

1 Пылегазовые выбросы при выплавке стали в электропечах

1.1 Общие сведения

По данным World Steel Association [1], мировое производство стали в 2012 г. составило 1,519 млрд т. В число крупных производителей входят: Китай – 716,5 млн т; Япония – 107,2 млн т; США – 88,7 млн т; Индия – 77,6 млн т; Российская Федерация – 70,4 млн т; Южная Корея – 69 млн т; Германия – 42,7 млн т; Турция – 35,89 млн т; Бразилия – 34,5 млн т; Украина – 32,98 млн т; Италия – 27,3 млн т. Доля стали, произведенной в электропечах, в среднем составляет около 40 % от общего объема выплавляемой стали, а в некоторых странах она достигает 70 % и выше. Следует отметить, что спрос на металл продолжает расти.

В России за этот период было выплавлено 70,4 млн т стали, из них около 20 млн т в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Объем выбросов металлургическими предприятиями загрязняющих веществ в атмосферный воздух составил 4469,1 тыс. т, в том числе твердых веществ – 306,0 тыс. т, жидких и газообразных – 4163,1 тыс. т (из них SO_2 – 2487,5, CO – 1501,3, NO_x – 122,8 тыс. т). Одна треть выбросов (1555,2 тыс. т) приходится на производство ферросплавов, стали, проката, из них на долю крупнейших производителей приходится, тыс. т: ОАО «Северсталь» (г. Череповец) – 315,3, ОАО НЛМК (г. Липецк) – 280,5.

Объем отходов в металлургическом производстве и производстве готовых металлических изделий составил 175,25 млн т, в том числе количество пыли, уловленной в процессе очистки технологических газов, составило порядка 3 млн т.

1.2 Газообразные выбросы

Первичные газовые выбросы составляют 80 – 90 % от их общего количества. Они образуются в процессе плавления, окисления и рафинирования металла в самой печи при работе под током, когда рабочее пространство закрыто сводом. Улавливание этих выбросов осуществляют обычно прямым газоотсосом через отверстие в своде или арке рабочего окна печи.

Вторичные пылегазовые выбросы образуются при заправке печи и завалке шихты, а также при выпуске металла. Эти выбросы кратковременны и составляют 10 – 20 % от их общего количества. Их не удастся уловить с помощью прямого газоотсоса из печи. Для их улавливания над печью устанавливается зонг.

Объем выбросов зависит от применяемого сырья, технологического режима плавки, использования интенсификаторов, способа отвода газов от печи и т.д. [2]. По ходу плавки состав газов в зависимости от скорости выгорания углерода изменяется в следующих пределах [3]:

Компоненты	CO	CO ₂	H ₂	O ₂	N ₂
Содержание, % объемн.	15 – 25	5 – 11	0,5 – 35	3,5 – 10	61 – 72

На режим газовыделения оказывает влияние ряд факторов, и в первую очередь подсос воздуха в печь, который зависит от внутрипечного давления, качества уплотнения имеющихся зазоров, наличия автоматического регулирования процесса выплавки и т. п.

В таблице 1.1 приведены количественные характеристики выбросов газов из дуговых электросталеплавильных печей при работающей системе газоочистки и отсосе газов через отверстие в своде печи.

Таблица 1.1 – Выбросы газов из дуговых электросталеплавильных печей

Вместимость печи, т	Масса садки, т	Мощность трансформатора, кВт	Количество газов, выбрасываемых из печи, м ³ /ч	Удельные выбросы газа, м ³ на 1 т стали
5	7,0	3 000	~ 700	От 350 до 450
10	11,5	5 000	~ 1100	
20	25,0	7 000	~ 2300	
40	45,0	15 000	~ 4000	
100	11,0	25 000	~ 8000	

1.3 Пылевые выбросы

Одним из главных источников пылеобразования в ДСП являются электрические дуги. Под действием электрических дуг в относительно малом объеме выделяется большое количество тепловой энергии и устанавливаются весьма высокие температуры, достигающие 3000 – 3500 °С. Это приводит к образованию пылевых выбросов как из-за электрической эрозии поверхности кусков

шихты, так и за счет испарения железа и других элементов, содержащихся в шихте и жидкой ванне. Наличие значительных электродинамических и газодинамических сил в зонах дугового разряда, особенно в высокомошных печах, приводит также к интенсивному разбрызгиванию жидкой ванны и к выбросам образующихся частиц металла и шлака из этих зон вместе с газами с высокой скоростью. Наиболее крупные частицы металла и шлака возвращаются в расплав под действием сил гравитации и турбулентных пульсаций газов, а остальные выносятся газовыми потоками из печи.

Другим источником интенсивного пылеобразования является продувка жидкой ванны кислородом. При продувке металла кислородом образование пыли происходит в результате дробления капель жидкого металла в струе кислорода и выхода на поверхность ванны пузырей CO , а также испарения элементов жидкого металла и шлака в реакционной зоне, температура которой достигает $2700 - 2800^\circ\text{C}$. Интенсивность пылеобразования в этот период зависит от ряда факторов – интенсивности подачи кислорода, концентрации углерода и температуры металла, конструкции кислородной фурмы, её положения относительно поверхности ванны. В период продувки ванны кислородом интенсивность пылеобразования в ДСП достигает, по сравнению с другими периодами плавки, максимальных значений.

Количество уловленной пыли, образующейся в электросталеплавильном производстве, составляет более $15 - 20$ кг на 1 т стали, или, с учетом объема производства электростали в России, 400 тыс. т в год. В 100 -т ДСП каждый час образуется примерно 2 т пыли. Поэтому одной из важнейших экологических проблем электроплавки является проблема пылеобразования, а одной из задач – подавление его в процессе плавки.

Снижение пылеобразования позволяет не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и улучшить технико-экономические характеристики процесса плавки путем увеличения выхода годного, способствует сохранению природных ресурсов, вовлекаемых в производство, снижению выбросов токсичных веществ в атмосферу (все компоненты пыли отрицательно влияют на окружающую среду), минимизации количества отходов.

В результате очистки отходящих газов от пыли удастся справиться лишь с одной стороной проблемы охраны окружающей среды – минимизацией загрязнения атмосферы. Другая сторона проблемы связана с хранением и/или утилизацией образовавшихся

отходов в виде уловленной пыли, для чего необходимо проведение всестороннего анализа процесса утилизации с целью последующего возврата пыли в технологический процесс.

Во время плавки выход газов изменяется, его максимальные значения достигаются в период кипения. Максимальный выход газов может происходить в течение до 30 мин и превышать средний уровень на 60 – 70 %.

2 Расчет состава пылегазовых выбросов из ДСП на основе материального баланса плавки

Задание

Рассчитать состав пылегазовых выбросов ДСП с последующей доводкой на агрегате комплексной обработки стали АКОС на примере стали марки 35ГС.

2.1 Расчет металлошихты для плавки стали марки 35ГС

Исходные данные

В таблице 2.1 приведен химический состав стали марки 35ГС.

Таблица 2.1 – Химический состав стали 35ГС, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
0,3 – 0,37	0,6 – 1,2	0,8 – 1,2	≤0,3	≤0,3	≤0,045	≤0,04	≤0,3	Остальное

В таблице 2.2 приведен расчетный состав металлошихты. В таблице 2.3 представлен состав шлакообразующих материалов.

Таблица 2.2 – Состав металлошихты (расчетный), %

Материал	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe	Сумма
Углеродистый лом	0,25	0,30	0,50	0,30	0,30	0,05	0,04	0,3	97,96	100,00
Чугун	4,00	1,00	0,80	–	–	0,02	0,05	–	94,13	100,00

Таблица 2.3 – Состав шлакообразующих материалов, %

Материал	Доля, %	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Сумма
Агломерат	1,5	12,00	64,00	0,02	10,00	0,60	12,58	0,80	–	100,00
Известь	2,0	–	–	–	2,50	1,00	93,00	3,30	0,20	100,00

В завалку подается известь в количестве 2 % и агломерат в количестве 1,5 % от массы металлошихты.

В таблице 2.4 приведен состав легирующих. В таблице 2.5 представлены значения коэффициента усвоения элементов, в таблице 2.6 – технологические параметры ДСП.

Таблица 2.4 – Состав легирующих, %

Материал	C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe
ФС75	0	77,00	0,4	0,4	0,02	0,050	22,130
ФМн90	0,18	0,01	90,4	0	0,01	0,064	9,336

Таблица 2.5 – Значение коэффициента усвоения элементов

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
$K_{\text{усв.}}, \%$	90	85	90	95	97	96

Таблица 2.6 – Технологические параметры печи

Параметр	Ширина, мм	Высота, мм	Площадь, м ²	Высота до пят свода, мм
Размеры рабочего окна	1450	1045	1,52	2070

Расчет соотношения «лом – чугун»

Расчет рассмотрен на примере выплавки стали марки 35ГС (таблица 2.7) в печи вместимостью 100 т.

Таблица 2.7 – Усредненный состав стали, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
0,32	0,7	0,9	0,3	0,3	0,045	0,04	0,3	97,095

Для обеспечения дегазации расплава необходимо, чтобы в период расплавления окислилось 0,2 % углерода, в период окисления – 0,4 %, итого за время плавки должно окислиться 0,6 % углерода. Следовательно, с учетом того что в металле к концу плавки должно остаться 0,3 % углерода, в шихте его должно содержаться

$$0,3 + 0,6 = 0,9 \%$$

Если доля лома в металлошихте составляет X , то с учетом содержания углерода в ломе и чугуна (см. таблицу 2.2) количество углерода составляет

$$0,25X + 4(1 - X) = 0,90 \%,$$

где 0,25 – содержание углерода в ломе, %; 4 – содержание углерода в чугуна, %.

Отсюда $X = 0,83$, т.е. доля лома составляет 83 %.

Тогда доля чугуна в металлошихте составляет

$$1 - X = 1 - 0,83 = 0,17, \text{ или } 17 \%,$$

а отношение количества лома к количеству чугуна

$$\frac{0,83}{0,17} = 4,78 \quad \frac{0,83}{0,17} = 4,78 .$$

В таблице 2.8 приведен состав металлошихты в завалке.

Таблица 2.8 – Состав металлошихты в завалке, %

Материал	Доля, %	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
Углеродистый лом	83	0,21	0,25	0,42	0,25	0,25	0,04	0,03	0,25	81,31
Чугун	17	0,68	0,17	0,14	–	–	0	0,01	0	16,00
Завалка	100	0,89	0,42	0,55	0,25	0,25	0,04	0,04	0,25	97,31

Для успешной дефосфорации рекомендуется обеспечивать основность шлака на уровне 2 – 3. В окислительный период в ванну присаживают до 1,5 – 2 % извести от массы шихты.

Необходимое количество металлошихты для получения 100 т готового металла определяется следующим образом:

$$\frac{97,095}{97,3 - 4} \cdot 100\,000 = 104\,075 \text{ кг},$$

где 97,095 – содержание железа в готовой стали, %; (97,3 – 4) – содержание железа в шихте за вычетом окислившегося (4 %) за время плавки, %.

Для обеспечения раннего шлакообразования, предохраняющего металл от окисления, и для дефосфорации в процессе плавления в завалку подается известь в количестве 2 % и агломерат в количестве 1,5 % от массы шихты.

В таблице 2.9 приведен состав завалки.

Таблица 2.9 – Состав завалки

Материал	Содержание, %	Масса, кг
Лом	83,0	$104\,075 \cdot 0,827 = 86\,382,5$
Чугун	17,0	17 692,8
Итого	100,0	104 075,3
Агломерат	1,5	1561,1
Известь	2,0	2081,5

В таблице 2.10 приведен расход материалов на плавку.

Количество углерода, содержащегося в ломе в расходе материала на плавку, определяется следующим образом:

$$\frac{86\,382,5 \cdot 0,25}{100} = 216,0 \text{ кг.}$$

Аналогично проводится расчет содержания других элементов в ломе и чугуна.

Таблица 2.10 – Расход материалов на плавку

Материал	Количество, кг	Количество элемента, вносимого каждой составляющей металлошихты, кг								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
Лом	86 382,5	216,0	259,1	431,9	259,1	259	43,2	34,6	259,1	84 620,3
Чугун	17 692,8	707,7	176,9	141,5	0	0	3,5	8,8	0	16 654,2
Итого	104 075,3	923,7	436,1	573,5	259,1	259	46,7	43,4	259,1	101 274,6
Итого, %	100	0,89	0,42	0,55	0,25	0,25	0,04	0,04	0,25	97,31

В таблице 2.11 представлен расчетный состав металла на конец периода расплавления.

Количество углерода на конец периода окисления составляет (таблица 2.12):

$$\frac{923,7(100 - 23)}{100} = 711,2 \text{ кг.}$$

Аналогично проводится расчет содержания других элементов в ломе.

Таблица 2.11 – Расчетный состав металла на конец периода расплавления

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe	Сумма
В шихте, кг									
923,7	436,1	573,5	259,1	259	46,7	43,4	259,1	101 274,6	104 075,3
Окислилось, %									
23	50	10	10	0	0	53	0	1	–
Осталось, кг									
711,2	218,0	516,1	233,2	259,1	46,7	20,4	259,1	100 261,8	102 525,8
Осталось, %									
0,69	0,21	0,50	0,23	0,25	0,05	0,02	0,25	97,79	100,00

Таблица 2.12 – Расчетный состав металла на конец периода окисления

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe	Сумма
В шихте, кг									
711,2	218,0	516,1	233,2	259,1	46,7	20,4	259,1	100 261,8	102 525,8
Окислилось, %									
56	100	70	11	4	33	25	4	3	–
Осталось, кг									
312,9	0	154,8	207,6	248,8	31,3	15,3	248,8	97 254,0	98 473,5
Осталось, %									
0,32	0	0,16	0,21	0,25	0,03	0,02	0,25	98,76	100,00

Выход годного составляет

$$R = \frac{Q_{\text{мет}}}{Q_{\text{шихта}}} \cdot 100 \%,$$

где $Q_{\text{мет}}$ – количество (масса) полученного металла, кг; $Q_{\text{шихта}}$ – масса металлошихты, кг.

После подстановки численных значений

$$R = \frac{98\,473,5}{104\,075,3} \cdot 100 \% = 94,6 \, \%$$

Потери шихты со шлаком и пылью составляют 5,4 %.

Расчет расхода легирующих компонентов

Расчет расхода ферросплавов ведется по формуле

$$Q_{\text{ф.спл}} = \frac{m_0 [\text{C}(i) - \text{C}'(i)] \cdot 100 \%}{A \cdot B},$$

где m_0 – вместимость печи, т; $\text{C}(i)$ – содержание легирующего элемента в готовом материале, %; $\text{C}'(i)$ – содержание легирующего элемента в металле перед присадкой ферросплавов, %; А – содержание легирующего элемента в ферросплаве, %; В – коэффициент усвоения легирующего элемента, %.

Расход ферросилиция марки ФС75, с учетом того что на конец окислительного периода он полностью окисляется (см. таблицу 2.11), составляет

$$Q_{\text{ФС75}} = \frac{100\,000(0,7 - 0) \cdot 100}{77 \cdot 85} = 1069,52 \text{ кг.}$$

Расход ферромарганца марки ФМн90, с учетом того что на конец окислительного периода остается 0,16 кг не окислившегося марганца (см. таблицу 2.12), составляет

$$Q_{\text{ФМн90}} = \frac{100\,000(0,9 - 0,16) \cdot 100}{90,4 \cdot 90} = 912,94 \text{ кг.}$$

Количество элемента, кг, внесенного ферросплавом, рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{ф.спл}} \frac{\text{Э}_{\text{ф.спл}}}{100} \cdot \frac{K_{\text{усв}(\text{э})}}{100},$$

где $Q_{\text{ф.спл}}$ – количество ферросплава, кг; $\text{Э}_{\text{ф.спл}}$ – содержание элемента в ферросплаве, %; $K_{\text{усв}(\text{э})}$ – коэффициент усвоения элемента, %.

Количество кремния, внесенного ферросилицием:

$$Q_{\text{Si(ФС75)}} = 1069,52 \frac{77}{100} \frac{85}{100} = 700,0 \text{ кг.}$$

Дальнейшие расчеты проводятся аналогично. Результаты расчета представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Расчетный химический состав металла после АКOC

Материал	Количество, кг	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
Жидкий металл (см. таблицу 2.12)	98 473,5	312,9	0,0	154,8	207,6	248,8	31,3	15,3	248,8	97 254,0
ФС75	935,9	0	700,0	3,9	4,1	0	0,2	0,5	0	227,2
ФМн90	826,8	1,5	0,1	742,8	0	0	0,1	0,6	0	81,8
Итого	236,2	314,4	700,1	901,5	211,6	248,8	31,6	16,4	248,8	97 563,0
Итого, %	100	0,31	0,70	0,90	0,21	0,25	0,03	0,02	0,25	97,33

Расчетный химический состав металла после АКOC представлен в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Расчетный химический состав металла

Состав стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
Конечный	0,31	0,70	0,90	0,21	0,25	0,030	0,02	0,25	96,96
Марочный	0,30–0,37	0,60–1,20	0,80–1,20	≤0,30	≤0,30	≤0,045	≤0,04	≤0,30	Остальное

Как следует из таблицы 2.14, по завершении выплавки и внепечной обработки расчетный состав металла соответствует марочному.

2.2 Расчет состава пылегазовых выбросов

Период плавления

Расчет количества шлака и газа. Количество окисляющихся элементов, а также количественный состав металла по окончании периода плавления приведен в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Расчетный состав металла на конец периода расплавления

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe	Сумма
В шихте, кг									
923,7	436,1	573,5	259,1	259,0	46,7	43,4	259,1	101 274,6	104 075,3
Окислилось, %									
23	50	10	10	0	0	53	0	1	–
Окислилось, кг									
$923,7 \cdot 0,23 = 212,44$	218,04	57,35	25,91	0	0	23,00	0	1012,75	1549,49
Остаток, кг									
711,2	218,0	516,1	233,2	259,1	46,7	20,4	259,1	100 261,8	102 525,8
Остаток, %									
0,69	0,21	0,50	0,23	0,25	0,05	0,02	0,25	97,79	100,00

Окислившийся углерод переходит в газовую фазу в виде CO (80 %) и CO₂ (20 %). Остальные компоненты переходят в шлак (85 %) и пылевые выбросы (15 %). В таблице 2.16 приведено расчетное количество окислившихся элементов и количество образующихся продуктов реакции (шлак, газ, пыль). Расход электродов принят равным 3 кг/т.

На окисление углерода, в том числе электродов и других примесей металлошихты, потребуется 1488,01 кг кислорода. На окисление компонентов шихты расходуется 968,50 кг кислорода. Для интенсификации окисления углерода и примесей осуществляется продувка ванны технологическим кислородом с содержанием O₂ 99,5 %.

Таблица 2.16 – Расчет количества шлака и газа в период плавления

Компонент	Окислится, кг	Требуется кислорода, кг	Образуется, кг		
			шлака	газа	пыли
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	$0,8 \cdot 212,44 = 69,95$	$\frac{169,95 \cdot 16}{12} = 226,39$	0	$\frac{169,95 \cdot 28}{12} = 396,35$	0
$C + O_2 = CO_2$	$0,2 \cdot 212,4 = 43,61$	$\frac{43,61 \cdot 32}{12} = 116,18$	0	$\frac{42,49 \cdot 44}{12} = 159,78$	0
$Si + O_2 = SiO_2$	218,04	$\frac{218,04 \cdot 32}{28} = 248,42$	$\frac{218,04 \cdot 60}{28} \cdot 0,85 = 397,12$	0	$\frac{218,04 \cdot 60}{28} \cdot 0,15 = 69,97$
$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO$	57,35	$\frac{57,35 \cdot 16}{55} = 16,70$	$\frac{57,35 \cdot 71}{55} \cdot 0,85 = 62,94$	0	$\frac{57,35 \cdot 71}{55} \cdot 0,15 = 11,11$
$2P + \frac{5}{2} O_2 = P_2O_5$	23,00	$\frac{23,00 \cdot 80}{62} = 29,70$	$\frac{23,00 \cdot 142}{62} = 52,71$	0	0
$2Cr + \frac{3}{2} O_2 = Cr_2O_3$	25,91	$\frac{25,91 \cdot 48}{104} = 11,96$	$\frac{25,91 \cdot 152}{104} \cdot 0,85 = 32,20$	0	$\frac{25,91 \cdot 152}{104} \cdot 0,15 = 5,68$
$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$	$0,8 \cdot 1012,75 = 810,20$	$\frac{810,2 \cdot 16}{56} = 232,11$	$\frac{810,20 \cdot 72}{56} = 1042,31$	0	0
$2Fe + \frac{3}{2} O_2 = Fe_3O_4$	$0,2 \cdot 1012,75 = 202,55$	$\frac{202,55 \cdot 48}{112} = 87,00$	$\frac{202,55 \cdot 160}{112} \cdot 0,85 = 246,15$	0	$\frac{202,55 \cdot 160}{112} \cdot 0,15 = 43,44$
Из электродов					
CO	$0,7 \cdot 300 = 210,00$	$\frac{210 \cdot 16}{12} = 279,73$	0	$\frac{210 \cdot 28}{12} = 489,73$	0
CO ₂	$0,3 \cdot 300 = 90,00$	$\frac{90 \cdot 32}{12} = 239,77$	0	$\frac{90 \cdot 44}{12} = 329,77$	0
Итого	1850,61	1488,01 (из них на прохождение реакций 968,50 кг)	1832,79	1375,63	130,20

Расчет количества подсосанного воздуха. Ниже указаны размеры рабочего окна:

- ширина 1450 мм;
- высота 1045 мм;
- площадь 1,52 м²;
- высота до пят свода 2070,0 мм.

Для расчета количества подсосанного воздуха в период плавления необходимо знать среднее значение разрежения P , Па, в середине открытого рабочего окна:

$$P = \left| p_{\text{свод}} - 9,81 \cdot \left(\frac{H_{\text{св}}}{1000} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{1000} \cdot \frac{k}{100} \right) \left(\frac{\rho_{\text{в}} \cdot 273}{t_{\text{в}} + 273} - \frac{\rho_{\text{в}} \cdot 273}{t_{\text{г}} + 273} \right) \right|$$

где $p_{\text{свод}} = 5$ – давление под сводом, Па; $H_{\text{св}}$ – высота до пят свода, соответствующая вместимости печи, мм; h – высота рабочего окна, соответствующая вместимости печи, мм; $\rho_{\text{в}} = 1,29$ – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³; $k = 30$ – степень открытия рабочего окна в период плавления, %; $t_{\text{в}} = 20$ – температура окружающего воздуха, °C; $t_{\text{г}} = 1540$ – температура в рабочем пространстве печи в период плавления, °C.

После подстановки численных значений

$$P = \left| 5 - 9,81 \cdot \left(\frac{2070}{1000} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1045}{1000} \cdot \frac{30}{100} \right) \cdot \left(\frac{1,29 \cdot 273}{20 + 273} - \frac{1,29 \cdot 273}{1540 + 273} \right) \right| = 13,91 \text{ Па}$$

Объем воздуха, всасываемого в рабочее пространство печи в период окисления,

$$V_{\text{в(окисл)}} = 60 \cdot n \cdot S \cdot k \cdot 0,01 \cdot \frac{273}{t_{\text{в}} + 273} \sqrt{\frac{2p}{\rho_{\text{в}} \cdot 273}},$$

где $V_{\text{в}}$ – количество воздуха, подсосанного в рабочее пространство печи в период плавления, м³/мин; $n = 0,8$ – коэффициент расхода газа для толстых стенок; S – площадь рабочего окна, соответствующая вместимости печи, м²; $k = 30$ – степень открытия рабочего окна в период плавления, %; $t_{\text{в}} = 20$ – температура окружающего воздуха, °C; p – среднее значение разрежения в середине открытого рабочего окна, Па; $\rho_{\text{в}} = 1,29$ – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³.

После подстановки численных значений

$$V_{\text{в(плав)}} = 60 \cdot 0,8 \cdot \frac{1450 \cdot 1045}{1000 \cdot 1000} \cdot 30 \cdot 0,01 \cdot \frac{273}{20 + 273} \sqrt{\frac{2 \cdot 13,91}{1,29 \cdot 273}} = \\ = 78,25 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Продолжительность периода плавления составляет 50 мин.

Объем воздуха, подсасываемого в рабочее пространство печи в период плавления,

$$V_{\text{в}} = V_{\text{в(плав)}} \cdot \tau,$$

где τ – продолжительность периода плавления, мин.

После подстановки численных значений

$$V_{\text{в}} = 78,25 \cdot 50 = 3912,35 \text{ м}^3.$$

Объем кислорода в воздухе

$$V_{\text{O}_2} = 3912,35 \cdot 0,21 = 821,59 \text{ м}^3.$$

Масса кислорода

$$M_{\text{O}_2} = 821,59 \cdot \frac{32}{22,4} = 1173,71 \text{ кг}.$$

Объем азота в воздухе

$$V_{\text{N}_2} = 3912,35 \cdot 0,78 = 3051,64 \text{ м}^3.$$

Масса азота

$$M_{\text{N}_2} = 3051,64 \cdot \frac{28}{22,4} = 3814,54 \text{ кг}.$$

Количество азота, подаваемого в уплотнители электродных отверстий,

$$V_{\text{N}_2(\text{эо})} = V(\text{N}_2) \cdot m_0 \cdot \tau,$$

где $V(\text{N}_2) = 0,2$ – удельный расход азота, подаваемого в уплотнители электродных отверстий, $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \tau)$; $m_0 = 100$ – вместимость печи, $\tau, \tau = 50$ – продолжительность периода плавления, мин;

$$V_{N_2(\text{зо})} = 0,2 \cdot 100 \cdot 50 = 1000 \text{ м}^3 \text{ или } M_{N_2(\text{зо})} = 1000 \cdot \frac{28}{22,4} = 1250 \text{ кг.}$$

Суммарное количество азота в период плавания

$$M_{\Sigma N_2} = 3814,54 + 1250 = 5064,54 \text{ кг.}$$

Принимается, что углерод электродов окисляется кислородом воздуха.

Масса кислорода

$$M_{O_2} = 1173,71 - 279,73 - 239,77 = 654,20 \text{ кг.}$$

С технологическим кислородом вносится азот в количестве (см. таблицу 2.15)

$$0,005 \cdot 968,5 = 4,84 \text{ кг.}$$

30 % CO_2 образующегося в результате окисления углерода шихты, в рабочем пространстве печи окисляется до CO_2 кислородом воздуха. Для этого потребуется кислорода $226,39 \cdot 0,3 = 67,91$ кг, при этом образуется диоксида углерода $169,96 \cdot 0,3 \cdot 44/12 = 186,95$ кг (см. ниже таблицу 2.17).

В таблице 2.17 приводится состав и количество образующихся газов.

Таблица 2.17 – Состав и количество образующихся газов

Компонент	Масса, кг	Содержание, %
CO	$396,35 + 489,73 -$ $-226,39 - 0,3 \cdot (16 + 12)/12 = 767,10$	8,93
CO ₂	$159,78 + 329,77 + 186,95 = 676,51$	7,88
O ₂	$968,50 + 1173,71 - 67,91 = 2074,29$	24,16
N ₂	$3814,54 + 1250 + 4,84 = 5069,39$	59,03
Итого	8587,29	100,00

Состав пыли. В таблице 2.18 приведены состав и количество образующейся пыли.

Таблица 2.18 – Количество и состав пыли в период плавания

Компонент	Масса, кг	Содержание, %
SiO ₂	69,97	53,74
MnO	11,11	8,53
Cr ₂ O ₃	5,68	4,36
Fe ₂ O ₃	43,44	33,36
Итого	130,20	100,00

Состав шлака. Для расчета количества и состава шлака по окончании периода плавления принимаются следующие составы шлакообразующих материалов (таблица 2.19).

Таблица 2.19 – Состав шлакообразующих материалов, %

Компонент	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Сумма
Агломерат	12	64	0,02	100	0,6	12,58	0,8	0	100,00
Известь	0	0	0	2,5	1,0	93,00	3,3	0,2	100,00
Зола электродов	0	0	0	56,6	31,7	11,80	0	0	100,10

При расчете количества и состава шлака (таблица 2.20) принимается:

- содержание золы в электродах – 0,001 %;
- расход электродов – 3 кг/т.

Количество золы, внесенной с электродами: $3 \cdot 100 \cdot 0,001 = 0,3$ кг.

Агломерат используется в качестве шлакообразующего и весь переходит в шлак.

Таблица 2.20 – Количество и состав шлака в период плавления

Источник поступления, кг	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Сумма
Металлы (см. таблицу 2.13)	1042,31	246,15	62,93	396,49	0	0	0	52,71	32,19	1832,79
Известь	0	0	0	52,04	20,82	1935,80	68,69	4,16	0	2081,51
Зола электродов	0	0	0	0,17	0,10	0,03	0	0	0	0,30
Агломерат	187,34	999,12	0,31	156,11	9,37	196,39	12,49	0	0	1561,13
Итого	1229,93	1245,28	63,25	604,81	30,28	2132,23	81,18	56,87	32,19	5475,72
Итого, %	22,46	22,74	1,16	11,05	0,55	38,94	1,48	1,04	0,59	100,00

Период окисления

В таблице 2.21 приведено количество окислившихся примесей за период окисления.

Принимается, что 70 % Fe переходит в шлак (80 % в виде FeO и 20 % в виде Fe₂O₃) и 30 % теряется вместе с газами в виде Fe₂O₃ (таблица 2.22).

Таблица 2.21 – Расчетный состав металла на конец периода окисления

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe	Сумма
В шихте, кг									
711,2	218,0	516,1	233,2	259,1	46,7	20,4	259,1	100 261,8	102 525,8
Окислилось, %									
56	100	70	11	4	33	25	4	3	–
Окислилось, кг									
$711,2 \cdot 0,56 =$ $= 398,3$	218,0	361,3	25,7	10,3	15,4	5,1	10,4	3007,9	4052,4
Осталось, кг									
312,9	0	154,8	207,6	248,8	31,3	15,3	248,8	97 254,0	98 473,5
Осталось, %									
0,32	0	0,16	0,21	0,25	0,03	0,02	0,25	98,76	100,00

Таблица 2.22 – Расчет оксидов железа, %, переходящих в шлак и газовую фазу

Реакция	Fe	O ₂	FeO	Fe ₂ O ₃
Шлак: $Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$	$3007,9 \cdot 0,7 \cdot 0,8 =$ $= 1684$	$\frac{1684 \cdot 16}{12} =$ $= 482,6$	$\frac{1684 \cdot (56 + 16)}{56} =$ $= 2167,0$	–
$2Fe + \frac{3}{2} O_2 = Fe_2O_3$	$3007,9 \cdot 0,7 \cdot 0,2 =$ $= 421,1$	181,0	–	602,1
Газ: $2Fe + \frac{3}{2} O_2 = Fe_2O_3$	$3007,9 \cdot 0,3 =$ $= 902,4$	387,8	–	1290,1

В таблице 2.23 приведено количество кислорода, требующегося для окисления примесей, окислившихся элементов и образующихся продуктов реакции (газ, шлак, пыль).

Принимаем расход электродов на плавку 7,5 кг/т (40 % окислится в период расплавления (3 кг/т), по 30 % в период окисления и в агрегате ковш-печь (2,25 кг/т)).

Расход углерода на вспенивание шлака составляет 6 кг/т.

Таблица 2.23 – Количество шлака, газа и пыли окислительного периода окисления

Компонент	Окислится, кг	Требуется кислорода, кг	Образуется, кг		
			шлака	газа	пыли
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	$398,3 \cdot 0,8 = 318,60$	$\frac{318,6 \cdot 16}{12} = 424,43$	0	$\frac{318,6 \cdot (16+12)}{12} = 743,06$	0
$C + O_2 = CO_2$	$398,3 \cdot 0,2 = 79,70$	212,22	0	291,87	0
$Si + O_2 = SiO_2$	218,00	248,40	396,49 (85 %)	0	69,97 (15 %)
$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO$	361,30	105,21	396,52	0	69,97
$2P + \frac{5}{2} O_2 = P_2O_5$	5,10	6,58	5,84 (50 %)	0	5,84
$2Cr + \frac{3}{2} O_2 = Cr_2O_3$	25,70	11,84	31,87	0	5,62
$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO$	1684,00	482,56	2167,00	0	0
$2Fe + \frac{3}{2} O_2 = Fe_2O_3$	$421,1 + 902,4 = 1323,50$	568,73	602,06	0	1290,13
$Ni + \frac{1}{2} O_2 = NiO$	10,37	2,83	0	0	13,19
Из электродов					
CO	$225 \cdot 0,7 = 157,50$	210,00	0	367,50	0
CO ₂	$225 \cdot 0,3 = 67,50$	180,00	0	247,50	0
На вспененный шлак					
CO	600,00	799,20	0	1399,20	0
Сумма	4841,20	3251,68	3599,73	3048,80	1454,73

Расчет подсосанного воздуха. Расчет подсосанного воздуха для периода окисления производится так же, как и для периода плавления:

$$p = \left| 5 - 9,81 \cdot \left(\frac{2070}{1000} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1045}{1000} \cdot 1 \right) \cdot (1,29 - 0,3) \right| = 10,03 \text{ Па};$$

$$V_{\text{в(план)}} = 60 \cdot 0,8 \cdot \frac{1450 \cdot 1045}{1000 \cdot 1000} \cdot 1 \cdot \frac{273}{20 + 273} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10,03}{1,29}} = 267,23 \text{ м}^3/\text{мин},$$

где 1 – степень раскрытия рабочего окна (100 %).

За период окисления

$$V_{\text{в}} = 267,23 \cdot 20 = 5344,66 \text{ м}^3.$$

Объем кислорода в воздухе

$$V_{\text{O}_2} = 5344,66 \cdot 0,21 = 1122,4 \text{ м}^3.$$

Масса кислорода

$$M_{\text{O}_2(\text{возд})} = 1122,4 \cdot \frac{32}{22,4} = 1603,3 \text{ кг}.$$

Объем азота в воздухе

$$V_{\text{N}_2} = 5344,66 \cdot 0,78 = 4168,9 \text{ м}^3.$$

Масса азота

$$M_{\text{N}_2(\text{возд})} = 4168,9 \cdot \frac{28}{22,4} = 5211,06 \text{ кг}.$$

На окисление углерода и других примесей металлошихты, а также углерода, поступающего из электродов и вдуваемого для вспенивания шлака, требуется 3251,68 кг O_2 (см. таблицу 2.23). Для этого осуществляется продувка ванны технологическим кислородом с содержанием кислорода 99,5 % в количестве $1,25 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$, или $25 \text{ м}^3/\text{т}$ за весь период окисления. С технологическим кислородом в печь поступает кислорода и азота соответственно:

$$V_{\text{O}_2(\text{прод})} = 25 \cdot 102,5 \cdot 0,995 = 2549,7 \text{ м}^3;$$

$$M_{\text{O}_2(\text{прод})} = 2549,7 \cdot \frac{32}{22,4} = 3642,4 \text{ кг};$$

$$V_{N_2(\text{прод})} = 25 \cdot 102,5 \cdot 0,005 = 12,8 \text{ м}^3,$$

$$M_{N_2(\text{прод})} = 12,8 \cdot \frac{28}{22,4} = 16,0 \text{ кг}.$$

В уплотнители электродных отверстий подается азот в количестве

$$V_{N_2(\text{эо})} = 0,2 \cdot 100 \cdot 20 = 400 \text{ м}^3;$$

$$M_{N_2(\text{эо})} = 400 \cdot \frac{28}{22,4} = 500 \text{ кг}.$$

Всего в печь поступает:

$$\begin{aligned} & \text{- кислорода - } M_{O_2} = M_{O_2(\text{возду})} + M_{O_2(\text{прод})} = 1603,3 + 3642,4 = \\ & = 5245,7 \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{- азота - } M_{N_2} = M_{N_2(\text{возду})} + M_{N_2(\text{прод})} + M_{N_2(\text{эо})} = 5211,1 + 16,0 + 500 = \\ & = 5727,1 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Принимается, что 30 % СО дожигается в рабочем пространстве печи кислородом воздуха до CO_2 . Согласно результатам расчета (см. таблицу 2.23):

$$\Sigma_{CO} = 743,1 + 367,3 + 1399,2 = 2509,6 \text{ кг};$$

$$\Sigma_{CO_2} = 291,9 + 247,3 = 539,2 \text{ кг}.$$

Для дожигания СО до CO_2 потребуется кислорода в количестве $(424,4 + 209,8 + 799,2) \cdot 0,3 = 430,0$ кг, при этом образуется CO_2 в количестве $(318,6 + 157,5 + 600) \cdot 0,3 \cdot 44/12 = 1183,7$ кг, а количество СО уменьшается на $(318,6 + 157,5 + 600) \cdot 0,3 \cdot (16 + 12)/12 = 753,3$ кг.

Всего для окисления всех элементов и дожигания СО до CO_2 потребуется кислорода в количестве $\Sigma_{O_2} = 3251,68 + 430,0 = 3681,7$ кг, а оставшийся кислород в количестве $(5245,7 - 3681,7 = 1564,0$ кг) уйдет с отходящими газами.

В таблице 2.24 приводится состав и количество образующихся газов.

Таблица 2.24 – Количество и состав образующихся газов

Компонент	Масса, кг	Содержание, %
CO	$2509,6 - 753,3 = 1756,3$	16,30
CO ₂	$539,2 + 1183,7 = 1722,9$	15,99
O ₂	1566,0	14,54
N ₂	5727,1	53,16
Итого	10498,8	100,00

В таблице 2.25 приводится состав и количество образующейся пыли.

Таблиц 2.25 – Количество и состав образующейся пыли

Компонент	Масса, кг	Содержание, %
SiO ₂	69,97	4,81
MnO	69,97	4,81
P ₂ O ₅	5,84	0,40
Fe ₂ O ₃	1290,13	88,69
Cr ₂ O ₃	5,62	0,39
NiO	13,20	0,91
Итого	1480,68	100,00

Для расчета количества и состава шлака по окончании периода окисления принимаются составы шлакообразующих материалов.

При расчете количества и состава шлака принимаются следующие условия:

- шлак в период плавления сливается на 50 %;
- основность шлака должна быть от 2,5 до 3,5; для расчетов принимается 3;
- содержание золы электродов составляет 0,225 кг (расход электродов в период окисления 225 кг, содержание золы в электродах 0,001 кг);
- расход футеровки составляет 0,3 кг/т.

Футеровка представляет собой магнезитовый кирпич обычной плотности с содержанием компонентов, %: 2,96 SiO₂; 0,64 Al₂O₃; 1,98 Fe₂O₃; 3,02 CaO; 91,4 MgO.

Поскольку 50 % шлака в период плавления сливается, его количество составит $5475,72 / 2 = 2737,86$ кг, в том числе содержание $\Sigma\text{SiO}_2 = \text{SiO}_{2\text{шла}} + \text{SiO}_{2\text{мет}} = 396,49 + 604,81/2 = 698,9$ кг,

где SiO_{2шла} – содержание SiO₂ в шлаке; SiO_{2мет} – оксид кремния, образовавшийся при окислении Si в металле.

Из основности шлака определяется его количество: $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 3$,

откуда $\text{CaO} = 3 \cdot 698,9 - n = 2096,7 - n$, где n – количество CaO в шлаке, кг.

Следовательно, нужно добавить CaO в количестве $\text{CaO} = 2096,7 - 2132,23/2 = 1030,6$ кг.

Содержание CaO в извести составляет 93 %, следовательно, расход извести в период окисления равен $1030,6/0,93 = 1108,2$ кг, или ~ 11 кг на 1 т стали.

В таблице 2.26 приводится количество и состав шлака в период окисления.

Таблица 2.26 – Количество и состав шлака в период окисления

Источник поступления, кг	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	S	Сумма
Металла	2167,00	602,10	396,50	396,50	0	0	0	5,80	31,90	–	3599,70
Из шлака периода плавления, кг	614,80	622,60	31,60	302,40	15,10	1066,10	40,60	28,40	16,10	15,40	2753,30
Зона электродов, кг	0	0	0	0,13	0,07	0,03	0	0	0	–	0,23
Футеровка	0	0,59	0	0,89	0,19	0,91	27,42	0	0	–	30,00
Известь	0	0	0	27,71	11,08	1030,63	36,57	2,22	0	–	1108,20
Итого	2781,80	1225,30	428,10	727,60	28,50	2097,70	104,60	36,50	48,00	15,40	7491,45
Итого, %	37,13	16,36	5,72	9,71	0,35	28,00	1,40	0,49	0,64	0,21	100,00

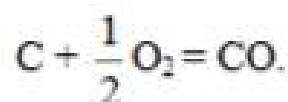
Расчет пылегазовых выбросов в АКЭС

В АКЭС не усваивается лишь кремний (0,15 %). Остается он в количестве (см. таблицу 2.13) $0,0015 \cdot 700,1 = 1,05$ кг, окисляясь по реакции



Кремний переходит в оксид кремния в количестве $1,05 \cdot 60/28 = 2,25$ кг, 15 % которого попадает в пыль – $0,15 \cdot 2,25 = 0,34$ кг на 100 т металла, а остальная часть переходит в шлак.

В печи-ковше, во время работы дуг, происходит окисление углерода электродов в количестве 2,25 кг/т. В пересчете на 100 т металла окисляется 225 кг углерода в атмосфере печи по реакции



В результате этой реакции образуется CO в количестве $225 \cdot 28/12 = 525$ кг, 25 % которого дожигается до CO₂, т.е. образуется $525 \cdot 0,25 = 131,25$ кг (66,82 м³) CO₂ и $525 - 131,5 = 393,75$ кг CO (315 м³).

Так как в АКOC идет продувка аргоном с расходом 0,27 м³/т (0,48 кг/т) стали, то в состав пылегазовых выбросов входят следующие компоненты: SiO₂ – 0,0035 кг на 1 т стали; CO₂ – 0,131 кг/т; CO – 0,394 кг/т; Ar – 0,48 кг/т, или, в расчете на 100 т выплавляемой стали, SiO₂ – 0,35 кг; CO₂ – 0,131 кг; CO – 0,394 кг; Ar – 0,27 м³ (0,48 кг).

2.3 Материальный баланс плавки

Материальный баланс приведен в таблице 2.27.

Таблица 2.27 – Материальный баланс плавки

Внесено, кг		Получено, кг	
Углеродистый лом	86 382,50	Металл	100 236,20
Чугун	17 692,80	Шлак	7491,44
Агломерат	1561,10	Газ, пыль	20 990,60
Известь	2081,50	В том числе	
Футеровка	30,00	CO	2523,40
Электроды	525,00	CO ₂	2399,40
Кислород	3830,60	O ₂	3638,30
Воздух	1 1802,65	N ₂	10 796,50
Углерод	600,00	Аргон	48
Азот	1750,00	Пыль	1584,90
Аргон	48,00		
ФМн90	912,94		
ФС75	1069,52		
Итого	128 286,63	Итого	128 718,20
Невязка	$\frac{128\,286,63 - 128\,718,2}{128\,286,63} \cdot 100\% = -0,34\%$		

Таким образом, получено, что удельные выбросы пыли из печи составляют $1584,9/100,24 = 15,81$ кг на 1 т стали, CO – 25,2 кг/т, CO₂ – 23,9 кг/т. Содержание CO в газовых выбросах составляет $2523,4 / (2523,4 + 2399,4 + 3638,3 + 10796,5) \cdot 100\% = 13,04\%$. Поскольку в газовых выбросах допускается содержание не более 1 % CO, то излишек его необходимо окислить до CO₂ в камере дожигания.

Для снижения выбросов пыли в атмосферу их улавливают в рукавных или электрических фильтрах и утилизируют. Запыленность выбрасываемых в атмосферу газов не должна превышать 100 мг/м^3 , минимально достигнутые показатели – 2 мг/м^3 .

Список использованных источников

- 1 <http://www.worldsteel.org>
- 2 Адоньев С.М., Филиппов О.В. Пылегазовые выбросы предприятий чёрной металлургии. М.: Металлургия, 1973. 200 с.
- 3 Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 400 с.