

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям по дисциплинам:  
«Производство стали в конверторах», «АСУ металлургическими процессами»  
(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»  
магистерской программы «Металлургия стали»)

Донецк, 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям по дисциплинам:  
«Производство стали в конверторах», «АСУ металлургическими процессами»  
(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»  
магистерской программы «Металлургия стали»)

Рассмотрено на заседании  
кафедры «Металлургия стали и сплавов»  
Протокол № 7 от 14.03.2019 г.

Донецк, 2019

УДК 669.18.(07)

Методические указания к практическим занятиям по дисциплинам: «Производство стали в конверторах», «АСУ металлургическими процессами» (для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия» магистерской программы «Металлургия стали») / Составители: Е.Н. Лебедев, С.Н. Ратиев. – Донецк: ДОННТУ, 2019. – 17 с.

Предоставлены указания и рекомендации к использованию компьютерной модели плавки в кислородном конвертере для расчётов технологии производства стали. На достаточном для пользования моделью уровне рассмотрены теоретические вопросы выплавки стали в конвертере. Приведен пример решения уравнений материального баланса плавки симплекс-методом, позволяющий находить оптимальное по цене количество шихтовых материалов.

Составители                    Е.Н. Лебедев, доцент, к.т.н.  
    С.Н. Ратиев, старший преподаватель.

Рецензент                        В. Л. Жук, доцент, к.т.н.

## Содержание

1. Введение и отказ от ответственности.....	3
2. Базовые научные взаимосвязи.....	3
2.1 Расчет добавок.....	3
2.1.1 Добавка химических элементов.....	4
2.1.2 Поглощение других химических элементов.....	4
2.1.3 Время на смешивание.....	4
2.2 Основные реакции.....	5
2.2.1 Коэффициент распределения фосфора.....	5
2.2.2 Кинетическая модель дефосфоризации во время перемешивания после продувки.....	6
2.2.3 Коэффициент распределения серы.....	6
2.2.4 Коэффициент распределения марганца.....	7
3. Материально-тепловой баланс.....	7
3.1 Введение.....	7
3.2 Материальный баланс.....	8
3.3 Тепловой баланс.....	8
3.3.1 Термодинамические функции и узлы.....	8
3.3.2 Принципы установления теплового баланса.....	9
3.3.3 Принципы применения: алюминотермия.....	11
4. Расчет загрузки.....	11
4.1 Выбор уравнений баланса.....	11
4.2 Решение балансовых уравнений методом симплекса.....	13
4.3 Запись балансовых уравнений.....	13
4.3.1 Баланс Fe.....	13
4.3.2 Баланс O.....	13
4.3.3 Баланс газа.....	13
4.3.4 Баланс элементов шлака, кроме железа.....	13
4.3.5 Уравнение основности.....	14
4.3.6 Энергетический баланс.....	14
4.4 Подстановка чисел.....	15
5. Список использованной литературы.....	16

# 1 ВВЕДЕНИЕ

Этот документ был подготовлен в качестве руководства пользователя к модели изготовления стали кислородно-конвертерным способом, он находится на сайте <http://www.steeluniversity.org/>. Эта интерактивная модель была разработана в качестве образовательного и обучающего средства предназначенного как для студентов, изучающих черную металлургию, так и для лиц, работающих в металлургической промышленности.

Информация, содержащаяся как в настоящем документе, так и на указанном веб-сайте, предоставляется добросовестно, однако не предоставляется никаких гарантий, заверений, утверждений или обязательств в отношении такой информации или в отношении любой информации на любом другом веб-сайте, связанном с настоящим веб-сайтом посредством гипертекста или других ссылок (включая любые гарантии, заверения, утверждения или обязательства, согласно которым любая информация или использование любой подобной информации на настоящем веб-сайте или любом другом веб-сайте соответствует любому местному или национальному законодательству или требованиям любого контролирующего органа или органа, предусмотренного законодательством), и гарантии, заверения, утверждения или обязательства любого рода, вытекающие из законодательных актов, обычаев либо по иным основаниям, настоящим однозначно исключаются. Пользователь использует любую информацию, содержащуюся в настоящем документе, полностью на свой риск. Ни при каких обстоятельствах World Steel Association (Мировая ассоциация производителей стали) или ее партнеры не будут нести ответственность за любые затраты, ущерб, расходы или убытки (прямые или косвенные, фактические, экономические или финансовые, включающие любую потерю прибыли), которые могут быть понесены в результате использования информации, содержащейся в настоящем документе.

Ничто, содержащееся в настоящем документе, не должно рассматриваться в качестве рекомендации технического или финансового характера в отношении любого действия или бездействия.

## 2 БАЗОВЫЕ НАУЧНЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ

В данном разделе представлены ключевые базовые научные взаимосвязи, необходимые для успешного моделирования. Представленная информация не является исчерпывающей в отношении теории и практики производства стали, указанное выше пользователь может найти в других публикациях.

### 2.1 Расчет добавок

---

В силу разных причин в печь добавляют металлолом, шлак и железную руду, это позволяет:

- регулировать температуру жидкого материала
- регулировать состав жидкого материала
- изменять состав шлака и, как следствие, его свойства.

#### 2.1.1 Добавка химических элементов

В самом простом случае добавляется чистый химический элемент, количество добавки  $m_{\text{добавка}}$  рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{добавка}} = \frac{\Delta\%X \times m_{\text{сталь}}}{100\%}$$

Где:

$\Delta\%X$  = необходимое увеличение элемента wt% $X$  (т.е.  $\%X_{\text{целевой}} - \%X_{\text{текущий}}$ )

$m_{\text{сталь}}$  = масса стали

Пример: Допустим, 250 000 кг стали сейчас содержит 0,01%Ni. Сколько Ni нужно добавить, чтобы получить его содержание, равное 1.0%?

$$m_{\text{добавк}} = \frac{(1.0 - 0.01)\% \times 250,000 \text{ кг}}{100\%} = 2,475 \text{ кг}$$

## 2.1.2 Поглощение других химических элементов

При добавке металлолома необходимо также учитывать воздействие содержащихся в нем элементов помимо железа на общий состав стали, а при необходимости и проводить его расчет. Новый состав по какому-либо конкретному элементу рассчитывается по уравнению 9-3:

$$\%X_{\text{сталь, после}} = \frac{m_{\text{лом}} \times \%X_{\text{лом}} \times \text{коэф. усвоения} + X + m_{\text{сталь}} \times \%X_{\text{сталь}}}{100 \times (m_{\text{лом}} + m_{\text{сталь}})}$$

где

$\%X_i$  = содержание элемента, массовая доля, %

$m_{\text{slag}}$  = масса шлака в кг

$m_{\text{steel}}$  = масса стали в кг

Пример: Рассчитайте новое содержание углерода при добавлении 10 000 кг скрапа в 250 000 кг жидкого чугуна. Жидкий чугун содержит 4,5% C (Таблица 2), скрап содержит 0,05% C (Таблица 2), коэффициент усвоения углерода равен 95% (Таблица 3).

$$\%C_{\text{сталь, после}} = \frac{10,000 \text{ кг} \times 0.05\% \times 95\% + 250,000 \text{ кг} \times 4.5\%}{100\% \times (10,000 \text{ кг} + 250,000 \text{ кг})} = 4.33\%C$$

Очевидно, добавление большого количества лома существенно сокращает содержание углерода. Однако не представляется возможным довести содержание углерода в жидком чугуне до нужного показателя только за счет добавления металлолома. Если добавить необходимое для этого количество лома в печь, то металл в ней заустеет.

## 2.1.3 Время на смешивание

Необходимо отметить, что добавки оказывают влияние на состав стали не сразу, им необходимо определенное время, чтобы раствориться. Во время моделирования обязательно предусмотрите достаточное время для расплавки растворения добавок на основании следующих трендов:

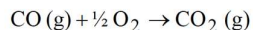
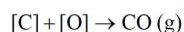
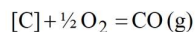
- Металлолом растворяется быстрее, чем шлак или железная руда.
- Продувка кислородом ускоряет процесс растворения, поскольку в результате реакции окисления выделяется тепло.

Добавки, введенные при более интенсивном перемешивании и при более высокой температуре, растворяются быстрее, чем добавки, введенные при более низкой температуре и/или при менее интенсивном перемешивании.

## 2.2 Основные реакции

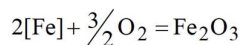
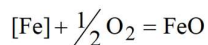
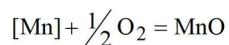
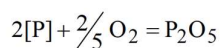
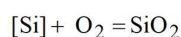
---

Жидкий чугун подвергается быстрому окислению при контакте с впрыскиваемым кислородом и другими элементами, в условиях, далеких от термодинамического равновесия. Ниже описаны три наиболее важные реакции:



Реакция дожигания CO до CO<sub>2</sub> (Уравнение 9-6) проходит только частично, т.е. только часть CO окисляется до CO<sub>2</sub>. Данные газообразные продукты реакции (CO и CO<sub>2</sub>) отводятся через вытяжные зонты. Соотношение CO<sub>2</sub> / (CO+CO<sub>2</sub>) называется Коэффициентом дожигания (PCR).

Другие важные реакции, которые необходимо учитывать при моделировании, представлены ниже:



Данные оксиды соединяются с оксидами, загруженными ранее, т.е. известью и доломитом, в результате чего образуется жидкий шлак, который поднимается на поверхность ванны с расплавом. Состав шлака имеет огромное значение, поскольку от него зависит множество различных свойств расплава:

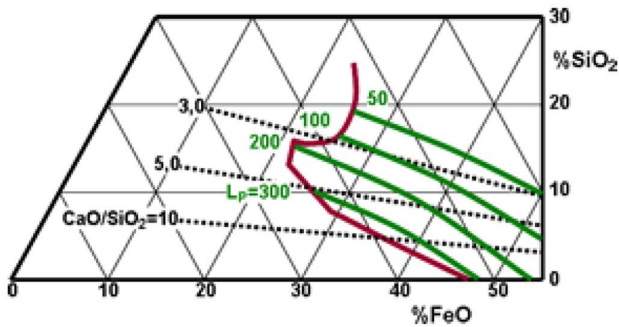
- Коэффициент распределения серы, L<sub>s</sub>
- Коэффициент распределения фосфора, L<sub>p</sub>
- Коэффициент распределения марганца, LMn
- Температура ликвидуса шлака.

Все указанные коэффициенты отражают распределение элемента между шлаком и сталью, т.е. L<sub>p</sub> = 1 означает, что уровень фосфора в стали, [%P], равен его уровню в шлаке (%P).

### 2.2.1 Коэффициент распределения фосфора

Дефосфоризация, проходящая на последнем этапе кислородно-конвертерного процесса, очень важна, поскольку именно здесь для нее создаются наиболее благоприятные условия в цепочке изготовления жидкой стали и последующих переделов. Поэтому крайне важно поддерживать состав шлака, который улучшает удаление фосфора.

На рис. 9-1 показано, как коэффициент распределения фосфора отличается в шлаке с разным составом. Поддерживать высокий коэффициент довольно сложно, поскольку он характерен для довольно узкой линейки составов шлака. Более того, повышение температуры на 50 °C приводит к снижению данного коэффициента на 1,6 при базовом коэффициенте (CaO/SiO<sub>2</sub>) равном 3.



$$L_P = \frac{(\%P)_{\text{шлак}}}{(\%P)_{\text{сталь}}} \text{ при равновесии}$$

Рисунок 1:  $L_P$  в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-2%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-1.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3%MnO-5%MgO при температуре 1650 °C

### 2.2.2 Кинетическая модель дефосфоризации во время перемешивания после продувки

Скорость, с которой происходит дефосфоризация во время перемешивания после продувки с, например, азотом или аргоном, регулируется следующим уравнением

$$\frac{d\%P}{dt} = k_c \times \frac{A}{V} \times [\%P - \%P_{\text{eq}}] = -\beta \times \sqrt{\frac{D_P \times Q}{A}} \times \frac{A}{V} \times [\%P - \%P_{\text{eq}}]$$

где

$k_c$  = коэффициент массопередачи P в стальном расплаве

$A$  = площадь поперечного сечения поверхности раздела шлак-металл (м<sup>2</sup>)

$V$  = объем стали (м<sup>3</sup>)

$\%P$  = содержание фосфора в стали в точке времени  $t$

$\%P_{\text{eq}}$  = равновесие в содержании фосфора в точке времени  $t$

$\beta$  эмпирический коэффициент ( $\sim 500 \text{ м}^{-1/2}$ )

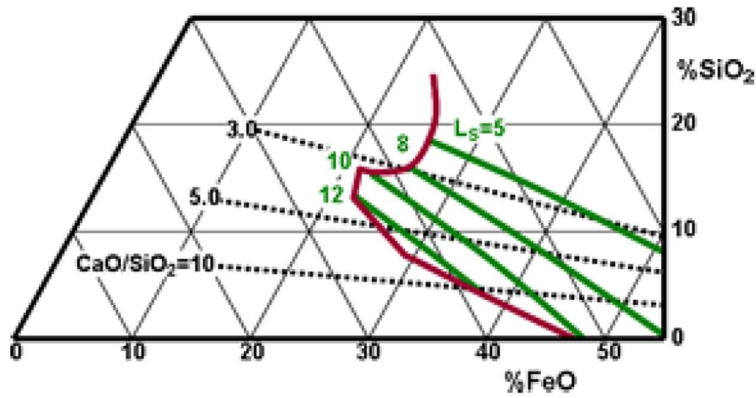
$D_p$  = коэффициент диффузии фосфора в жидкой стали (м<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>)

$Q$  = объемный удельный расход газа по поверхности раздела (м<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>)

### 2.2.3 Коэффициент распределения серы

Хотя десульфуризация не является приоритетом в ходе кислородно-конвертерного процесса, небольшое удаление серы все же происходит за счет реакции на поверхности раздела шлака и металла. На рис. 9-2 показано, как коэффициент распределения серы отличается в шлаке с разным составом. Необходимо отметить, что домен жидкой стали,  $L_s$  почти не зависит от температуры.





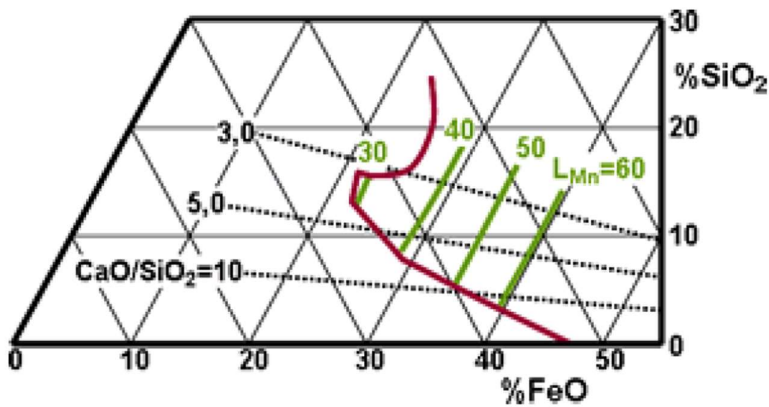
$$L_S = \frac{(\%S)_{\text{шлак}}}{[\%S]_{\text{сталь}}} \text{ при равновесии}$$

Рисунок 2:  $L_S$  в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-2%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-1.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3%MnO-5%MgO при температуре 1650 °C

### 2.2.4 Коэффициент распределения марганца

Большее количество марганца, содержащегося в жидком чугуна, окисляется в начале продувки кислородом. Оставшийся марганец может быть поглощен шлаком или может вернуться в сталь в результате реакций окисления/восстановления за счет реакции на поверхности раздела шлака и металла.

Коэффициент распределения марганца имеет некоторую зависимость от температуры. Повышение температуры на 50°C ведет к понижению  $L_{Mn} \sim 1.25$ .



$$L_{Mn} = \frac{(\%Mn)_{\text{шлак}}}{[\%Mn]_{\text{сталь}}} \text{ при равновесии}$$

Рисунок 3:  $L_M$  в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-2%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-1.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3%MnO-5%MgO при температуре 1650 °C

## 3 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

### 3.1 Введение

Материально-тепловой баланс является основным инструментом для:

- Расчета загрузки
- Корректировки состава определенных компонентов (шлака и т.д.)
- Корректировки температуры стали
- Диагностики по оценке материалов и тепловых потерь

## 3.2 Материальный баланс

В реакторах периодического действия, в которые опорожняются сосуды между плавками, за счет определения материального баланса происходит сравнение массы материала на входе и на выходе. Если между данными двумя значениями есть разница, то она обусловлена либо неопределенностью данных параметров, либо слабой способностью определить дополнительно попавшие в сталь элементы (износ футеровки, унос шлака и т.д.), либо произошло испарение газов, выделение пыли и т.п.

$$\sum \boxed{\text{вход}} = \sum \boxed{\text{выход}} + \boxed{\text{потери}}$$

Можно рассматривать следующие параметры:

- Общий баланс
- Баланс отдельно взятых компонентов (газ, шлак и т.д.)
- Баланс элементов (Fe, O<sub>2</sub>, CaO, и т.д.)

Например, баланс для элемента X записан следующим образом:

$$\frac{1}{100} \sum_i Q_{E_i} \cdot \%X_{E_i} = \frac{1}{100} \sum_j Q_{S_j} \cdot \%X_{S_j} + \boxed{\text{потери}}$$

В зависимости от ситуации, уравнение можно использовать для:

- Оценки условия потерь
- Оценки количества  $Q_{E_i}$  или  $Q_{S_j}$  дополнительно появившейся массы или потерь
- Оценки состава  $\%X_{E_i}$  или  $\%X_{S_j}$  дополнительно появившейся массы или потерь

Для того чтобы получить правильный энергетический баланс, необходимо составить точный материальный баланс.

## 3.3 Тепловой баланс

### 3.3.1 Термодинамические функции и узлы

Термодинамическая функция, измеряющая теплообмен, - это энтальпия H. В отношении данного материала такое изменение энтальпии как функция температуры при отсутствии фазы трансформации выражается из теплоемкости C<sub>p</sub>:

$$H_{T_2} - H_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT$$

Единицей измерения энтальпии в системе SI является джоуль (Дж). Применяются также другие единицы измерения:

- Калории (кал) 1 кал = 4,184 Дж
- Термии (трм) 1 трм = 10% кал
- Киловатт-час (кВт/ч): 1 кВт/ч = 3,6 МДж = 0,86 трм

В таблицах ниже приведена основная информация по применению в сфере изготовления стали и металла, выраженного в качестве изменения энтальпии различных материалов при температурных и фазовых превращениях, химических реакциях.

### 3.3.2 Принципы установления теплового баланса

Практический метод выражения теплового баланса состоит из суммы собранных отдельных превращений для каждого релевантного химического элемента. Для данного расчета применяется второй принцип первого закона термодинамики: «Количество теплоты реакции зависит только от начального и конечного состояния системы, а не от промежуточных состояний, через которые она проходит». Поэтому достаточно выразить энтальпию химического превращения при произвольной температуре (например, 1600 °С для расчета полной загрузки или первоначальную температуру стали для простой регулировки температуры), а также выразить отклонения энтальпии реагентов (по сравнению с продуктами реакции) между их изначальным (в сравнении с финальным) состоянием и указанной температурой. Например, может применяться процесс, схематично изображенный ниже:

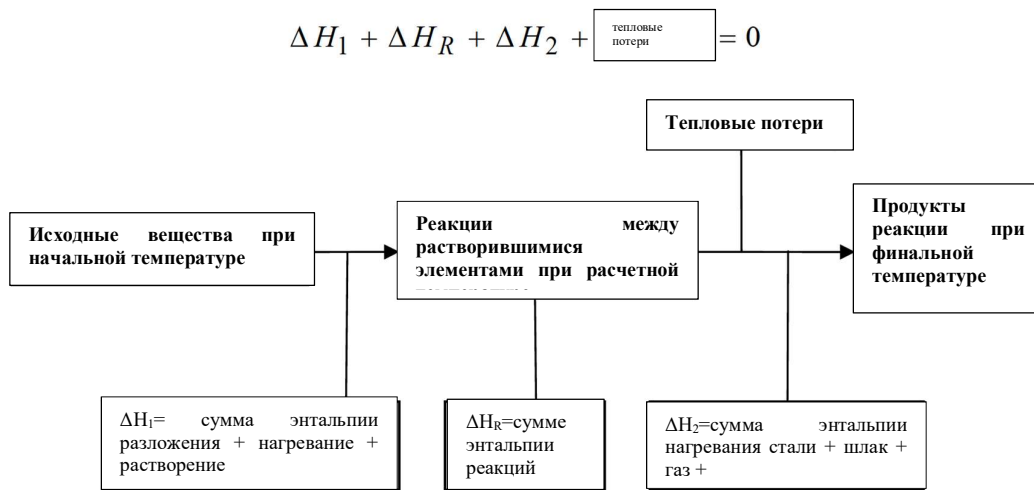


Рисунок 4: Расчетная схема для теплового баланса.

Данные в Таблице 9,1 - 9,4 используются для расчета условий  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  и  $\Delta H_R$ . Значения  $\Delta H_R$  приведены для реагентов и продуктов реакции при температуре 1600 °С. В первом приближении, они не зависят от температуры, которая выше температуры домена на несколько сотен градусов. Необходимо отметить, что данные условия являются положительными для эндотермических реакций и отрицательными для экзотермических реакций. В зависимости от применения данный тепловой баланс совместно с балансами релевантных материалов, могут использоваться для:

- Диагностики загрузки (например, оценки теплопотерь)
- Расчета загрузки (расчета количества материалов к загрузке для получения жидкой стали необходимой температуры)
- Расчета корректировки температуры (изменение температуры стали для добавок и реакций с экзотермическими и эндотермическими материалами). Необходимо отметить, что условие  $\Delta H_2$  выведенное из уравнения (4) представляет отклонение энтальпии материалов на выходе (жидкой стали, шлака и, может быть, газа, выделившегося во время процесса) для температурной разницы  $\Delta H_2$ . Тогда изменение температуры вычисляется с применением значений  $C_p$  из Таблицы 9.1:

$$\Delta T_{\text{сталь}} = \frac{\Delta H_2}{0.82 Q_{\text{Сталь}} + 2.04 Q_{\text{шлак}}}$$

где

$\Delta H_2$  = сумма энтальпии в МДж

$Q_{\text{сталь}}$  = масса стали в т

$Q_{\text{шлак}}$  = масса шлака в т

**Таблица 1: Энтальпия материалов в качестве функции температуры**

	$H(1400\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg <sup>-1</sup>		$C_p$ at 1400 °C / kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	
Чугун (жидкий при 1400°C)	1.30 to 1.37		0.87	
	$H(1600\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg <sup>-1</sup>		$C_p$ at 1600 °C / kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	
Низколегированная сталь (жид. 1600 °C)	1.35		0.82	
Рафинир. шлак (жид. 1600°C)	2.14		2.04	
Жел. руда Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → Fe <sub>ж</sub> +O	4.43			
CaO	1.50		1.03	
	$H(1600\text{ °C}) - H(25\text{ °C})$ / MJ kg <sup>-1</sup> / MJ m <sup>-3</sup>		$C_p$ at 1600 °C / kJ K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> / kJ K <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	
Ar	0.82	1.46	0.53	0.93
CO	1.86	2.33	1.28	1.61
CO <sub>2</sub>	1.90	3.78	1.36	2.71
N <sub>2</sub>	1.84	2.30	1.28	0.95
O <sub>2</sub>	1.70	2.43	1.17	1.68

**Таблица 2: Энтальпия окислительных реакций разных элементов.**

Элемент X в оксидах X <sub>n</sub> O <sub>m</sub>	Нагрев от 25 до 1600 °C + растворение / МДж кг <sup>-1</sup>	C <sub>p</sub> элемент X при 1600 °C / кДж К <sup>-1</sup> кг <sup>-1</sup>	Окисление X при 1600 °C растворенным Q / МДж кг <sup>-1</sup>	Окисление X при 1600 °C O <sub>2</sub> (газ) при 25 °C / МДж кг <sup>-1</sup>	К-во O <sub>2</sub> / кг    /м <sup>3</sup>	
C в CO	4.56* to 6.0**	2.025	-1.93* to -3.37**	-9.4* to -10.84**	1.33	0.93
C в CO <sub>2</sub>	4.56* to 6.0**	2.025	-15.35* to -16.79**	-30.35* to -31.79**	2.67	1.87
Al в Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 0.17	1.175	- 22.32	- 27.32	0.89	0.62
Cr в Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	0.95	- 7.76	- 10.36	0.46	0.32
Fe в FeO жид.	1.35	0.82	- 2.49	- 4.10	0.29	0.20
Fe в Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.35	0.82	- 4.06	- 6.48	0.43	0.30
Mn в MnO	1.53	0.835	- 5.34	- 6.97	0.29	0.20
P в P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> **	- 0.14	0.61	- 23.8	- 31.05	1.29	0.90
Si в SiO <sub>2</sub> **	- 1.43	0.91	- 24.4	- 29.35	1.14	0.80
(*) в жидкой стали						
(**) в жидком чугуне						
(***) на формирование 3 CaO-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> и CaO-SiO <sub>2</sub> с необходимым CaO при 1600 °C						

**Таблица 3: Реакции растворения кислорода в жидкой стали при 1600 °C (МДж/кг O<sub>2</sub>).**

Из O <sub>2</sub> (газ) при 25°C - 5,62	Из FeO <sub>x</sub> в шлаке при 1600 °C 8,7	Из очень стабильных оксидов при 1600 °C 18
--	--	---

**Таблица 4: Энтальпия распада ферросплавов при 25°C (МДж/кг сплава).**

Высокоуглерод. феррохром	Рафинированный феррохром	Высокоуглерод. ферромарганец	Рафинированный ферромарганец	Ферросилиций	Ферросилиций	Ферромарганец
(64%Cr 5%С) 0.11	(73%Cr 0.5%С) - 0.025	(78%Mn 7%С) 0.10	(80%Mn 1.5%С) 0.075	(75%Si) 0.37	(50%Si) 0.70	(35%Si) 0.71

### 3.3.3 Примеры применения: алюминотермия

Рассчитаем изменение температуры стали в качестве примера тепло-материального баланса. Изначально температура стали 1620 °С. Как она изменится после добавления 1 кг Al (+O<sub>2</sub> газ) на тонну стали?

Применив расчет теплового баланса при помощи уравнения 10-4, получим необходимые параметры.

Расчет материального баланса показывает, что необходимо 0,89 кг O<sub>2</sub> на 1 кг Al, и что выделится 1,89 кг Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (см. Таблицу 10-2).

- 1) Расчет по  $\Delta H_1$ : - 5,13 МДж, включая:
  - a) Расплавку и растворение 1 кг Al:
    - i) - 0,17 МДж (при 1600°C + растворение, см. Таблицу 10-2)
    - ii)  $+1,175 \cdot 10^{-3} \times 20$  (нагрев от 1600 до 1620 °C)
  - b) Расплавка и растворение 0,89 кг O<sub>2</sub>:
  - c) - 5,62 МДж (при 1600°C + растворение, см. Таблицу 10-3)
  - d)  $+1,17 \cdot 10^{-3} \times 20 \times 0.89$  (нагрев от 1600 до 1620 °C)
- 2) Расчет по  $\Delta H_R$ : -22,32 МДж (см. Таблицу 10-2)
- 3) Таким образом,  $\Delta H_2 = -(\Delta H_1 + \Delta H_R) = 27.45 \text{ MJ}$

Соответствующее изменение температуры на 1 тонну стали, с учетом стандартного веса шлака 20 кг/т (включая выделившийся Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и без учета тепловых потерь:

$$\Delta T_{\text{сталь}} = \frac{27.45}{0.82 + 2.04 \times 0.020} = 31.9^\circ\text{C}$$

Если реакция происходит за счет растворенного кислорода, а не газообразного, то необходимо вычесть из  $\Delta H_1$  энтальпию растворенного кислорода, т.е. (-5,62 x 0,89 МДж/кг Al). Тогда изменение температуры составит:

$$\Delta T_{\text{сталь}} = \frac{27.45 - 5.62 \times 0.89}{0.82 + 2.04 \times 0.020} = 26.1^\circ\text{C}$$

Если в реакции участвует кислород, восстановленный из оксидов железа в шлаке, то необходимо прибавить к последнему значению  $\Delta H_1$  энтальпию распада FeO<sub>x</sub>, т.е. (8,7 x 0,89 МДж/кг Al). В данном случае изменение температуры будет:

$$\Delta T_{\text{сталь}} = \frac{27.45 - 5.62 \times 0.89 - 8.7 \times 0.89}{0.82 + 2.04 \times 0.020} = 17.1^\circ\text{C}$$

## 4 РАСЧЕТ ЗАГРУЗКИ

### 4.1 Выбор уравнений баланса

Продукты реакции между жидким чугуном и кислородом либо выпадают в шлак (Fe, Si, Mn, P, Cr и т.д.), либо выделяются в виде газа (C в виде CO и CO<sub>2</sub>). Распределение элементов между жидким металлом, шлаком и газом

зависит от количества вдуваемого кислорода и условий контакта жидкого чугуна с кислородом. Условия продувания влияют на:

- Состав газа; коэффициент дожигания  $PCR = CO_2 / (CO + CO_2)$ , где CO и CO<sub>2</sub> - объемные доли.
- Степень окисления железа в шлаке  $Fe_{3+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$ . При продувке сверху данный коэффициент составляет приблизительно 0,3, что соответствует массовому соотношению  $O_{связ} к Fe / Fe_{окисл} = 0.33$ .

Более того, необходимо наложить ограничение на количество окисленного железа, как правило, это достигается за счет фиксации значения содержания железа в шлаке. Для нержавеющей стали учитывается окисление хрома, оно, как правило, фиксируется через выход кислорода при обезуглероживании.

В данной упрощенной системе ясно, что для стали заданного состава и при фиксации трех указанных параметров (состав газа, степень окисления и количество окисленного железа), для оценки количества кислорода, жидкой стали, шлака и газа, соответствующего обработки заданного количество жидкого чугуна (или для производства заданного количества стали) необходимы 4 уравнения. Данные уравнения показывают баланс Fe, O, газа и элементов шлака, кроме Fe (Si, Mn и P). Данные уравнения независимы.

Ввод любой дополнительной константы потребует ввода дополнительной переменной (или отказа от одной из текущих констант). Ниже приведен пример для стандартных производственных условий:

- Температура стали является постоянной. Данное условие требует загрузки эндотермических (скрап, руда и т.д.) или экзотермических (ферросилиций, уголь и т.д.) агентов.
- Для получения необходимых свойств шлака добавляют негашеную известь. Данное условие может быть выражено в виде дополнительных ограничений относительно состава шлака (содержание CaO или основность  $CaO/SiO_2$  или  $(CaO+MgO)/(SiO_2+P_2O_5)$ ), или за счет применения уравнения для расчета негашеной извести.

Для защиты футеровки фиксируется содержание MgO. Необходим независимый источник MgO, например, доломитовая известь.

**Таблица 5: Материалы на входе и на выходе из кислородно-конвертерного процесса**

<b>Исходные материалы</b>	Жидкий чугун	Вес фиксированный (или неизвестный) ( $P_{Fe}$ ), состав и температура фиксированы
	Лом или руда	Вес неизвестен ( $P_{Fe}$ или $P_M$ ), состав и температура фиксированы
	Негашеная известь	Вес неизвестен ( $P_{Chx}$ ) состав и температура фиксированы
<b>Продукты реакции</b>	Кислород	Вес неизвестен ( $P_O$ ) состав и температура фиксированы
	Жидкая сталь	Вес фиксированный (или неизвестный) ( $P_A$ ), состав и температура фиксированы
	Шлак	Вес неизвестен ( $P_L$ ), температура фиксирована Оксид железа и степень окисления – фиксированные ( $\rightarrow \%Fe_L, (\%O_{Fe})_L$ )
		Полный состав вычисляется из балансов элементов (Si, P и т.д.)
	Газ	Вес неизвестен ( $P_G$ ) Средняя температура и коэффициент дожигания (PCR) фиксированы

Таким образом, стандартная загрузка с минимальным количеством необходимых материалов имеет 6 неизвестных и требует шести балансовых уравнений:

- Баланс Fe
- Баланс O
- Баланс газа
- Баланс элементов шлака, кроме железа
- Баланс основности
- Энергетический баланс

## 4.2 Решение балансовых уравнений методом симплекса

---

В целом, в загрузке содержится больше элементов, чем необходимо (разные параметры металлолома, ферросплавы и т.д.). Для того, чтобы рассчитать оптимальную загрузку (минимальные затраты на сталь заданной марки) на практике, применяется метод симплекса, который заключается в минимизации целевой функции стоимости загрузки  $z = f(c, P)$ , данное уравнение является линейным с точки зрения веса различных материалов:

$$z = \sum_j c_j \cdot P_j$$

где

$P_j$  = вес различных учитываемых материалов (жидкий чугун, лом и т.д., шлак, газ)

$c_j$  = стоимость, включая затраты связанные с применением материалов, а также затраты на утилизацию (шлака) или валоризацию (газа).

Переменные  $P_j$  подвержены балансовым ограничениям, а также другим возможным ограничениям в связи с доступностью материалов, аналитическими лимитами и т.д.

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot P_j \{ \leq, =, \geq \} b_i \quad i = 1, \dots, m$$

Среди ограничений на доступность материалов, можно принять максимальный и минимальный вес определенных материалов (например, минимальное количество руды для окончательной корректировки температуры), или групп материалов (например, максимальный вес в коробе для лома), задать вес определенных материалов (например, твердое железо, внутренний лом).

Среди аналитических допущений можно принять максимальное значение содержания Si в стали (или других примесей), содержание MgO в шлаке для защиты футеровки.

Применение метода симплекса позволяет произвольно принимать вес определенных материалов, что дает преимущество использования одного и того же расчетного модуля как для расчета загрузки (вес жидкой стали зафиксирован, а вес жидкого чугуна - неизвестен), и для диагностики плавки (загружаемые материалы известны, теоретический вес стали вычислен, как и фактические материалы и тепловые потери).

## 4.3 11.3 Запись балансовых уравнений

---

Далее приведены уравнения для стандартной загрузки с минимальным количеством материалов. Переход к большему количеству - прямой.

#### 4.3.1 Баланс Fe

$$[\%Fe_{Fte} \cdot P_{Fte} + \%Fe_{Fer} \cdot P_{Fer} + \%Fe_M \cdot P_M] = [\%Fe_A \cdot P_A + \%Fe_L \cdot P_L]$$

#### 4.3.2 Баланс O

Количество кислорода для окисления различных элементов C, Mn, P, Si вычисляются на базе количества оксидов данных элементов  $Q_C$ ,  $Q_{Mn}$ ,  $Q_P$  и  $Q_{Si}$ .

$$Q_C = 0.01 \cdot [\%C_{Fte} \cdot P_{Fte} + \%C_{Fer} \cdot P_{Fer} - \%C_A \cdot P_A]$$

(и подобно для Mn, P и Si)

Принимая во внимание количество кислорода, необходимое для окисления железа из шлака, а также количество расстроенного в стали кислорода, баланс кислорода будет следующим:

$$P_O + 0.01 \cdot \%O_M \cdot P_M = \left[ \frac{16}{12} \cdot (1 - PCR) + \frac{32}{12} \cdot PCR \right] \cdot Q_C + \frac{16}{55} \cdot Q_{Mn} + \frac{80}{62} \cdot Q_P + \frac{32}{28} \cdot Q_{Si} + 0.01 \cdot (\%O_{Fe})_M \cdot P_L + 0.01 \cdot \%O_A \cdot P_A$$

#### 4.3.3 Баланс газа

$$P_G = \left[ \frac{28}{12} \cdot (1 - TCS) + \frac{44}{12} \cdot (TCS) \right] \cdot Q_C$$

При использовании газа для перемешивания (Ar, N<sub>2</sub> и т.д.), необходимо добавить P<sub>Ar</sub>, P<sub>N2</sub> и т.д.

#### 4.3.4 Баланс элементов шлака, кроме железа

$$\frac{71}{55} \cdot Q_{Mn} + \frac{142}{62} \cdot Q_P + \frac{60}{28} \cdot Q_{Si} + 0.01 \cdot \%CaO_{Chx} \cdot P_{Chx} = 0.01 \cdot [100 - \%Fe_L - (\%O_{Fe})_L] \cdot P_L$$

#### 4.3.5 Уравнение основности

Если, например, применяется коэффициент основности  $v = \%CaO/\%SiO_2$ :

$$0.01 \cdot \%CaO_{Chx} \cdot P_{Chx} = v \cdot \frac{60}{28} \cdot Q_{Si}$$

#### 4.3.6 Энергетический баланс

Используется уравнение 10-4 раздела 10-3 Тепловой баланс, принимается температура 1600 °С, чтобы можно было использовать данные Таблицы 10-1 - 10-4. В таблицах вес указан в кг, энтальпия - в МДж или кДж:

##### Шаг 1

Материалы загрузки растворяются в жидком металле при температуре 1600 °С (кроме негашеной извести, которая только нагревается)

$$\Delta H_1 = 0.00087 (1600 - T_{Fte}) P_{Fte} + \quad (\text{Нагрев жидкого чугуна - Таблица 10-1-})$$



$$+1.35P_{Fe} + 4.43P_M + \quad (\text{Нагрев и плавка лома и руды - см. Таблицу 10-1-})$$

$$+1.5P_{Chx} + \quad (\text{Нагрев негашеной извести - Таблица 10-1-})$$

$$-5.62P_O \quad (\text{Нагрев и растворение кислорода - Таблица 10-3-})$$

Также используйте информацию из Таблицы 10-4 и первой колонки таблицы 10-2, если загружаются ферросплавы.

### Шаг 2

Энтальпия реакции между растворившимися элементами при температуре 1600 °С (Таблица 10-2).

$$\Delta H_2 = [-3.37 \cdot (1 - PCR) - 16.79 \cdot PCR] \cdot Q_C \\ - 5.34 \cdot Q_{Mn} - 23.8 \cdot Q_P - 24.4 \cdot Q_{Si} - 0.0296 \cdot \%Fe_L \cdot P_L$$

### Шаг 3

Сталь, шлак и газ доходят до максимальной температуры.

$$\Delta H_3 = 0.00082(T_A - 1600)P_A + \quad (\Delta T_{\text{сталь}} \text{ см. Таблицу -10-1})$$

$$+ 0.00204(T_L - 1600)P_L + \quad (\Delta T_{\text{шлак}} \text{ см. Таблицу 10.1})$$

$$+ \{ [0.00128(T_G - 1600)](1 - PCR) + [0.00136(T_G - 1600)]PCR \} Q_G \quad (\Delta T_{\text{газ}} \text{ для CO + CO}_2 \text{ - см. Таблицу 10.1})$$

Добавьте соответствующие условия, если применяются аргон или азот:

**Таблица 6: Начальные значения для материально-теплового баланса.**

<b>Состав жидкого чугуна</b>	4,5%Сб 0,5%Mn, 0.08%P, 0,4%Si ( 94,52% Fe) при 1350°C
<b>Состав лома</b>	100% Fe – без руды
<b>Негашеная известь</b>	100% CaO
<b>Состав жидкой стали</b>	0,05%С, 0,12%Mn, 0.01%P (99.73% Fe) при 1650°C
<b>Шлак</b>	%CaO/%SiO <sub>2</sub> =4, состав окисленного железа 18% при 1650°C
<b>Газ</b>	PCR=0,08, выделившийся при средней температуре 1500°C
<b>Тепловые потери</b>	65 МДж/т стали

## 4.4 Подстановка чисел

Первым шагом расчета загрузки на 1 тонну стали будет расчет количество окисленных С, Mn, P и Si:

$$Q_C = 0.045 P_{Fe} - 0.5$$

$$Q_{Mn} = 0.005 P_{Fe} - 1.2$$

$$Q_P = 0.0008 P_{Fe} - 0.1$$

$$Q_{Si} = 0.004 P_{Fe}$$

Затем производится расчет по всем 6-ти уравнениям материально-теплового баланса в соответствии с Таблицей 11-3.

**Таблица 7: Конечное равенство материально-теплового баланса**

Баланс Fe	$0.9452 \cdot P_{\text{Fte}} + P_{\text{Fer}} - 0.18 \cdot P_{\text{L}} = 997.30$
Баланс O	$0.0718 \cdot P_{\text{Fte}} + P_{\text{O}} + 0.0544 \cdot P_{\text{L}} = 1.098$
Баланс газа	$0.1098 \cdot P_{\text{Fte}} - P_{\text{G}} = 1.22$
Баланс элементов шлака, кроме Fe	$0.0169 \cdot P_{\text{Fte}} + P_{\text{Chx}} - 0.7606 \cdot P_{\text{L}} = 1.778$
Основность шлака	$0.0343 \cdot P_{\text{Fte}} - P_{\text{Chx}} = 0$
Баланс энергии	$-0.1287 \cdot P_{\text{Fte}} + 1.35 \cdot P_{\text{Fer}} + 1.5 \cdot P_{\text{Chx}} - 5.62 \cdot P_{\text{O}} - 0.3462 \cdot P_{\text{L}} = -117.2$

И наконец, вычисляем массу:

$$P_{\text{Fte}} = 885.3 \text{ кг}$$

$$P_{\text{Fer}} = 171.6 \text{ кг}$$

$$P_{\text{Chx}} = 30.4 \text{ кг}$$

$$P_{\text{O}} = 65.6 \text{ кг}$$

$$P_{\text{A}} = 1000 \text{ кг}$$

$$P_{\text{L}} = 57.2 \text{ кг}$$

$$P_{\text{G}} = 96.0 \text{ кг}$$

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Модель плавки в кислородном конвертере [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://steeluniversity.org/product/basic-oxygen-steelmaking-simulation/?lang=ru>, свободный. – Загл. с экрана.