324 \text{ кг железа или:}$$

$$471,324 : 942,7 = 0,5$$

Итак, 50% всего перешедшего в чугун железа восстановлено твердым углеродом.

НБ
УДУНТ
(ДМетІ)

IV РАЗВИТИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ КАК РЕЗУЛЬТАТ ВСЕХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

I. Тепловой баланс

1. Определение прихода тепла. Количество получаемого печью тепла складывается из трех статей: 1) горение углерода, 2) теплота горячего дутья и 3) тепло, развиваемое экзотермическими реакциями в печи.

1. Для определения количества тепла, выделенного горением углерода, чаще всего применяют метод Грюнера. Должно быть дано:

а) содержание CO_2 и CO в газах, по которому определяется отношение m по весу $\text{CO}_2 : \text{CO}$;

б) относительный расход углерода горючего a на 1 кг чугуна;

в) относительный расход флюса и углерода в нем b на 1 кг чугуна;

г) содержание углерода c в чугуне;

В газы переходит на 1 кг чугуна —

$$a + b - c = p \text{ кг углерода.}$$

Если обозначить неизвестное количество CO в газах (на 1 кг чугуна) через y , то содержание CO_2 будет my кг. Отсюда:

$$p = \frac{12}{28}y + \frac{12}{44}my$$

$$p = \frac{33y + 21my}{77}$$

$$y = p \frac{77}{33 + 21m}$$

Теперь не трудно определить приход тепла от окисления углерода в CO_2 и CO . На 1 кг чугуна выделяется:

$$w_1 = 8137 \left(\frac{12}{44} m y - b \right) + 2452 \frac{12}{28} y$$

b представляет вычет (в кг) С, введенного флюсом на 1 кг чугуна. Грюнер, исходя из анализов Белла, не определявшего CH_4 , не ввел его в свое уравнение. Для точности же расчета проф. М. А. Павлов вводит поправку для газов, в которых определяются в % по весу: CO_2 , CO и CH_4 .

Если отношения $\text{CO}_2 : \text{CO} = m$; $\text{CH}_4 : \text{CO} = n$, то:

$$p = \frac{12}{28} y + \frac{12}{44} m y + \frac{12}{16} n y$$

Отсюда:

$$y = p \frac{308}{132 + 84m + 231n} \text{ кг CO на 1 кг чугуна.}$$

Количество же тепла определяется как выше.

Метод профессора М. А. Павлова. Расчет тоже ведется на 1 кг чугуна по составу газа, выраженному в % по объему и по отношениям —

$$\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2} = m \qquad \frac{\text{CH}_4}{\text{CO}_2} = n$$

Содержание углерода в газах на 1 кг чугуна определяется также как у Грюнера, но с поправкой на С, уносимый в пыли (d). т. е. $p = a + b - c - d$.

Обозначая количество CO_2 в газах на 1 кг чугуна через x , найдем:

$$p = (x + mx + nx) \frac{12}{22,4} = x \frac{12}{22,4} (1 + m + n)$$

Отсюда:

$$x = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{p}{1 + m + n} = 1,8667 \frac{p}{1 + m + n}$$

Теперь легко определяется количество тепла, полученного печью от горения углерода.

$$w_1 = (x - b) \frac{97650}{22,4} + mx \frac{29430}{22,4}$$

представляет вычет углекислоты флюса в куб. м.

Горение углерода составляет главную статью прихода тепла в доменной печи: 80—90% всего прихода. При выплавке нормальных сортов чугуна с средним расходом горючего 1,0 абсолютная величина этой статьи прихода тепла колеблется в довольно узких пределах: 3 000 до 3 300 *ккал* на 1 *кг* чугуна.

2. Количество тепла, внесенного дутьем (2-й источник тепла) определяется по формуле $w_2 = c_{t_0}^0 \cdot Q \cdot t$.

Здесь известны все величины: *t* — температура дутья, $c_{t_0}^0$ — средняя теплоемкость воздуха и *Q* — количество дутья (m^3).

Дутье дает, обыкновенно, 10—20% всего прихода тепла (смотря по высоте нагрева).

3. Количество тепла, выделенное экзотермическими реакциями, долгое время было совершенно неизвестно. Лишь недавно Чернобаев и Вологдин определили теплоту образования доменных шлаков и дали эмпирическую формулу:

$$w_3 = (3,4 \text{ CaO} - 17)S,$$

в которой *S* — количество шлака на 1 *кг* чугуна, а CaO означает процентное содержание извести в шлаке. Поэтому, например, если CaO = 50%, то: $3,14 \cdot 50 - 17 = 157 - 17 = 140$ *ккал* на 1 *кг* шлака.

Расчеты показывают, что образование шлака в печи дает 2,5-1,5% всего прихода тепла (образование силиката магния не принимается во внимание, т. к. оно дает незначительный тепловой эффект.)

Таким образом, весь приход тепла будет:

$$W = w_1 + w_2 + w_3.$$

Тепло, вносимое сырыми материалами доменной плавки, обычно не учитывается, т. е. предполагается, что средняя их температура равна 0°. Разумеется, его можно принять во внимание, когда оно более или менее значительно.

2. Использование тепла

1. Испарение воды и нагревание ее до температуры колошника. Значительная часть воды испаряется при температуре ниже 100°C, поэтому расход тепла на испарение, надо считать от 0°, т. е. 595 кал. на 1 *кг* и затем прибавлять теплоту нагрева водяных паров от 0° до температуры колошника. Если вода входит в шихту в виде гидратов или в виде льда, т. е. когда материалы имеют температуру ниже 0°, то надо прибавлять еще 79,2 кал. на 1 *кг* воды, как теплоту плавления льда.

НЕ
УДУНТ
(ДМет)

Выделение летучих кокса по незначительному содержанию их не имеет значения для теплового баланса печи, что касается древесного угля, то разложение клетчатки по новейшим шведским данным выделяет немного тепла от образования CO_2 и CO , но выделение остатков газов (H_2 , CH_4) из древесного угля, вероятно, требует некоторой затраты тепла; суммарный тепловой эффект этого процесса в отношении древесного угля не известен и потому не вводится в расчет.

2. Разложение углекислых солей. Теплота разложения шпатов известна для MnCO_3 , CaCO_3 и FeCO_3 , что касается MgCO_3 , то для него определена теплота разложения соли, полученной осаждением из водных растворов; разложение же природного магнезита требует большей затраты тепла и высшей температуры, чем аморфной соли, но этот излишек тепла не установлен. Если в шихте находится часть карбонатов (в обожженной руде), то остаток CO_2 (от неполного обжига) надо считать связанным в более трудноразложимой соли, т. е. в CaCO_3 ; избыток CO_2 нужно разносить по остальным карбонатам в таком порядке: MgCO_3 , MnCO_3 и FeCO_3 .

3. Нагревание колошниковых газов. Нагревание колошниковых газов составляет характерную расходную статью в тепловом балансе доменной печи, оказывающую резкое влияние на коэффициент использования тепла печью. Величина этого расхода определяется довольно точно, на основании анализа газов и их температуры, записываемой непрерывно регистрирующим пирометром. Количество газов может быть вычислено по составу газа, как указано было выше, теплоемкость их известна теперь точно (при разных температурах она различна).

4 и 5. Нагревание шлака и чугуна или количество уносимого ими при выпуске из печи тепла.

Эти статьи не поддаются точному учету, т. к. скрытая теплота плавления чугуна и шлака и теплоемкости их в твердом и жидком состоянии точно неизвестны. Даже относительно температуры чугуна и шлака при выпуске их из печи имеется еще мало наблюдений (почти исключительно американские). Но калориметрические наблюдения, сделанные в лабораторной обстановке Грюнером и в заводской (у горна доменной печи) де-Ватером, дают возможность выбрать подходящие значения для каждого частного случая, т. к. колебания их не велики и мало влияют на конечный результат расчета (ошибка менее 1% итога тепла).

В среднем можно принять, что нормальный переделный чугун уносит 280 кал. из древесноугольной печи; 300 кал. приходится на 1 кг коксового чугуна, максимум—330 кал. на литейный коксовый и 300 кал. литейный др.-угольный.

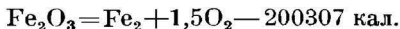
Передельный шлак уносит 400 кал. древесноугольный и 450 кал. на 1 кг — коксовый, но кливлендский литейный шлак уносит больше — до 500 кал. В коксовых печах уменьшение расхода горючего сокращает расход на нагрев шлака, т. к. от этого уменьшается количество золы, количество серы, а следовательно, нужного для них флюса и вес получаемого шлака.

6. Восстановление элементов, переходящих в чугун. Эта статья требует около половины всего тепла, расходуемого печью, но она представляет весьма постоянную величину для разных печей и колеблется только от содержания Si и P в чугуне (в меньшей степени от содержания Mn). Еще меньше влияет на эту статью химический состав того соединения, из которого восстанавливаются элементы. По абсолютной величине эти колебания в расходе тепла могут доходить до 200 кал. на 1 кг чугуна, но относительное значение их не велико, т. к. весь расход на восстановление значителен.

Немецкие металлурги обыкновенно в своих расчетах принимают, что железо восстанавливается из 2 окислов — Fe_2O_3 , и FeO, если в шихте есть магнитный железняк и шлак. Но, имея дело с магнитным железняком, надо считать всю данную анализом закись железа соединенной с соответствующим количеством Fe_2O_3 , в виде Fe_3O_4 , и только остаток Fe_2O_3 рассматривать, как окись.

Теплота восстановления гидрата окиси железа, отнесенная к 1 кг железа, = 1706,7 кал. Это число применяется для бурого железняка, хотя состав бурого железняка, практически, почти никогда не отвечает формуле лимонита — $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$, т. к. содержание H_2O в нем переменное.

Красный железняк поглощает тепла (на частицу окиси железа и на 1 кг восстанавливаемого железа):



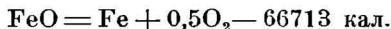
$$200307 : 2.56 = 1788,4 \text{ кал.}$$

Магнитный железняк требует:



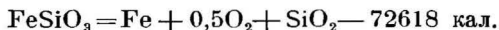
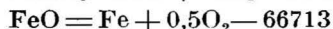
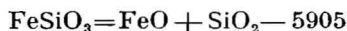
$$274660 : 3.56 = 1635 \text{ кал.}$$

Закись железа требует:



$$66783 : 56 = 1191,3 \text{ кал.}$$

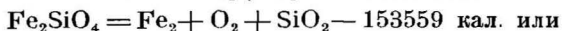
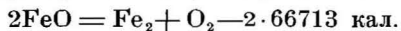
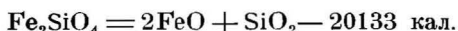
Восстановление железа из кислого силиката идет по след. термохимическим ур-ниям:



или на 1 кг железа

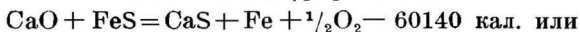
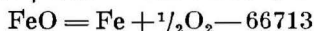
$$72618 : 56 = 1297 \text{ кал.}$$

Восстановление железа из основного силиката:



$$153559 : 112 = 1371 \text{ кал. на 1 кг железа.}$$

Восстановление железа из сернистого соединения:

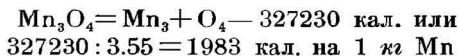


$$60140 : 56 = 1074 \text{ кал. на 1 кг железа}$$

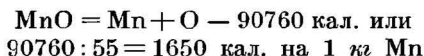
При таком учете тепла превращения сернистого железа в сернистый кальций, не нужно определять теплоты образования сернистого кальция (это делается по недоразумению в некоторых опубликованных балансах), т. к. она учтена в приведенной реакции. Сера, перешедшая в чугун, не требует тепла для своего восстановления (ошибка многих тепловых балансов), т. к. перешла в чугун растворением в нем сернистого железа.

Восстановление марганца происходит из его естественных соединений крайне сложного и не установленного точно анализом состояния. Пирролюзит (MnO_2 безводный), браунит (Mn_2O_3), гаусманит (Mn_3O_4) являются только главными, но не единственными составными частями марганцевых руд; вад и псиломелан часто входят в них, как примеси, и притом — очень переменного состава. Обыкновенно, если руда — пирролюзит, то учитывается теплота, образующая MnO_2 — 124815 кал. или 2269,5 кал. на 1 кг марганца. Руды

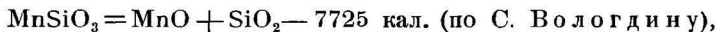
подвергающиеся обжигу, содержат Mn в виде Mn_3O_4 , как и гаусманит; из них восстановление Mn требует:



В основных передельных шлаках (мартеновских и томасовских) Mn считается находящимся в виде MnO свободной (вследствие избытка в них извести) и для его восстановления требуется:



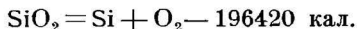
В сварочном шлаке Mn находится в виде основного силиката, но т. к. теплота его образования неизвестна, то приходится рассчитывать теплоту восстановления Mn, как из кислого силиката, именно:



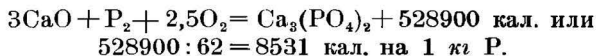
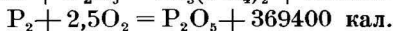
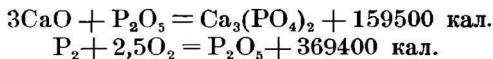
прибавляя этот тепловой эффект к теплоте разложения MnO, что дает:

$$(90760 + 7725) : 55 = 1790 \text{ кал. на 1 кг Mn.}$$

Восстановление кремния из кремнезема по неполным точным определениям требует 7015 кал. на 1 кг кремния, т. к.

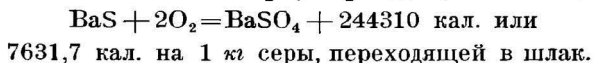
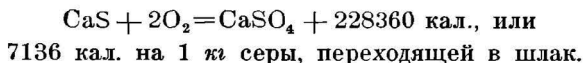


Восстановление фосфора из P_2O_5 требует 5958,5 кал. на 1 кг P, как это обыкновенно считается в опубликованных тепловых балансах, но такой расчет не верен, т. к. P восстанавливается из фосфорнокальцевой соли, разлагаемой кремнеземом, что требует затраты значительного количества тепла. Действительно:



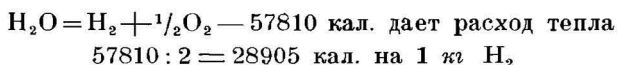
Это число имеет особо важное значение для расчета теплового баланса печи, работающей на томасовский чугун, когда восстанавливается около 2% P.

Восстановление серноокислых солей. В шихту доменных печей могут входить гипс и тяжелый шпат; они восстанавливаются в сернистые соединения, переходящие в шлак; затрата тепла на это вытекает из следующих термохимических уравнений:



Расход на весь процесс восстановления в древесноугольных печах всегда меньше, чем в коксовых, т. к. древесноугольный чугун содержит меньшее количество трудновосстановимых элементов.

7. Разложение воды. При определении теплоты разложения воды, нужно брать соответствующие термохимические данные для водяного пара, а не жидкой воды (как ошибочно делал Белл), причем теплота разложения по реакции:



Разложение воды происходит как в горну (влага дутья), так и в верхних горизонтах печи (вода плавильных материалов). Проф. М. А. Павлов определяет количество разложений H_2O по содержанию водорода в колошниковом газе, учитывая количество H_2 , выделяемое из древесного угля при дополнительной сухой перегонке его, или летучими веществами кокса.

8. Нагревание охлаждающей печь воды. Эта статья расхода легко определяется по количеству отработанной воды и по разности температур подводимой и отводимой воды. Отнесенный на 1 кг чугуна, этот расход в древесноугольных печах сравнительно велик, даже при незначительном их охлаждении (только фурм), составляя 130—150 кал. благодаря малой производительности этих печей. Современные коксовые печи имеют очень интенсивное охлаждение (горн, заплечики), но расходуют около 100 кал. на 1 кг чугуна от охлаждения водой, благодаря своей большой производительности.

9. Потеря тепла в атмосферу от лучеиспускания и охлаждения печи воздухом определяется по разности при сведении теплового баланса. На этой статье отзываются все

ошибки расчета, — главным образом, от неточного анализа газа, частью от неточности тепловых расчетов. По своей абсолютной величине эта статья должна сильно колебаться для разных печей, т. к. она зависит от размера охлаждаемой поверхности печей, с одной стороны, и их производительности — с другой, но проверить ее значение можно, пересчитав число теплового баланса (т. е. расход в кал. на 1 кг чугуна) на потерю в единицу времени; должны получаться сравнимые, или близкие числа для печей сходных размеров и конструкций. Производство: потеря тепла на 1 кг. на суточную производительность д. б. постоянной в таких печах.

Для современных печей большой производительности (американского типа) потеря составляет 5—7% всего прихода тепла; для обыкновенных европейских — в 2, примерно, раза больше.

3. Расчет теплового баланса доменной печи „Изабелла“, работавшей на осушенном дутье

Составлению теплового баланса должно всегда предшествовать сведение материального баланса, которым учитывается все то, что получила печь и все то, что она дала; итоги статей „дала“ и „получила“ должны сходиться. Крупным недостатком очень многих из опубликованных тепловых балансов, является то, что они не сопровождаются материальными балансами. В данном случае этого нет: для печи „Изабелла“ дан очень подробный материальный баланс, который при сем прилагается как образец.

За 8 суток исследованного хода печь дала 3 245 тонн чугуна (405,62 т в сутки в среднем); в шихту входило 62% землистой руды Мисаби и 38% кусковой руды („старых“ горных округов месторождений Верхнего озера). Расход кокса в среднем оказался равным 0,8489 на 1 чугуна при выходе чугуна 50,5 из 100 рудного смешения, расходе флюса 33,8% веса руды, относительном количестве шлака 0,72, температуре дутья—445° С и колошниковых газов—162° С.

Пыли было собрано 9% веса чугуна, что составляет около 4,6% веса руды. Содержание влаги в атмосферном воздухе было 13 г на 1 куб. м, а в дутье—3,5 г.

Состав продуктов плавки (в процентах и для газа в объемах).

	Чугун		Шлак	Пыль	Газ	
C	4,70	SiO ₂	33,74	7,92	CO ₂	16,33
Si	1,03	Al ₂ O ₃	14,64	4,10	CO	22,73

Mn	0,89	CaO	43,24	1,45	CH ₄	0,04
P	0,15	MgO	3,82	0,33	H ₂	1,99
S	0,03	CaS	2,41	C = 10,51	N ₂	<u>58,91</u>
				CO ₂ = 0,96		
Fe	<u>93,20</u>	MnO	0,73	0,72		100,00
	100,00	FeO	<u>1,42</u>	Fe ₂ O ₃ = 73,18	H ₂ O	<u>46,00</u> и 1 м ³
			100,00			99,11

Состав сырых материалов указан в таблице материального баланса, который сведен путем обработки некоторых цифр. В балансе не участвует пыль, а количества руды, кокса и флюса, поступающие в печь, уменьшены сообразно количеству и составу пыли. По содержанию С в пыли и коксе определено количество кокса в пыли, по содержанию в последней CO₂ — количество увлеченного флюса и разность принята за руду, но, во-первых, состав пыли не соответствует среднему арифметическому составу кокса, известняка и руды и, во-вторых — руда наиболее пылеватая (в данном случае Мисаби) заключает в себе 14,4% влаги, в пыли же она находится в сухом состоянии и Fe в ней — не в виде Fe₂O₃. Во всяком случае, принятые автором для расчета данные хорошо сходятся друг с другом, баланс сведен без существенных ошибок и, сверх того, количества дутья и газов, определяемые по результатам наблюдений (скорости измерялись трубкой Pitot) и расчетом по материальному балансу — сходятся весьма удовлетворительно, точно так же, как и вес шлака — расчетный с действительным (первый на 1,1% больше второго, что представляет ничтожную разницу).

Пользуясь данными материального баланса и переводя их на 1 полученного чугуна (делением чисел таблицы на 2240), мы можем установить тепловой баланс печи Изабелла № 3 при ходе на осушенном дутье.

Сокращенный материальный баланс, указывающий численное значение основных данных для дальнейшего расчета, выражается так:

Получено	Дано
Руды 1,9031	Чугуна 1,0000
Флюса 0,6665	Шлака 0,7189
Кокса 0,8489	Газов сух. 4,6840
Дутья сухого . . 3,2925	Влаги в них . . . 0,3174
Влаги в дутье . . 0,0093	Невязка 0,0000
	<hr/>
	6,7203
	6,7203

ИЗДАНИЕ
УДУИТ
(ДМет)

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

ДОМЕННОЙ ПЕЧИ „ИЗАБЕЛЛА“ ЗА 5—13 АВГУСТА 1909 Г.

(Рассчитан на одну английскую тонну или 2.240 ф. выплавлен. чугуна)

В печь поступило			Перешло в		
	% состав	Вес	Чугун	Шлак	Газы
Из руды					
H ₂ O	16,40	699,13	—	—	699,13
SiO ₂	7,78	331,66	23,072 Si	282,588	699,13
Al ₂ O ₃	3,18	135,56	—	135,560	26,00 O ₂
CaO	0,45	19,18	—	19,180	—
MgO	0,28	11,24	—	11,940	—
MnO ₂	0,85	36,24	19,936 Mn	3,840 MnO	12,464 O ₂
Fe ₂ O ₃	70,91	3 022,89	2 088,495 Fe	32,525 Fe	906,870 O ₂
P ₂ O ₅	0,15	6,40	2,793 P	—	3,607 O ₂
В С Е Г О .	100,00	4 263,00	2 129,296	485,633	1 648,071
Из флюса					
H ₂ O	1,00	14,93	—	—	14,93
SiO ₂	6,63	98,98	—	98,98	—
Al ₂ O ₃	2,72	40,61	—	40,61	—
CaO	47,53	709,62	—	709,62	—
MgO	2,05	30,61	—	30,61	—
CO ₂	39,53	590,18	—	—	—
FeS	0,22	3,14	—	3,14	590,18
Fe ₂ O ₃	0,30	4,48	3,136 Fe	—	1,344
P ₂ O ₅	0,03	0,45	0,190 P	—	0,260 O ₂
В С Е Г О .	100,00	1 493,00	3,326	882,960	606,714
Из кокса					
H ₂ O	2,86	54,39	—	—	54,39
Лет. в.	1,02	19,40	—	—	19,40
SiO ₂	6,98	132,73	—	132,73	—
Al ₂ O ₃	3,38	73,78	—	73,78	—
CaO	0,12	2,28	—	2,28	—
MgO	0,07	1,33	—	1,33	—
C	88,27	1 583,46	105,280	—	1 478,18
FeS	1,72	32,71	{ 1,176 Fe	30,862	—
MnO ₂	0,05	0,96	{ 0,672 S	0,780 MnO	0,170 O ₂
P ₂ O ₅	0,03	0,57	0,250 P	—	0,32
В С Е Г О .	100,00	1 901,60	107,378	241,762	1 552,46
Из дутья					
O ₂	—	1 708,67	—	—	1 708,67
N ₂	—	5 671,52	—	—	5 571,52
H ₂ O	—	20,84	—	—	2,32 H ₂
	—	—	—	—	18,52 O ₂
В С Е Г О .	—	7 396,00	—	—	7 396,03
И Т О Г О .	—	1 5053,63	2 240,000	1 610,355	11 203,275

1. Приход тепла

1. В печи сгорает 0,6599 кг углерода на 1 кг чугуна, в том числе в CO_2 — 0,2352 кг и в CO — 0,4247 (определено по составу чугуна, газов и расходу флюса).

Горение углерода дает:

$$0,2352 \cdot 8137 + 0,4247 \cdot 2452 = 2955 \text{ кал.}$$

2. Сухого дутья на 1 кг чугуна приходится 3,2925 кг и с ним в печь поступает 0,0093 кг водяных паров. Следовательно, дутьем, нагретым до 445° , вносятся:

$$(3,2925 \cdot 0,24 + 0,0093 \cdot 0,461) 445 = 354 \text{ кал.}$$

3. Так как средняя температура воздуха за время наблюдения была 16° , то плавильные материалы (кокс — 0,8489 кг, руда — 1,9031 кг и флюс — 0,6665 кг) вносят:

$$0,8489 \cdot 0,17 = 0,1442$$

$$1,9031 \cdot 0,15 = 0,2855$$

$$0,6665 \cdot 0,19 = 0,1266$$

$$0,5564 \cdot 16 = 9 \text{ кал.}$$

4. Образование 1 кг шлака по формуле С. Володина ($w=3,14 \text{ CaO} - 17$) в этом случае выделяет 118 кал. и потому этот источник тепла дает:

$$118 \cdot 0,7189 = 85 \text{ кал.}$$

Всего в печи на 1 кг чугуна выделяется тепла:

$$2955 + 354 + 9 + 85 = 3403 \text{ кал.}$$

2. Распределение тепла

1. Испарение воды (при 100°) и перегрев ее от 100° до 162° поглощают:

$$0,3174 (639 - 16) + 0,3174 \cdot 0,465 \cdot 62 = 207 \text{ кал.}$$

2. Разложение углекислых солей требует затраты тепла (определенного по количеству CO_2 в них):

$$0,2419 \cdot 966 = 240,6$$

$$0,0143 \cdot 657 = 9,4$$

$$250 \text{ кал.}$$

3. Газы и пыль уносят через колошник:

4,684 · 0,2399 · 0,212 = 0,2382	CO ₂
4,684 · 0,7586 · 0,241 = 0,8564	CO + N ₂
4,684 · 0,0002 · 0,67 = 0,0006	CH ₄
4,684 · 0,0013 · 3,38 = 0,0206	H ₂
0,09 · 0,18 = 0,0162	пыль
<hr/>	
1,1320 · 162 = 183 кал.	

4 и 5. Шлак и чугун уносят из печи.

$$0,7189 \cdot 450 + 300 = 324 + 300 = 624 \text{ кал.}$$

6. Восстановление поглощает:

Si из SiO ₂ свободного	0,0103 · 7015	=	72,3
Mn из MnO ₂	0,0089 · 2270	=	20,2
P из Ca ₃ P ₂ O ₈	0,0015 · 8531	=	12,8
Fe из Fe ₂ O ₃ руды	0,9315 · 1788	=	1665,5
Fe из FeS растворен. в чугуне	0,0005 · 0	=	0,0
Mn в MnO шлака из MnO ₂	0,0041 · (2270—1650)	=	2,5
Fe в FeO шлака из Fe ₂ O ₃	0,0079 · (1788—1191)	=	4,7
Fe, взвешенное в шлаке из Fe ₂ O ₃	0,0145 · 1788	=	25,9
			<hr/>
			1804 кал.

Разложение воды требует затраты тепла (определ. по количеству водорода в газах за исключением водорода кокса):

$$(0,006 - 0,002) 28905 = 116 \text{ кал.}$$

Все определенные расчетом статьи расхода требуют в совокупности:

$$207 + 250 + 183 + 624 + 1804 + 116 = 3184 \text{ кал.}$$

7. На все потери тепла (в том числе и на нагрев охлаждающей воды, количество которой и температура не указаны автором) остается:

$$3203 - 3184 = 219 \text{ кал.}$$

Эти потери составляют всего 6,4% прихода тепла и представляются обычными для печей большой производительности.

Исходя из неправильного анализа газа, опубликованного Gayley (был приведен выше), разные авторы, рассчитывая теп-

ТАБЛИЦА ТЕПЛО

	I
УСЛОВИЯ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ	
На весовую частицу чугуна: руды	2,24
„ „ „ „ флюса	0,55
„ „ „ „ горючего	1,125
„ „ „ „ сгорает углерода	0,961
„ „ „ „ получается шлака	1,43
Суточная выплавка чугуна в т	80
Температура дутья	700
„ колошниковых газов	320
Содержание CO ₂ в газах, объем. %	9,0
ПРИХОД ТЕПЛА	
Горение С дает (на 1 кг чугуна) калорий	3548
Дутье „ „ 1 кг „ „	800
Шлакообразован. » 1 кг „ „	115
Всего в приходе на 1 кг чугуна	4463
РАСХОД ТЕПЛА НА 1 кг ЧУГУНА	
Восстановление Fe и его примесей	1982
Выделение CO ₂ из шихты	220
„ H ₂ O „ „	16
Разложение влаги дутья и гидратной воды	72
Уносится колошниковыми газами	500
„ чугуном	330
„ шлаком	770
„ охлаждающей водой	92
„ в атмосферу (потери)	481
Всего в расходе на 1 кг чугуна	4463
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА	
Кпд тепла в печи %	76
Уносится в газах %	11,2
„ водой и в атмосферу	12,8
Кпд углерода в печи	45,2

ВЫХ БАЛАНСОВ

II	III	IV	V
1,83	1,77	2,3	3,26
0,36	0,52	0,20	1,19
0,751	1,045	1,175	2,36
0,605	0,795	0,928	1,373
0,45	0,62	0,96	1,854
577	254	20	92,3
673	584	374	770
163	270	321	475
14,9	11,6	10,4	6,5
2666	3080	3476	5423
495	550	448	1481
60	70	58	111
3321	3709	3982	7015
1753	1661	1686	2327
171	203	205	570
122	116	106	224
227	152	23	506
189	372	560	1326
300	300	300	300
203	277	461	784
97	196	138	321
159	432	503	657
3221	3709	3982	7015
86	73,1	69,9	67
5,9	10,0	14,0	19
8,1	16,9	16,1	14
54,1	47,6	46	37,8

ловой баланс печи Изабелла при ходе на осушенном дутье, определяли потерю тепла в 504 кал., 615 кал. и даже 734 кал., что и указывало на преувеличение отношения $\text{CO}_2 : \text{CO}$ вследствие неполноты поглощения CO .

В нижеследующей таблице дано сопоставление только что полученных чисел, выраженных в кал., и % прихода и расхода тепла.

П Р И Х О Д	%	Кал.	Р А С Х О Д	%	Кал.
Горение в CO дает .	30,6	1042	Вода и газы уносят .	11,5	390
„ CO_2 „ .	56,2	1913	Разложение RCO_3 требует	7,3	250
Дутье приносит . .	10,4	354	Чугун и шлак уносят	18,3	624
Плавильн. материал .	0,3	9	Восстановление требует	53,1	1804
Шлакообразование .	2,5	85	Разложение H_2O требует	3,4	116
			Потери (остаток) . .	6,4	219
Всего . . .	100,0	3403	Всего . .	100,0	3403

В следующей таблице сделано сопоставление статей прихода и расхода тепла по тепловым балансам 5 характерных случаев хода доменных печей; там же указаны и условия работы печей.

1. В колонке I даны цифры, характеризующие работу кливлендских доменных печей на литейный чугун (по данным Белл, рассчитанным по современным термохимическим таблицам). Очень высокий расход тепла на восстановление объясняется исключительным составом чугуна: при 3% кремния он содержит еще 1,4% P. Далее, высокий расход тепла в уходящем шлаке объясняется большим количеством шлака (1,43, теперь доходит до 1,7) и его трудноплавкостью (Белл указывал 550 кал. на 1 кг). Велико также количество тепла, уносимого колошниковыми газами, что объясняется высокой их температурой (320°) — результатом работы на руде, обжигаемой у самых печей и поступающей на колошник совершенно сухой. Этим же объясняется небольшой расход на разложение воды (только влаги дутья) и на ее испарение (только влага кокса). Малая производительность печи вызвала большую потерю тепла в атмосферу. Общий расход тепла очень велик, но к. п. д. печи довольно высок для работы на литейный чугун; следовательно, печь работает, как тепловой аппарат, хорошо, а высокий расход тепла зависит от тяжелых условий работы.

НЕ
УДУНТ
(ДМет)

2. Рядом стоящие цифры колонки II относятся к исключительной по расходу кокса (0,751) работе печи фирмы Иллинойс (зав. в Южн. Чикаго) на бессемеровский чугун, содержащий 1,3% кремния, 0,74% Mn и 0,071% P. Об экономичности хода печи можно судить по количеству тепла, уносимого газами; оно очень низко потому, что и количество газов (при малом расходе кокса) и их температура низки. Количество тепла, уносимое шлаком, тоже указывает на благоприятные условия работы печи. Руда дает мало шлаку, т. к. требует немного флюса, по этой же причине и разложение флюса требует немного тепла. На потерю в атмосферу остается очень мало тепла, несмотря на интенсивное охлаждение горна и заплечиков. Это объясняется большой производительностью печи (577 т). Расход тепла на 1 кг чугуна достигает в этой печи своего минимума (обычный — 3600 кал.).

3. Цифры колонки III дают распределение тепла для случая выплавки мартеновского чугуна одной из наших южных печей, небольшой сравнительно производительности, но работавшей хорошо. (Восстанавлилось твердым С только 51% железа, вместо обычных 65 — 70%). Так как в шихту поступало 5,7 железа в виде скрапа на 100 чугуна, то расход тепла на восстановление ниже нормального. Расход тепла на испарение воды вышел выше обычного для юга, вследствие обильного поливания водой шихты при завалке. Колошниковые газы уносят в два раза больше тепла, чем из печи Иллинойс, вследствие большего их количества и высокой температуры (10% всего тепла.) Охлаждение водой тоже требует в два раза больше тепла, чем в современной американской печи. Это объясняется столь же обильным охлаждением, но в $2\frac{1}{4}$ раза меньшей производительностью. Весь расход тепла несколько выше среднего для современной коксовой печи.

4. Колонка цифр IV относится к условиям работы на древесном угле (Климковский завод, исследование М. А. Павлова), выплавке передельного серого чугуна из бедных глинистых железняков, подобных кливлендским. Восстановление элементов требовало меньшего количества тепла, чем в американской печи (в чугуне было Si — 1,2% и Mn — 0,88%), но нормальное для древесноугольной плавки. Колошниковые газы уносили слишком много тепла, — больше чем в кливлендской печи. Хотя температура колошника была та же (проплавляется тоже обожженная руда), но количество газов было больше от присоединения продуктов сухой перегонки древесного угля. Шлак уносил тепла больше, чем в южной коксовой печи, т. к. количество его было велико (почти 1). Потеря в атмосферу при небольшой производительности печи могла быть и выше, но старая конструкция печи (массивный кирпичный кожух) спо-

собствовала ее уменьшению. В общем, благодаря бедности руды и вызываемому ею большому расходу угля, расход тепла значительно выше нормального.

5. Последняя колонка цифр дает результат подсчета теплового баланса печи Макеевского завода при работе на ферроманган при ненормальных условиях, — слишком бедной руде, требующей много флюса, дающей много шлака и снижающей выход марганца. Результатом этого явились чрезмерные потери тепла: в газах, в шлаке, на разложение флюса. Само собой разумеется, что и расход тепла на восстановление велик, т. к. чугун содержал 78% Mn, но на охлаждение водой тратилось тепла меньше, чем можно было бы ожидать (по сравнению с другими печами), т. к. в данном случае производится охлаждение всей шахты (чугунная конструкция Бургерса). В мин. печь получала $4,12 м^3$ воды, что при ее суточной производительности 92 т давало 63,4 кг воды на 1 кг чугуна. Повышение температуры воды было 50° (в другой южной печи было 39,5 кг при том же подъеме температуры).

4. Применение данных теплового баланса к расчетам

1. Коэффициент полезного действия тепла в доменной печи и использование углерода. Тепловые балансы доменных печей позволяют установить численное значение этих коэффициентов для разных условий работы печей. Первый находится из отношения использованного в печи тепла ко всему приходу тепла. Чтобы получить первое, нужно из суммы израсходованного тепла вычесть потери в газах, охлаждающей воды и в атмосферу. Напр., для первых двух тепловых балансов таблицы:

$$k_1 = 100 \frac{4463 - (500 + 92 + 481)}{4463} = 75,96 \%$$

$$k_1 = 100 \frac{3321 - (189 + 97 + 159)}{3221} = 86,1 \%$$

Второй коэффициент полезного действия — исключительно высок, но он и относится к исключительному случаю практики — очень низкому расходу кокса и хорошему использованию восстановительной способности газов (14,9% CO_2). Что касается первого, то он является нормальным для современной практики, хотя относится к тяжелым условиям работы, вызывающим большой расход тепла. Значительная часть этого тепла идет на плавление и перегрев шлака, а оно считается полезно издержанным.

Из предшествовавшей таблицы видно, что наши южные печи работают с к. п. д. ниже среднего, что объясняется сравнительно большим расходом горючего (вызываемым сравнительно трудно восстанавливаемой рудой), неравномерным распределением газов и высокой температурой колошниковых газов, указывающей на пользу увеличения температур дутья до максимума.

Коэффициент использования тепловой энергии углерода в печи получается из отношения тепла, даваемого горением углерода, к тому его количеству, которое могло получиться при полном горении. Для случая кливлендской плавки мы имеем (см. колонку I таблицы):

$$3548 : 0,961 = 3692 \text{ кал. на } 1 \text{ кг С, что составляет:}$$

$$100 \cdot 3692 : 8137 = 45,2\% \text{ тепловой энергии С.}$$

Для нашей южной печи (при сравнительно хороших условиях работы) по данным колонки III:

$$3080 : 0,795 = 3874 \text{ кал. на } 1 \text{ кг С или}$$

$$100 \cdot 3874 : 8137 = 47,6\% \text{ тепловой энергии С.}$$

То же для лучшего случая американской практики (колонка II таблицы):

$$2666 : 0,605 = 4407 \text{ кал. на } 1 \text{ кг С.}$$

$$100 \cdot 4407 : 8157 = 54,1\% \text{ тепловой энергии С.}$$

Обычно к. п. д. углерода в печи меняется в пределах 46—48%.

2. Тепловое значение 1 кг углерода в доменной печи. Оно определяется так (возьмем те же случаи практики):

Горение 0,961 кг С дает 3548 кал.
 Нагретое до 750° дутье приносит . . 800 "

Всего 4348 кал. или

4348 : 0,961 = 4524 кал. на 1 кг С, сгорающего в горячем дутье. При к. п. д. тепла в печи 75,96% из этого количества тепла в печи используется:

$$4524 \cdot 0,7596 = 3436 \text{ кал.}$$

Это и есть тепловое значение 1 кг С, сжигаемого в дутье, нагретом до 750°, в условиях кливлендской плавки.

б) Печь Иллинойс (лучший случай практики).

Горение 0,605 кг С дает	2666 кал.
Дутье, нагретое до 673°, приносит	495 „
	<hr/>
	Всего 3161 кал.

$$3161 : 0,605 = 5260 \text{ кал. на } 1 \text{ кг С}$$

$$5260 \times 0,861 = 4529 \text{ „ (максимум).}$$

в) Южная печь.

Горение 0,795 кг С дает	3080 кал.
Дутье (584°) „	550 „
	<hr/>
	3630 кал.

$$3630 : 0,795 = 4566 \text{ кал.}$$

$$4566 \cdot 0,731 = 3338 \text{ кал. на } 1 \text{ кг С}$$

В данном случае температура дутья была гораздо ниже средней и поэтому количество тепла, внесенное дутьем, определилось слишком низкой цифрой. Для обыкновенной высоты нагрева была бы получена цифра 3500 кал., которую и можно считать пригодной для тепловых расчетов, касающихся работы южных печей Союза.

3. Определение „используемого“ углерода в коксе. Зная тепловое значение С в печи, можно решить вопрос о количестве „используемого“ углерода в том или ином сорте кокса и получить возможность производить сравнительную оценку кокса, поскольку достоинство его зависит от химического состава. Расчет ведется так, что определяют количество флюса для золы и серы кокса, количество тепла для разложения флюса и для плавления шлака из золы и серы кокса, а затем — по тепловому значению 1 кг С в печи — определяется, сколько его берется от нелетучего углерода кокса и сколько остается в последнем „используемого“ углерода.

а) Кливлендская плавка. Кокс деремский содержит:

Влаги и летучих	Золы	Серы	С нелетучего
2,59	10,0	1,0	86,41 %

Такой кокс требует на 100 частей 20,3% местного флюса (содержащих 8% CO₂) и дает 21,18% шлака. Эти данные позволяют определить расход тепла —

- 1) на плавление шлака 21,18 · 500 = 10590 кал.
 - 2) на выделение CO₂ из флюса 8 · 998 = 7984 „
-
- 18574 кал.

УДУНТ
(ДМет)

Но 1 кг С, сожженный в кливлендской печи, дает по предшествовавшему расчету 3436 кал., поэтому потребуется

$$18574 : 3436 = 5,41\% \text{ С кокса}$$

для плавления золы и серы кокса и разложения флюса для них. Таким образом, остается в деремском коксе

$$86,41 - 5,41 = 81\% \text{ используемого С.}$$

б) Донецкий кокс наших южных печей. Ниже указан состав договорный (или кондиционный) донецкого кокса и состав того кокса, который должен притти ему на смену путем улучшения коксования и изменения химического состава продукта.

Летуч. вещ.	Зола	Сера	С нелетуч.	
1,5	12,0	1,8	78,7%	кокс кондиционный
1,5	9,0	1,6	83,9 „	„ повыш. качеств.

В „Расчете шихт“ определено, что для кокса с 10% золы среднего для юга состава и 1,5% серы требуется 16% известняка (содержащего в себе 43%, т. е. 6,88% CO₂), причем получается 17% шлака (от веса всего кокса). Кондиционный кокс содержит на 20% больше как золы, так и серы, поэтому он потребует 19,2% известняка (с 8,26% CO₂) и даст 20,4% шлака. Кокс же повышенных качеств, имея на 3% меньше золы и на 0,2% меньше серы, потребует 15,83% известняка (с 6,8% CO₂) и даст 16,2% шлака.

Для кондиционного кокса имеем расход тепла и углерода:

на плавление шлака	20,4 · 500 =	10200 кал.
на разложение флюса	8,26 · 998 =	8243 „
		<hr/>
		18443 кал.

$$18443 : 3500 = 5,27 \text{ кг. С}$$

Количество используемого углерода в этом коксе —

$$78,7 - 5,27 = 73,43\%$$

Для кокса повышенных качеств имеем:

на плавление шлака	16,2 · 500 =	8100 кал.
на разложение флюса	6,81 · 998 =	6796 „
		<hr/>
		14896 кал.

$$14896 : 3500 = 4,34\%$$

$$83,9 - 4,34 = 79,56\%$$

НБ
УДУНТ
(ДМетИ)
59

Сравнительная ценность (в доменной плавке) этих двух сортов кокса определяется отношениями:

$$73,43 : 79,56 = 0,923 \text{ и } 79,56 : 73,43 = 1,083$$

Отношение же „нелетучего“ С было $83,7 : 78,7 = 1,066$.

Отсюда видно, что переход с кондиционного кокса на кокс повышенных качеств даст по тепловому расчету сокращение расхода кокса на 7,7%, а обратный — вызовет увеличение его расхода на 8,3%, чем и может быть установлена цена одного из этих сортов кокса, если известна или задана цена другого, принимая во внимание также и то, что кондиционный кокс требует на 3,5% своего веса больше флюса, цена которого тоже должна быть скинута со стоимости кокса.

в) Кузнецкий кокс и уголь пласта „Мощный“. Оба эти вида горючего доменной плавки были испытаны впервые в 1924 г. в печах Тагильского округа. Ниже даны анализы сожженного в них топлива.

Влага	Летучие	Зола	Сера	С нелетуч.
9,00	2,17	12,19	0,53	76,11% Кузнецк. кокс
6,00	17,95	4,30	0,20	71,55 „ уголь пл. „Мощный“

Кокс по содержанию серы и анализу золы требовал 18,8% своего веса известняка (содержавшего 8,1% CO_2) и давал 21% шлака, а уголь соответственно: 6,7% (с 2,9% CO_2) и давал 7,5% шлака. По этим данным определяется расход тепла и углерода, а также остаток „используемого“ углерода.

1) Кузнецкий кокс:

на плавление шлака	21 · 500 = 10500 кал.
на разложение флюса	8,1 · 998 = 8094 „
	<u>18584 кал.</u>

$$18584 : 3500 = 5,31\% ;$$

$$76,11 - 5,31 = 70,80\% \text{ С используемого;}$$

2) Уголь „Мощного“:

$$\text{на плавление шлака } 7,5 \cdot 500 = 3750 \text{ кал.}$$

$$\text{на разложение флюса } 2,9 \cdot 998 = 2894 \text{ кал.}$$

$$\underline{6644 \text{ кал.}}$$

$$6644 : 3500 = 1,9\% ;$$

$$71,55 - 1,9 = 69,65\% \text{ С используемого.}$$

Отношение: $70,80 : 69,65 = 1,017$ указывает, что вместо 100 вес. част. кокса нужно ввести в печь 101,7 вес. част. угля, чтобы дать

НЕ
УДУНТ
(ДМет)

одинаковое количество используемого углерода, но зато уголь даст сбережение в стоимости флюса, которого расходуется на 12% меньше; сверх того, летучие вещества угля м. б. использованы вне доменной печи.

Т. о. помимо дешевизны самого угля (по сравнению с коксом), применение его удешевляет производство чугуна, и лишь физические свойства заставляют прибегать к смешиванию угля с хорошим (физически) коксом.

В расчетах зарубежных металлургов, касающихся оценки кокса, принимается во внимание и количество тепла для испарения влаги кокса; в предшествовавшем расчете этого не сделано, так как температура колошниковых газов в Кливленде и на юге Союза часто превосходит 250°, что и вызывает поливку шихты водой. Очевидно нельзя делать вычета на испарение воды, если к ней прибегают, как к средству понижения т-ры колошниковых газов и исправления хода печи. Вообще, по мнению проф. М. А. Павлова, вводить в расчет сырых материалов теплоту испарения воды не следует, кроме тех исключительных случаев практики, когда содержание воды в шихте настолько высоко, что температура колошника падает ниже 150°.

4. Определение теплового значения 1 кг С в доменной печи и количества „используемого“ углерода кокса нужны не только для оценки кокса, как горючего доменной плавки, но и для решения всякого рода вопросов, связанных с расходом тепла в доменной печи и вызываемым им расходом горючего. Приведем в пример один такой расчет, имеющий историческое значение, но не утерявший его и теперь — сравнение американской и кливлендской плавки с точки зрения экономии горючего.

Различие в условиях плавки (на литейный и мартеновский чугун) выражается числами так:

	Кливленд	Питсбург	Разность
Состав чугуна: кремния	3%	1%	2%
фосфора	1,4%	0,4%	1%
Шлака на 1 чугуна	1,5	0,5	1

Перерасход тепла на 1 чугуна в Кливленде:

$$500(1,5 - 0,5) + 0,02(7015 - 1788) + 0,01(8531 - 1788) = 672 \text{ кал.}$$

Перерасход на восстановление элементов дан, как разность теплот восстановления кремния, фосфора и заменяемого ими железа. Из 672 кал. перерасхода 500 требует только лишний вес шлака, откуда усматривается значение этого фактора.

Выше было определено, что тепловое значение 1 кг С в кливлендской печи = 3436 кал., поэтому, чтобы получить 672 кал., нужно издержать:

$$672 : 3436 = 0,196 \text{ кг С}$$

Так как используемого С в кливлендском коксе 81%, то перерасход кокса (против американской печи) может составить:

$$0,196 : 0,81 = 0,242 \text{ кг на 1 кг чугуна.}$$

Отсюда вытекает такое сопоставление расходов кокса:

$$0,900 \text{ — америк. и } 0,900 + 0,242 = 1,142 \text{ — кливлендского,}$$

если химическ. состав кокса или содержание используемого углерода в нем одинаково.

Таким методом Л. Белл в 1890 году доказал, что кливлендская печь, как тепловой аппарат, работает не хуже, чем печь Люси в Питсбурге, данные о ходе которой (указан. выше) были опубликованы в то время.

5. Объяснение сбережения топлива, даваемого на нагревом дутья. Горячее дутье дало возможность с самого начала своего применения достигнуть значительного сбережения горючего в доменной плавке. Это сбережение, выраженное весом кам. угля, было значительно больше расхода угля, шедшего на отопление воздухонагревателя, несмотря на то, что к. п. д. этого аппарата был очень низок. Стремясь увеличить сбережение кокса, стали подымать нагрев дутья насколько возможно в аппаратах с чугунными трубами, но скоро убедились, что сбережение от первых двух сотен градусов значительнее, чем от вторых двух. Впоследствии, при переходе на кирпичные аппараты, снова убедились в том же: повышение нагрева с 400° до 600° дало некоторую экономию в коксовых печах, но дальнейшее увеличение температуры дутья (до 800°) иногда не давало никакого сбережения кокса или давало малозаметное.

Древесно-угольные печи, работавшие на удобовосстановимой богатой руде на передельный малокремнистый чугун, ограничивались нагревом в 250°—300°, т. к. дальнейшее повышение температуры дутья не давало сбережения угля, способствуя лишь увеличению содержания кремния в чугуне, что было не желательно.

В различных печах, работающих на коксе, при одинаковой высоте нагрева достигалось разное сбережение.

Перечисленные факты долгое время (в течение 40 лет) не находили себе объяснения; оно было дано впервые шведским проф. Р. Окерманом, уяснившим значение хорошо известного всем факта: сбережение тепла, даваемое горячим дутьем, уменьшает количество газов, приходящиеся на весовую единицу плавильных материалов, поступающих в печь; от этого понижается температура колошника (при одновременном подъеме ее в горну). Значит, все то количество тепла, какое приносит нагретое дутье, усваивается печью полностью (на 100%), между тем, для того, чтобы дать в печь то же число калорий увеличением расхода горючего, нужно принять в расчет, что часть тепла, данного горением горючего, будет потеряна в газах, уходящих через колошник.

Численный пример уяснит мысль Окермана. Первый тепловой баланс для древесноугольной печи составлен был Окерманом для „средних“ условий работы шведских печей (т. е. он относился не к какой-либо реальной, а к гипотетической шведской „средней“ печи); дутье подогревалось до 205° и давало 10,2% того количества тепла, какое требовалось печью при работе на холодном дутье. К. п. д. тепла на этом дутье был 64,26%, а сбережение угля горячим дутьем в среднем для Швеции выражалось приблизительно в 16% — потому, говорит Окерман, что

$$10,2 \cdot 100 : 64 = 15,87$$

Т. е. 10,2 % тепла в горячем дутье эквивалентны 15,87% расхода угля при к. п. д. тепла 64,26%. При переходе от нагретого дутья к холодному нужно увеличить на 15,87% расход угля для того, чтобы возместить 10,2% тепла, даваемого горячим дутьем, ибо из каждых 15,87 кал., даваемых горением угля, лишь 10,2 кал. будут использованы печью, а 5,67 кал. будут потеряны через колошник в газах и в атмосферу; обратно, переход на нагретое дутье, дающее 10,2% всего тепла, позволит уменьшить расход угля не на 10,2%, а на 15,87%, так как от этого сама печь потеряет только 10,2%.

В своем „Исследовании плавильного процесса доменных печей Климковского завода“ (1891 г.) проф. М. А. Павлов произвел аналогичный подсчет для двух печей, работавших рядом на одних и тех же сырых материалах, но одна — на горячем дутье (374°), а другая — на холодном. Случайно и коэффициент использования тепла, и отношение количества тепла, даваемого нагретым дутьем (448 кал.), ко всему приходу тепла

на холодном дутье (4179 кал.) были очень близки к цифрам Окермана, именно:

$$k = 100 \frac{4179 - (603 + 895)}{4179} = 64,15 \%$$

$$\frac{448 \times 100}{4179} = 10,7 \%$$

Экономия горючего должна была быть по Окерману:

$$100 \frac{10,7}{64,15} = 16,7 \%$$

Однако, среднее за ряд лет сбережение было больше: от 18 до 20%, а в то время, когда составлялся тепловой баланс, оно было равно:

$$100 \frac{1,423 - 1,175}{1,423} = 21,1 \%$$

Сопоставляя цифры теплового баланса обеих печей, можно было показать, что сбережение горючего должно было быть больше, чем дает расчет по Окерману, так как горячее дутье не только вносит собой 448 кал., но и дает сбережение в количестве тепла, расходуемого на 1 кг чугуна, хотя некоторые статьи расхода увеличиваются, благодаря горячему дутью, как видно из нижеследующего:

1) Восстановление, теоретически говоря, при одинаковом составе чугуна требует одинакового расхода тепла, — независимо от температуры дутья, но в данном случае (как и во многих других), благодаря бедности руды и большому количеству глиноземистого шлака, горячее дутье давало более кремнистый и марганцевистый чугун, чем холодное, что требовало большего количества тепла и создавало некоторый минус в тепловом балансе горячего дутья.

2) Выделение углекислоты из флюса в данном случае не делало разницы в работе печей, но ход на коксе дает небольшое дополнительное сбережение при сокращении его расхода, вызывающем уменьшение количества золы и серы, а потому — и количества флюса, и потребной для его разложения теплоты.

3) Выделение воды и нагрев водяных паров до тем-ры колошника при древесном угле (более влажном, чем кокс) дает некоторое уменьшение расхода, вследствие умень-

шения количества угля, а следовательно — и удаляемой из него воды.

4) Разложение воды тоже дает сбережение, т. к. сокращение расхода угля уменьшает количество дутья (на 1 кг чугуна), а потому — и количество вносимой им влаги.

5) Тепло, уносимое газами, резко уменьшается на нагретом дутье и на это обстоятельство и указал Окерман, как на причину сокращения расхода горючего, но это сокращение уменьшается другими статьями расхода тепла, т. к. увеличиваются следующие статьи расхода.

6), 7) и 8) Количество тепла, уносимое чугуном, шлаком и охлаждающей водой, неизменно увеличивается при переходе на горячее дутье и даже при повышении нагрева дутья, вследствие концентрации жара в горну и подъема температуры в области горения. Это — отрицательный эффект горячего дутья.

9) По последней статье расхода получается экономия: увеличение производительности печи сокращает потерю тепла в атмосферу по отношению к 1 выплавляемого чугуна.

Объяснение Окермана можно представить формулой:

$$k = 100 \frac{a}{k_1 W}$$

в которой k — сбережение тепла (в %), a — количество тепла, вносимое горячим дутьем (на 1 кг чугуна), k_1 — к. п. д. тепла до перехода на нагретое дутье (или до повышения нагрева), а W — расход тепла до перехода.

Объяснение проф. М. А. Павлова меняет эту формулу в такую:

$$k = 100 \frac{a + b}{k_1 \cdot W}$$

В этой формуле „ b “ представляет алгебраическую сумму всех сбережений и перерасходов тепла, вызванных применением нагретого дутья или только повышением его нагрева.

Простая формула эта позволяет легко объяснить все те факты, на которые было указано в начале этого §.

а) Коэф. k_1 меньше 1 и — тем меньше, чем выше расход горючего, поэтому сбережение, даваемое горячим дутьем, тем выше, чем больше расход горючего, или наоборот, чтобы получить определенный расход горючего, нужно нагревать дутье тем выше, чем ниже к. п. д. печи.

НБ УДНТ
(ДМет1)

б) По мере сокращения расхода горючего увеличивается поэтому экономия от нагрева на каждую сотню градусов тем меньше, чем выше нагрев. По мере сокращения расхода горючего увеличивается и количество дутья, приходящееся на 1 чугуна, поэтому, чтобы дать одно и то же количество калорий дутьем, надо нагревать его тем значительнее, чем выше температура нагрева.

Следующий пример уяснит сказанное. При расходе кокса 1,2 южная печь получает 3,656 куб. м дутья на 1 кг чугуна, а при расходе 1,0 всего 2,877. Нагретое до 600° дутье в первом случае приносит в печь

$$3,656 \cdot 600 \cdot 0,312 = 684,7 \text{ кал.}$$

Чтобы дать это же количество калорий при расходе 1,0, дутье должно быть нагрето до

$$684,7 = 2,8 \cdot 70,315 \cdot x; \quad x = 756^\circ.$$

в) Все обстоятельства, которые усиливают расход горючего — бедность руды, ее трудновосстановляемость, трудноплавкость шлака, высокое содержание кремния и марганца в чугуне, большое содержание золы и серы в коксе, малые размеры печи понижают к. п. д. печи и, следовательно, увеличивают экономию, даваемую горячим дутьем, или побуждают, для достижения наибольшей экономии, подымать нагрев до высших пределов.

Так как все перечисленные условия работы печи могут сочетаться самым разнообразным образом, то ясно, что для всяких данных условий существует свой наиболее выгоднейший нагрев дутья.

Объяснение, данное Окерманом, проф. М. А. Павлов обобщает в принцип Окермана, формулируя его так: „всякая причина, уменьшающая расход тепла в доменной печи, дает тем большее сбережение горючего, чем ниже был к. п. д. доменной печи“.

С помощью этого принципа можно, напр., сделать все те выводы, которые дал проф. Эренверт, в результате кропотливых расчетов, для объяснения сбережения, даваемого осушением дутья.

Наибольшее сбережение осушение дутья должно приносить по расчетам Эренверта при:

1) выплавке ферромангана или ферросилиция;

2) в печах приморских районов, где влажность воздуха колеблется в широких пределах;

НЕ
УДУНТ
(ДМет1)

3) в малых печах, работающих с высокой температурой колошника;

4) при низком нагреве дутья.

Ясно, что при всех указанных 4 условиях печь работает с более низким к. п. д., а в таком случае всякая причина, в том числе и осушение дутья, сберегающая некоторое количество тепла, дает большее сокращение горючего, чем при противоположных условиях работы.

Такое объяснение убедительнее расчетов Эренверта, так как расчетом нельзя получить действительного сбережения горючего от осушения дутья. В самом деле, расход тепла на разложение влаги дутья составляет лишь очень незначительную часть всего расхода, и экономия от сокращения только этой статьи баланса тепла не оправдала бы затрат на осушение дутья. Действительно получаемое сбережение горючего от осушения дутья объясняется иначе, и его дал сам Джемс Гели — изобретатель осушения.

Влажность воздуха — очень переменчива; зимой вообще насыщение воздуха водяными парами незначительно и влажность воздуха невелика: 2—3 г на м³, летом же она колеблется очень значительно: от 8 до 20 гр. на м³.

Еще в XVIII веке практикам было известно, что зимой печи работают лучше, чем летом, — дают большую производительность и меньший расход горючего от того, что воздухоудувные машины засасывают больше кислорода воздуха, более сухого, чем летом. Это объясняется слабостью старых машин и тем, что они всегда работали своей предельной мощностью, не позволявшей увеличивать числа оборотов при подаче более теплого воздуха (как это делается теперь).

Повышение влажности дутья заставляет усиливать расход горючего, но если колебания влажности очень быстры и неожиданны, то доменный техник не может к ним приспособиться. Это вынуждает его вести печь несколько более горячей, чем следовало бы для достижения минимального расхода горючего. Некоторый перерасход горючего в таких случаях позволяет получать более надежный ход печи и избежать вредных последствий временного охлаждения горна и связанных с ним изменений в составе чугуна (понижение содержания кремния и марганца, повышение серы). Так как содержание кислорода из этих элементов обусловлено приемщиками или потребителями чугуна, то переход за предельное содержание их влечет за собой или продажу чугуна по низкой цене или необходимость переплавлять его в доменной печи.

Осушение дутья, совместно с постоянством температуры и количества дутья, создает удивительно ровный ход печи, позволяющий доменному технику снизить расход горючего до

возможного для данного сорта чугуна минимума. Дж. Гели опубликовал анализы чугуна, выплавленного на осушенном дутье, указывающие на постоянный состав чугуна за долгий промежуток времени. (Последнее до настоящего времени сообщение указывает на сокращение расхода кокса от осушения дутья в $5\frac{1}{2}\%$ и на увеличение суточной производительности в 13%. Такие результаты уже окупают стоимость установки и содержания устройства для осушения).

НБ
УДУНТ
(ДМетІ)

V. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Цель доменной плавки — получение данного качества чугуна с наименьшей затратой горючего и в наибольшем (при данных размерах печи) количестве — достигается в большей или меньшей мере, смотря по тому, каковы условия, в которых ведется доменный процесс. Как можно заключить из всего того, что было сообщено раньше по теории доменного процесса, одни из этих условий могут благоприятствовать получению чугуна того или иного состава, другие же затрудняют это и даже делают получение его невозможным. Как заключение изложения теории доменного процесса, ниже рассматриваются эти условия.

1. Качество руды

1. Химический состав руды и, в частности, ее пустой породы предопределяет сорт чугуна, который может быть выплавлен из руды с наилучшими техническими результатами (суточная производительность, расход горючего).

Для получения бессемеровского и томасовского чугуна требуется содержание в руде определенного (но различного, смотря по содержанию железа) содержания фосфора.

Литейный чугун требует низкого отношения (2 и менее) $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$. Если это условие не удовлетворяется, то получение высококремнистого чугуна обходится дороже, вследствие повышенного расхода горючего и пониженной производительности печи. Классическими местами производства литейных чугунов всегда считались Кливлендский горный округ (Англия) и Шотландия, где для выплавки этих чугунов служат местные бедные глинистые железняки, дающие большое количество глиноземистого шлака. Обратными свойствами обладает наша богатая Криворожская руда с ее кремнистой пустой породой, более пригодная для выплавки передельных чугунов и дающая литей-

ный с расходом кокса не менее 1,2 (Кливлендские бедные руды обходятся расходом 1,12, а при выходе чугуна 41 % — даже 1,0).

2. Удобовосстановимость — всегда желательное свойство руды; она сокращает время пребывания руды в печи, т. е. увеличивает суточную производительность. При работе на древесном угле время пребывания бурого железняка в наших южно-уральских печах сокращено до 8 часов (6 часов в виде исключения). Американцы со своей удобовосстановимой рудой Мисаби ведут плавку так, что она остается в печи 8 часов, иногда 7, но они же находят, что для магнитного железняка (не обожженного и не спеченого) время пребывания должно быть 11—12 ч. В шведских древесноугольных печах хорошо обожженный магнитный железняк остается около 13 часов; некоторые наши уральские печи, работая тоже на древесном угле, доходили до 11 часов с магнитным железняком, хуже обожженным.

Но если доменный техник имеет в своем распоряжении и магнитный и бурый железняки, то он должен менять отношение между ними, смотря по сорту выплаваемого чугуна. Кремний хорошо восстанавливается из удобовосстановимой руды, трудновосстанавливая, обратно, образованием силиката железа не только затрудняет восстановление кремния, но и полученный уже кремнистый чугун «отбеливает», т. е. лишает кремния. Так как низкое содержание кремния желательно в передельном чугуне, то трудновосстановимая и богатая руда должна входить в шихту на передельный чугун, как желательная примесь, в гораздо большем количестве, чем на литейный чугун.

3. Степень богатства руды железом отражается на суточной производительности и расходе горючего, какой бы чугун ни выплавлялся, но богатство руды регулирует и количество шлака, даваемое шихтой, а потребность в большом количестве шлака не одинакова для литейного и передельного чугуна. Восстановление кремния облегчается, а окисление его в горну затрудняется большим количеством шлака. Поэтому, имея на складе бедный бурый железняк и богатый магнитный, доменный техник сознательно назначает больше бурого железняка на литейный чугун, а больше магнитного — при переходе на передельный.

Наша Криворожская руда „слишком богата“ для выплавки литейного чугуна, давая от 0,4 до 0,5 шлака на 1 чугуна (желательно его иметь в этом случае до 1,0); для увеличения веса шлака к ней — кроме таких примесей, как маргеновский шлак — часто прибавляют „кварцит“, т. е. сравнительно бедный кремнистый красный железняк, хотя для этого более подходит глиноземистая руда (55 % — 57 %) рудника Пролетарского.

2. Свойства горючего

1. В настоящее время для выплавки чугуна, кроме кокса — универсального горючего доменной плавки — применяется еще древесный уголь, антрацит и сырой уголь (не спекающийся и не рассыпающийся в порошок при нагреве).

Разница между древесным углем и коксом в доменной плавке (не считая отличия в содержании золы и серы) ясно обнаруживается в горну доменной печи: древесный уголь, сгорая почти сразу в СО, не дает такого сосредоточенного жара, как кокс; поэтому древесный уголь способствует получению малокремнистого, т. е. передельного чугуна. Получение такого чугуна, — притом, чистого в отношении фосфора и серы („высококачественного“) — составляет задачу древесноугольных печей. Наши уральские печи выполняют ее в настоящее время недостаточно хорошо, благодаря стечению многих неблагоприятных обстоятельств. Прекрасно решают эту задачу шведские печи, выплавливающие чугун с минимальным содержанием всех примесей (кроме углерода), — чугун, пользующийся мировой репутацией.

Древесноугольные печи могут давать и литейный чугун, но — это чугун особых качеств: в нем мало кремния и фосфора; он идет для специального назначения, — особого „крепкого“ машинного литья, прокатных валов, изделий с закаленной поверхностью и, между прочим, колес с закаленным ободом для товарных вагонов (в США).

У нас на Урале на Тагильском заводе долгое время выплавливались на древесном угле и специальные чугуны — ферроманган, ферросилиций и даже феррохром, но производство это представляло явный экономический абсурд: расход горючего на единицу сплава доходил до 5 единиц; именно он указывал на непригодность древесного угля для развития самых высоких температур в горну доменной печи.

2. Переходя к другим видам горючего, нужно сказать, что антрацит, давая сильный сосредоточенный жар в горну доменной печи, наиболее пригоден для выплавки литейного чугуна, но вследствие своеобразного географического положения антрацитовых залежей — и у нас и в Пенсильвании — по отношению к рудным месторождениям и залежам коксующегося кам. угля, выплавка чугуна на антраците в настоящее время прекращена в Пенсильвании, а у нас возобновлена недавно только ввиду „чугунного голода“ (коксовый чугун обходится дешевле).

3. Сырой каменный уголь (см. стр. 23 и 72), долгое время служивший для выплавки литейного чугуна в Шотландии, теперь уже вышел из употребления, но работа на камен-

ном угле возродилась у нас — в Сибири и на Урале (уголь пласта «Мощного»). Этот уголь резко отличается от шотландского меньшим содержанием летучих и в доменной печи единица его заменяет единицу кузнечного кокса, даже при выплавке литейного чугуна в печи очень малых размеров (Гурьевский завод в Кузбассе). Пока не установлена предельная высота печей для работы на этом горючем, фактически же она не превышает 20 м, что, конечно, дает меньшую производительность, чем работа на коксе в больших печах, но не мешает получать какой угодно сорт чугуна с небольшим расходом горючего, как показывает работа доменных печей среднего Урала.

4. Торфяной уголь (или кокс) в самое последнее время тоже был применен для выплавки чугуна (Выксунский завод) и показал себя вполне способным давать очень горячий литейный чугун, не требуя усиленного расхода горючего по сравнению с коксом. Фактически расход был ниже, чем обыкновенный на коксе, но это объясняется не особыми свойствами горючего, а особенностью в профиле (цилиндрический) и размерах печи (всего 2,6 м диам.), равномерным распределением газов, создавшим исключительно хорошую восстановительную работу их (см. табл. состава газов).

Изменения в свойствах сырых материалов доменной плавки отражаются на результатах ее (производительности печи, или расходе горючего, или том и другом сразу) в большей или меньшей мере, но обыкновенно эти свойства не находятся под контролем доменной техника: ему приходится иметь дело с теми материалами, которые ему дают, потому что эти материалы являются наиболее выгодными по цене, или даже единственными доступными. Однако, в его распоряжении имеются другие средства, с помощью которых он может «управлять» печью, т. е. менять состав чугуна и его суточный выход. Средства эти: дутье, расход горючего и состав шихты.

3. Интенсивность плавки

Не касаясь пока нагрева дутья и говоря лишь о количестве дутья, нужно сказать, что с помощью его устанавливается желаемая или возможная при данных материалах интенсивность плавки. Последняя определяется научно временем пребывания колаш в печи, но практически обыкновенно выражается коэффициентом использования вместимости печи или числом куб. м объема на одну тонну суточной производительности. Тот и другой способ выражения дают сравнимые числа лишь в случае плавки одинаковых сырых материалов (богатство и удобовосстановимость руды, плотность горючего).

НЕ
УДУНТ
(ДМет)

Древесный уголь занимает объем в 3 раза больший, чем кокс при одинаковом весе, поэтому интенсивность плавки на древесном угле гораздо выше, чем на коксе при одинаковой суточной производительности на 1 куб. м объема печи (Южи. Урал и Украина — 1½ куб. м на 1 т передельного чугуна).

Какова должна быть интенсивность плавки, т. е., практически, какое количество дутья должна получить печь данных размеров, определяется каждым доменным техником чисто опытным путем, руководясь уже достигнутыми результатами работы печей при аналогичных условиях. По мере развития доменной техники, интенсивность плавки постепенно возрастает во всех металлургических районах и до чего она дойдет — трудно сказать (достигнутые уже результаты в смысле времени пребывания руды — были приведены выше).

4. Температурные условия

Они создаются расходом горючего и степенью нагрева дутья. Оба эти фактора действуют не одинаково (см. стр. 166-167) и второй выгоднее первого, но, используя высокий нагрев, насколько он доступен и выгоден, приходится прибегать и к увеличению расхода горючего; при выплавке литейного чугуна — на 20 % в среднем по сравнению с ходом на передельный чугун и на 225—240 % для получения ферромангана и ферросилиция.

Каковы температуры, которые создаются в горну современных доменных печей, — об этом мы получили возможность судить лишь недавно, после опубликования результатов массовых измерений (оптическим пирометром), произведенных в США. Вот результаты этих измерений:

Температура	У фурм. Выпуск. шлак		Выпуск. чугун
1. 5 др. угольных печей (средн.)	1669	1451	1415°C
2. 48 коксовых печей, (средн. для всех сортов чугуна)	1708	1526	1472 "
3. Коксовые печи работающие на литейн. чугуне	1748	1553	1493 "
4. То же, при работе на мартеновский чугун	1689	1522	1468 "
5. 5 коксовых печей, работавших на зеркальный чугун	1597	1427	1392 "
6. 7 коксовых печей, работавших на ферроманган	1550	1426	1386 "

Данные эти подтверждают, что в горну древесноугольных печей развивается менее высокая температура, чем коксовых. Но указанная в таблице разность в температурах у фурм не отвечает, строго говоря, действительности, т. к. оптический

пирометр дает температуру только у глаза фурм, а в „фокусе горения” она выше и разница для коксовых печей должна быть больше, чем для древесноугольных, вследствие неодинакового характера горения при том и другом топливе (см. стр. 171) и более высокой температуры нагрева дутья при коксе.

Печи, работающие на литейный чугун, имеют более высокую температуру горна (горючего у фурм, чугуна и шлака), чем средняя температура для всех сортов чугуна, а работающие на мартеновский чугун — более низкую, как и надобно было ожидать. Но чего нельзя было ожидать — это более низкой температуры при работе на ферроманган. По отношению к нему данные американцев недавно были подтверждены В. Котельниковым на Макеевском заводе: температура ферромангана была 1362° , а сопровождающего его шлака — 1470° .

Высокий расход горючего при работе на ферроманган невольно заставляет ожидать более высоких температур, действительно же полученные представляют хорошее доказательство того положения, что усиленный расход горючего — малодействительное средство для повышения температуры в горну доменной печи и что плавкость шлака управляет температурой в нижней части печи (здесь происходит образование легкоплавкого силиката марганца, см. стр. 146).

Температура, с которой покидают газы колошник, находится в зависимости, главным образом, от содержания влаги и гидратной воды в плавильных материалах, а затем — от веса шихты на 1 горючего.

Наименьшую температуру колошника имеют печи, выплавающие томасовский чугун из бурых железняков, содержащих до 25% воды, именно, $120-100^{\circ}$, а иногда и 70° . Красные железняки Верхнего озера (10—12% воды) позволяют иметь в больших печах $150-160^{\circ}$, а наши криворожские (сухие) не менее 200° (до 250° при нормальной работе). Более высокая температура на колошнике может получаться нормально лишь при плавке обожженных руд (до 320°), для других руд температура 300° уже указывает на неэкономичный ход печи.

Итак, — вот в каких пределах осуществляется основное требование доменного процесса — иметь горячий горн и холодный колошник. Но для возможно полного восстановления руды газами и предупреждения преждевременного плавления пустой породы ее нужно иметь в печи широко развитую область умеренных температур.

Какими же средствами располагает доменный техник для достижения этого? Нижеследующими тремя:

1) увеличением размеров доменных печей до крайних пределов, допускаемых качеством сырых материалов, что уже осуществлено во всех металлургических районах в

такой мере, что осталось очень немного печей, подлежащих перестройке с этой целью;

2) подъемом температуры дутья, — тем более необходимым, чем выше температура колошника;

3) подачей надлежащего количества дутья, сбалансированного с поперечными сечениями печи (для облегчения равномерного распределения газов), под надлежащими давлениями, в соответствии со степенью проницаемости столба плавильных материалов.

5. Состав шихты

Правильное ведение доменной печи предполагает, что составляется шихта на каждый сорт чугуна так, чтобы полученный шлак способствовал по своим физическим свойствам (трудноплавкости, текучести) и химическому составу переходу в чугун нужных элементов и мешал переходу вредных или нежелательных и чтобы, вместе с тем, количество шлака обеспечивало правильный ход печи и однородность получаемого продукта без излишних расходов тепла на плавление шлака.

Основания для расчета шихты на разные сорта чугуна были даны при изложении процессов восстановления и плавления, а как осуществляется самый расчет — излагается в части, посвященной работе печи (см. отд. изд. „Расчет доменных шихт“). Часто однако доменный техник бывает поставлен в такое положение, что он не в состоянии удовлетворить всем вышеуказанным требованиям одновременно, т. к. лишен возможности выбирать сырые материалы. В таком случае ему приходится идти на компромисс — допускать отступления от наиболее желательного состава шлака, устанавливая его количество, или — наоборот. Иногда, наконец, ему приходится попускаться как составом шлака, так и его количеством, обеспечивая получение желаемого чугуна расходом горючего и количеством флюса.

НБ
УДУНТ
(ДМет1)

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Изменение химического состава газов на пути к колошнику (глава III)	3
Развитие и использование тепла в доменной печи, как результат всех физико-химических процессов доменной плавки (глава IV) .	39
Общее заключение относительно условий получения чугуна в доменной печи (глава V)	69

НБ
УДУНТ
(ДМетI)

Чел. музей 2Мет
1895

УДУНТ
(ДМетІ)

ЦЕНА 2 руб.

Сканувала Радул М.А.

СКЛАД ИЗДАНИЯ:

Мосива, Б. Калужская, 14, Московский институт стали

НБ
УДУНТ
(ДМетІ)