

3. Исследование паровой активации древесного угля в реакторе с внешним нагревом / В.А. Лаптев, В.М. Скурихин, А.Д. Никитин, А.Ф. Рыжков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: м-лы междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 834-838.

4. Kaviany M. Principles of Heat Transfer in porous Media. – Springer-Verlag, 1991.

5. Werner Schmidt. Influence of Multidimensionality and Interfacial Friction on the Coolability of Fragmented Corium. PhD thesis, University of Stuttgart, May 2004.

6. Barree R.D., Conway M.W. Beyond Beta Factors: A Complete Model for Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer // Flow in Porous Media. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 26-29 September 2004, Houston, Texas, USA. 978-1-55563-151-2.

7. Nield D., Bejan A. Convection in Porous Media. – Springer, 2006.

8. E. Takasuo, V. Hovi, and M. Ilvonen. PORFLO modelling of the coolability of porous particle beds. Technical report, VTT, 2011.

УДК 669.18

К. П. Левачева, Г. В. Воронов, Е. Е. Кузнецова, И. В. Глухов

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ, РАБОТАЮЩЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОВОГО НОСИТЕЛЯ

Аннотация

*В работе рассмотрен тепловой режим современной дуговой сталеплавильной печи (ДСП–120). Представлен расчёт горения природного газа, химический состав горючих компонентов которого состоит из углеводородов парафинового ряда C_nH_{2n+2} . Расчет горения влажного природного газа показан для двух случаев: окислитель – атмосферный воздух, и окислитель – технологический кислород. Определен расход окислителя (кислорода и влажного воздуха), количество продуктов сгорания, химический состав и количество продуктов сгорания с учетом диссоциации диоксида углерода (CO_2) и водяного пара ($H_2O_{пар}$), балансовая температура с использованием *i-t* диаграммы и по программе электронно-вычислительной машины (ЭВМ) Microsoft Excel.*

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, теплота сгорания, продукты сгорания, температура, природный газ, окислитель, воздух, кислород, водяной пар, диоксид углерода, диссоциация.

Abstract

The thermal regime of a modern arc steel melting furnace (DSP–120) is considered in this work. Calculation of combustion of natural gas is presented, the chemical composition of its combustible components consists of hydrocarbons of the paraffin series C_nH_{2n+2} . Calculation of the combustion of wet natural gas is shown for two cases: oxidizer – atmospheric air, and oxidizing agent - process oxygen. The consumption of oxidizer (oxygen and moist air), the amount of combustion prod-

ucts, the chemical composition and the amount of combustion products taking into account the dissociation of carbon dioxide (CO_2) and water vapor (H_2O_{steam}), the balance temperature using it diagram and the program the Microsoft Excel.

Key words: arc steelmaking furnace, heat of combustion, combustion products, temperature, natural gas, oxidant, air, oxygen, water vapor, carbon dioxide, dissociation.

Современная дуговая сталеплавильная печь, рисунок 1, представляет собой металлургический агрегат для производства стали или стального полупродукта, в котором перерабатывают железосодержащую шихту нормированных марок стали с использованием электрической энергии; тепловой энергии топлива – природного газа и карбюратора – кокса [1]. Природный газ сжигают с использованием технологического кислорода с целью нагрева холодной шихты и поддержания температурного уровня в рабочем пространстве печи в технологические периоды (подвалка шихты, выпуск шлака и полупродукта и др.). Современную дуговую сталеплавильную печь следуют рассматривать как комбинированный агрегат в отношении теплогенерации. Температура полупродукта стали в рабочем пространстве печи может достигать 1700 градусов, в то время как температура в дуге порядка 3500–4000 °С. Емкость современной дуговой сталеплавильной печи увеличена до 400 тонн, продолжительность плавки составляет 55–60 минут.

Использование ДСП как плавильного агрегата позволило уменьшить общие расходы тепловой энергии благодаря более эффективному использованию энергии мощной электрической дуги при минимальной продолжительности плавки. Поэтому энергетический баланс плавки, наряду с технологическим аспектом, в значительной мере характеризует технический уровень современной ДСП – ее рациональную конструкцию, быстрдействие механизмов, автоматизацию технологических операций и надежность работы устройств [2, 3].

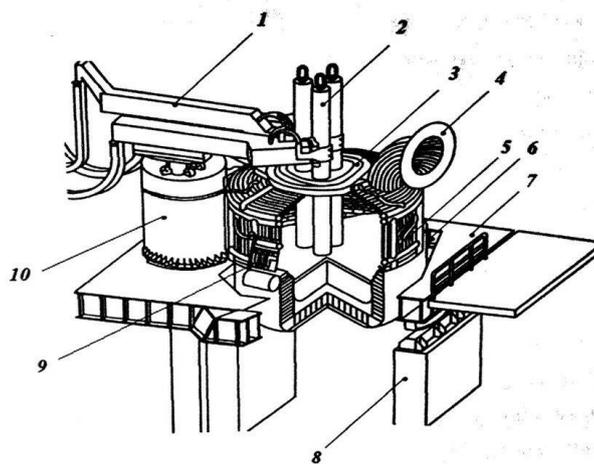


Рис. 1. Схема современной дуговой электропечи:

- 1 – электродержатели; 2 – графитированные электроды; 3 – свод печи;
- 4 – дымоотводящий канал; 5 – корпус из водоохлаждаемых панелей;
- 6 – сталевыпускное отверстие эркер; 7 – наклонная платформа; 8 – фундамент;
- 9 – технологическое окно; 10 – подъемно-поворотный механизм свода и электродов

Стало общепринятым применение следующих технических решений и технологических приемов производства стали в современной дуговой печи[2]: начало плавления лома с остатком порции металла предыдущей плавки – «болота»; применение топливокислородных горелок для нагрева лома в «холодных» зонах рабочего пространства печи; стремление работать с длинной дугой, которая максимально заглублена под уровень пенистого шлака; эркерный беспшлаковый выпуск стали; исключение операции заправки ванны после каждой плавки за счет применения водоохлаждаемых элементов стены, свода и новых типов высококачественных периклазоуглеродистых огнеупоров футеровки шихтового пояса ванны печи.

Газообразное топливо выгодно отличается от других видов топлива тем, что не содержит сернистые соединения, не требует особой подготовки перед сжиганием, хорошо смешивается с окислителем, надёжнее работают системы измерения физических параметров на газопроводах и автоматического управления теплотехническими процессами нагрева холодной шихты [1].

Химический состав природных газов, состоит из углеводородов парафинового ряда C_nH_{2n+2} , например:

Узел Невьянского ЛПУМГ ООО «Уралтрансгаз» CH_4 – 98,36 %; C_2H_6 – 0,10 %; C_3H_8 – 0,04 %; CO_2 – 0,03 %; N_2 – 0,81 %; O_2 – 0,01 %; H_2O – 0,65 %.

Состав влажного газа рассчитывают по формуле, учитывая, что водяной пар неидеальный газ:

$$\chi_{вл} = 100 \cdot \chi_{сух} / (100 + 0,1302 \cdot d_2), \quad (1)$$

где $\chi_{сух}$ – содержание компонента в сухом газе, % об.;

$$\frac{d_2 \cdot V_{H_2O}^M}{M_{H_2O}} = \frac{d_2 \cdot 23,45}{1000 \cdot 18,016} = 0,001302 \cdot d_2,$$

где d_2 – содержание водяных паров в газе, г/м³ сух. газа; $V_{H_2O}^M$ – мольный объем водяного пара м³/кмоль; M_{H_2O} – молекулярная масса водяного пара, кг/кмоль.

Влагосодержание воздуха определяется:

$$d_6 = d_n \cdot \varphi \text{ г/м}^3 \text{ сух. воздуха}, \quad (2)$$

где d_n – влагосодержание воздуха при полном насыщении г/м³ сух. воздуха; φ – определенная экспериментально относительная влажность, доли единиц.

Кислород – мощный интенсификатор горения топлива в факеле и тепломассообмена. Технологический кислород содержит 90–99,5 % [5].

Атмосферный сухой воздух – смесь различных газов. В его составе содержится 78,08 % азота, 20,95 % кислорода, 0,93 % аргона, 0,03 % углекислого газа. На долю остальных газов (неон, гелий, ксенон, радон и др.) приходится примерно 0,01 % [1].

Стехиометрический расчет горения природного газа. включает решение трех постоянных задач: определение количества окислителя, количество продуктов сгорания, их химический состав и температуру.

Стехиометрическое уравнение горения природного газа имеет вид:

– в кислороде:



– в воздухе:

$$C_n H_{2n+2} + \frac{3n+1}{2} O_2 + K \frac{3n+1}{2} \cdot N_2 = nCO_2 + (n+1)H_2O + K \frac{3n+1}{2} N_2, \quad (4)$$

где n – число атомов углерода в углеводороде, целое число; $K = \frac{N_2}{O_2} = 3,727$ для сухого воздуха, $K' = \frac{100 - O_2}{O_2}$ для влажного и обогащенного кислорода, где N_2 – концентрация азота, %; O_2 – концентрация кислорода, %; O_2' – концентрация кислорода в смеси влажного воздуха и технического кислорода, %.

Расход кислорода на горение:

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot \left(\Sigma \left(\frac{3n+1}{2} \right) \cdot C_n H_{2n+2} \right) - O_2 \cdot M^3 / M^3. \quad (5)$$

Теоретический расход сухого воздуха:

$$L_O^C = (1 + K) \cdot V_{O_2} \cdot M^3 / M^3. \quad (6)$$

Теоретический расход влажного воздуха:

$$L_O^B = (1 + 0,001302 \cdot d_B) \cdot L_O^C \cdot M^3 / M^3. \quad (7)$$

Действительный расход влажного воздуха (кислорода $L_{\alpha k}$) при $\alpha > 1,0$:

$$L_{\alpha k} = L_O^B \cdot \alpha \cdot M^3 / M^3, \quad (8)$$

где α – коэффициент расхода воздуха.

Объемы отдельных составляющих продуктов сгорания газа:

$$v_{oCO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + n \cdot \Sigma C_n H_{2n+2}) \cdot M^3 / M^3; \quad (9)$$

$$v_{oH_2O} = 0,01 \cdot (H_2O + (n+1) \cdot \Sigma C_n H_{2n+2}) \cdot M^3 / M^3; \quad (10)$$

$$v_{oN_2} = 0,01 \cdot N_2 + K \cdot V_{O_2} \cdot M^3 / M^3; \quad (11)$$

$$v_{N_2}^\alpha = 0,01 \cdot N_2 + \alpha \cdot K \cdot V_{O_2} \cdot M^3 / M^3; \quad (12)$$

$$v_{\alpha H_2O} = v_{oH_2O} + 0,001302 \cdot d_g \cdot (\alpha - 1) \cdot M^3 / M^3; \quad (13)$$

$$v_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot V_{O_2} \cdot M^3 / M^3. \quad (14)$$

Общее количество продуктов сгорания:

при $\alpha = 1,0$:

$$V_0 = v_{oCO_2} + v_{oH_2O} + v_{oN_2} \cdot M^3 / M^3; \quad (15)$$

при $\alpha > 1,0$:

$$V_\alpha = v_{oCO_2} + v_{\alpha H_2O} + v_{\alpha N_2} + v_{O_2} \cdot M^3 / M^3. \quad (16)$$

Концентрация компонента в продуктах сгорания:

при $\alpha = 1,0$:

$$X^o = \frac{V_{\alpha k}}{V_o} \cdot 100\%; \quad (17)$$

при $\alpha > 1,0$:

$$X^\alpha = \frac{V_{\alpha k}}{V_\alpha} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м³:

$$Q_u^p = 127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_2 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} + 234 \cdot H_2S [6]. \quad (19)$$

Температуру продуктов сгорания, рассчитанную с учетом химического недожога, называют балансовой. Балансовую температуру определяют по формуле:

$$t_{\alpha}^{\circ} = \frac{(Q_{нз}^p + Q_{\kappa}^{\phi} + Q_{\sigma}^{\phi} + Q_{\rho}^{\phi} - Q_x)}{V_{\alpha} \cdot \sum C_i \cdot c_i^{\prime\phi}} \text{ К}, \quad (20)$$

где C_i – концентрация i -го компонента в продуктах сгорания, в долях единицы; $c_i^{\prime\phi}$ – теплоемкость i -го компонента продуктов сгорания при t_{σ}^{α} , $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $Q_{нз}^p$ – теплота сгорания природного газа, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Физическая теплота воздуха

$$Q_{\sigma}^{\phi} = c_{\sigma}^{\prime\phi} \cdot L_{\alpha\sigma}^{\prime} \cdot t_{\sigma} \text{ кДж}/\text{м}^3, \quad (21)$$

где $c_{\sigma}^{\prime\phi}$ – теплоемкость воздуха при t_{σ} , $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Физическая теплота кислорода

$$Q_{\kappa}^{\phi} = c_{\kappa}^{\prime\phi} \cdot L_{\alpha\kappa}^{\prime} \cdot t_{\kappa} \text{ кДж}/\text{м}^3, \quad (22)$$

где $c_{\kappa}^{\prime\phi}$ – теплоемкость кислорода при t_{κ} , $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ [6].

Физическая теплота природного газа

$$Q_{\rho}^{\phi} = c_{\rho}^{\prime\phi} \cdot V_{\rho}^{\prime} \cdot t_{\rho} \text{ кДж}/\text{м}^3, \quad (23)$$

где $c_{\rho}^{\prime\phi}$ – теплоемкость природного газа при t_{ρ} , $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Потери теплоты с химическим недожогом

$$Q_x = 0,015 \cdot Q_{нз}^p \text{ кДж}/\text{м}^3, \quad (24)$$

где коэффициент 0,015 нормируется технологическим процессом.

Уравнение по определению t_{α}° решают аналитическим методом последовательного приближения, так как в нем имеется два неизвестных, а именно определяемая температура (в левой части уравнения) и объемная (в правой части уравнения) теплоемкость, зависящая от этой температуры.

Балансовую температуру рассчитывают и в явной форме, используя нелинейные уравнения теплоемкостей компонентов продуктов сгорания:

$$C_i^T = a + b \cdot T + c \cdot T^{-2} \text{ кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{К} [4]. \quad (25)$$

$$c_{CO_2}^{\prime\phi} = (44,14 + 9,04 \cdot 10^{-3} \cdot T - 8,54 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) \cdot 0,04492; \quad (26)$$

$$c_{H_2O}^{\prime\phi} = (30 + 10,71 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,33 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) \cdot 0,04264; \quad (27)$$

$$c_{O_2}^{\prime\phi} = (31,46 + 3,39 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,77 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) \cdot 0,04466; \quad (28)$$

$$c_{N_2}^{\prime\phi} = (27,88 + 4,27 \cdot 10^{-3} \cdot T) \cdot 0,04464. \quad (29)$$

Действительная температура t_{α}° газовой среды, с учетом теплообмена с окружающей средой: $t_{\alpha}^{\circ} = \eta_{нпр} \cdot t_{\alpha}^{\circ}$, где $\eta_{нпр}$ – пирометрический коэффициент, среднее значение которого за период завалки и нагрева шихты составляет 0,81 [1].

Известно [6], что при температуре более 1500 °С отмечается диссоциация H_2O и CO_2 . Степень диссоциации зависит не только от температуры, но и от концентрации рассматриваемых компонентов.

Объем водяного пара в продуктах сгорания природного газа, который подвергается диссоциации, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{H_2O}^{\circ} = a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / \text{м}^3, \quad (30)$$

где $V_{H_2O}^{\delta}$ – объем водяного пара, который диссоциирует; a – степень диссоциации водяного пара, соответствующая температуре газовой среды, %; H_2O – концентрация водяного пара в продуктах сгорания, % об; V_{α} – количество продуктов сгорания, $м^3/м^3$.

Объемы кислорода и водорода в продуктах сгорания при диссоциации $H_2O_{пар}$ рассчитывают с учетом мольных объемов кислорода, водорода и водяного пара $H_2O \rightarrow H_2 + O$.

$$1,0 \cdot V_{H_2O}^M \rightarrow 1,0 \cdot V_{H_2}^M + 0,5V_{O_2}^M. \quad (31)$$

$$V_{O_2}^{H_2O} = \frac{V_{O_2}^M \cdot 10^{-4}}{V_{H_2O}^M} \cdot 0,5 \cdot a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} = \frac{22,39}{23,45} \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} = \quad (32)$$

$$= 4,775 \cdot 10^{-5} \cdot a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} м^3 / м^3;$$

$$V_{H_2}^{H_2O} = \frac{V_{H_2}^M \cdot 10^{-4}}{V_{H_2O}^M} \cdot a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} = \frac{22,43}{23,45} \cdot 10^{-4} \cdot a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} = 9,57 \cdot 10^{-5} \cdot a \cdot H_2O \cdot V_{\alpha} м^3 / м^3; \quad (33)$$

где $V_{O_2}^M$ – мольный объем кислорода, 22,39 $м^3/кмоль$; $V_{H_2}^M$ – мольный объем водорода, 22,43 $м^3/кмоль$; $V_{H_2O}^M$ – мольный объем водяного пара, 23,45 $м^3/кмоль$.

Недиссоциированная часть водяного пара:

$$V_{H_2O}' = (1 - 0,01 \cdot a) \cdot V_{H_2O} м^3 / м^3. \quad (34)$$

Суммарный объем газов, состоящий из недиссоциированного водяного пара, водорода и кислорода, образовавшихся в результате диссоциации водяного пара:

$$V_{\Sigma}^{H_2O} = V_{H_2O}' + V_{O_2}^{H_2O} + V_{H_2}^{H_2O} м^3 / м^3. \quad (35)$$

Объем диссоциированного диоксида углерода рассчитывают по уравнению:

$$V_{CO_2}^{\delta} = b \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} \cdot 10^{-4} м^3 / м^3, \quad (36)$$

где $V_{CO_2}^{\delta}$ – объем диоксида углерода, который диссоциирует, $м^3/м^3$; b – степень диссоциации диоксида углерода, соответствующая температуре (t_{α}^{δ}) газовой среды и концентрации CO_2 , %; CO_2 – концентрация диоксида углерода в продуктах сгорания, % об.; V_{α} – количество продуктов сгорания, $м^3/м^3$.

Объем кислорода и монооксида углерода в продуктах сгорания, получившихся в результате диссоциации диоксида углерода от температуры процесса, рассчитывают с учетом мольных объемов кислорода, углерода и диоксида углерода: $CO_2 \rightarrow CO + O$.

$$1,0 \cdot V_{CO_2}^M \rightarrow 1,0 \cdot V_{CO}^M + 0,5 \cdot V_{O_2}^M. \quad (37)$$

$$V_{O_2}^{CO_2} = \frac{V_{O_2}^M \cdot 10^{-4}}{V_{CO_2}^M} \cdot 0,5 \cdot b \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} = \frac{22,39}{22,26} \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot b \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} = \quad (38)$$

$$= 5,029 \cdot 10^{-5} \cdot b \cdot 0,5 \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} м^3 / м^3;$$

$$V_{CO}^{CO_2} = \frac{V_{CO}^M \cdot 10^{-4}}{V_{CO_2}^M} \cdot b \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} = \frac{22,40}{22,26} \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} = 1,006 \cdot 10^{-4} \cdot b \cdot CO_2 \cdot V_{\alpha} м^3 / м^3; \quad (39)$$

$$V_{CO_2}' = (1 - 0,01 \cdot b) \cdot V_{CO_2} м^3 / м^3, \quad (40)$$

где V_{CO}^M – мольный объем оксида углерода, 22,40 м³/кмоль; $V_{CO_2}^M$ – мольный объем диоксида углерода, 22,26 м³/кмоль; V_{CO_2}' – недиссоциированная часть диоксида углерода.

Суммарный объем газов, состоящий из недиссоциированного диоксида углерода, оксида углерода и кислорода, образовавшихся в результате диссоциации:

$$V_{\Sigma}^{CO_2} = V_{CO_2}' + V_{O_2}^{CO_2} + V_{CO}^{CO_2} \text{ м}^3 / \text{м}^3. \quad (41)$$

Количество продуктов сгорания природного газа с учетом диссоциации водяного пара и диоксида углерода:

$$V_{\alpha}' = (1 - 0,01 \cdot \alpha) \cdot V_{H_2O} + V_{O_2}^{H_2O} + V_{H_2}^{H_2O} + (1 - 0,01 \cdot b) \cdot V_{CO_2} + V_{O_2}^{CO_2} + V_{CO}^{CO_2} + V_{N_2} + O_2^u \text{ м}^3 / \text{м}^3. \quad (42)$$

В работе представлен расчёт горения природного газа, химический состав горючих компонентов которого состоят из углеводородов парафинового ряда C_nH_{2n+2} .

Отмечено, что химический состав топлива и окислителя воздуха в справочной литературе и технической документации представляют на сухую пробу с указанием влагосодержания в г/м³ сухой газовой среды, поэтому в расчете сделан пересчёт состава газа на действительное состояние с учетом содержания водяного пара. Расчёт горения природного газа выполнен строго по стехиометрическим реакциям с учетом действительного состояния всех компонентов и при использовании технологического кислорода и влажного атмосферного воздуха с коэффициентом расхода равным 1,0 и 2,0. Результаты расчёта представлены в таблице. Балансовую температуру продуктов сгорания рассчитывали с использованием программы Microsoft Excel и i-t диаграммы.

Анализ данных таблицы показывает, что при расходе воздуха равном $\alpha_b=2,0$, количество продуктов сгорания увеличивается на 47,44 %, балансовая температура снижается на 47,8 %. При расходе кислорода $\alpha_k=2,0$ количество продуктов сгорания увеличивается на 42,43 %, балансовая температура снижается на 32,3 %.

Сравнивая степени диссоциации с поправкой на действительное изменение концентрации и температуры от табличных [6], можно сделать вывод, что с увеличением расхода кислорода α_k и понижением балансовой температуры t_{α}^{δ} , степень диссоциации водяного пара уменьшается на 14,78 %, диоксида углерода – на 37,62 % соответственно.

Таблица

Характеристика продуктов сгорания природного газа с учетом диссоциации водяного пара ($H_2O_{\text{пар}}$)
и диоксида углерода (CO_2)

Параметры	Окислитель кислород ($t_k=20^\circ C$)										Окислитель воздух ($t_b=20^\circ C$)							
	Состав продуктов сгорания										Состав продуктов сгорания							
	при $\alpha_k=1$					при $\alpha_k=2$					при $\alpha_b=1$				при $\alpha_b=2$			
	без диссоциации		с диссоциацией (при $2710^\circ C$)		без диссоциации		с диссоциацией (при $1835^\circ C$)		с диссоциацией (при $2265^\circ C$)		без диссоциации		с диссоциацией (при $1950^\circ C$)		с диссоциацией (при $1580^\circ C$)		без диссоциации	
	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%	m^3/m^3	%
CO_2	0,987	32,08	0,341	9,49	0,987	18,45	0,942	17,49	0,713	12,84	0,987	9,53	0,951	9,14	0,974	9,40	0,987	5,01
H_2O	1,978	64,30	1,540	42,82	1,978	36,98	1,950	36,22	1,826	32,90	1,978	19,10	1,920	18,47	1,978	19,09	1,978	10,04
N_2	0,111	3,62	0,111	3,09	0,421	7,88	0,421	7,82	0,421	7,58	7,39	71,37	7,39	71,07	7,39	71,32	14,78	74,99
O_2^H	–	–	–	–	1,960	36,69	1,960	36,42	1,960	35,31	–	–	–	–	–	–	1,963	9,96
$O_2^{H_2O}$	–	–	0,209	5,81	–	–	0,014	0,26	0,072	1,30	–	–	0,028	0,27	–	–	–	–
$O_2^{CO_2}$	–	–	0,325	9,04	–	–	0,023	0,43	0,138	2,49	–	–	0,018	0,17	0,007	0,68	–	–
$O_2^{C^{***}}$	–	–	0,534	14,85	1,96	36,69	1,997	37,10	2,17	39,09	–	–	0,046	0,44	–	–	1,963	9,96
$H_2^{H_2O}$	–	–	0,420	11,68	–	–	0,027	0,50	0,145	2,61	–	–	0,055	0,53	–	–	–	–
CO^{CO_2}	–	–	0,650	18,07	–	–	0,046	0,85	0,276	4,97	–	–	0,036	0,35	0,013	0,13	–	–
$V_o (V_a)$	3,08	100	3,596	100	5,346	100	5,382	100	5,551	100	10,355	100	10,40	100	10,362	100	19,708	100
$t_\alpha^\delta, ^\circ C$	Э	3345				2265				1295				676				
	В	3345				2265				1295				676				
$t_\alpha^0, ^\circ C$	М	3345				2265				1295				676				
	и-т	–				–				1950				1250				
$t_\alpha^0, ^\circ C$	Э	2710				1835				1049				547,56				
	В	2710				1835				1049				547,56				
$t_\alpha^0, ^\circ C$	М	2710				1835				1049				547,56				
	и-т	–				–				1580				1013				
aH_2O	–	–	–	22,114	–	–	–	1,437	–	7,639	–	–	–	2,913	–	–	–	–
BCO_2	–	–	–	65,412	–	–	–	4,603	–	27,797	–	–	–	3,670	–	1,306	–	–

Список использованных источников

1. Старцев В.А. Скрап карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах / В.А. Старцев, Г.В. Воронов, В.И. Лобанов, Э.А. Шумахер, Э.Э. Шумахер. – Екатеринбург, 2004.
2. Устройство и принцип работы дуговой сталеплавильной печи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nashkotel.ru/dugovaya-staleplavilnaya-pech.html>. – Рус.
3. Братковский Е.В. Электрометаллургия стали и спецэлектрометаллургия [Электронный ресурс] / Федеральное агентство по образованию / Учебное пособие. Режим доступа: http://elmet.at.ua/_ld/0/26_0285338_622B5_b.pdf – свободный. – Рус.
4. Metallurgia [электронный ресурс] / Premium engineering. Режим доступа: <http://www.premen.ru/ru/content/air/apply/metal/> (28.03.18).
5. ГОСТ 5583–78. Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4) [Текст]. – Введ. 1980–01–01. – М.: Межгосударственный стандарт: Издательство стандартов, 2005. – 14 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Metallurgia, 1975. – 368 с.

УДК 669.162

В. Г. Лисиенко¹, С. И. Холод^{1,2}, В. П. Жуков²

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

² Технический университет УГМК, г. В. Пышма, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ

Аннотация

Огневое рафинирование черновой меди основано на частичном удалении примесей, обладающих повышенным сродством к кислороду. Наиболее интересным является процесс централизованного рафинирования меди на одном предприятии. Это связано с тем, что черновая медь от заводов – производителей имеет различный химический состав. Очевидно, что шихта каждой загрузки также имеет переменный химический состав. Поэтому для постоянно меняющегося средневзвешенного состава жидкого металла, требуется различное количество кислорода для окисления и ошлакования примесей.

Целью работы является методика создания математической модели для решения однокритериальной и многокритериальной задачи огневого рафинирования меди. Приведены алгоритмы модели на основе пассивного эксперимента, с выбранными допущениями и ограничениями. Математические модели разработаны с использованием корреляционно – регрессионного анализа. Результирующей переменной в моделях является концентрация кислорода в расплаве. Целевая функция определяется основными переменными процесса рафинирования.