

Влияние состава природного газа на тепловой коэффициент полезного действия отражательной печи для никелевых сплавов

© В.Э. Кирос Кабасканго

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – разработать и обосновать принципы энергетической модели промышленной отражательной печи с учетом химического состава и свойств природного газа и рассчитать тепловой коэффициент полезного действия печи для оценки ее производительности в промышленности. Для проведения исследования выполнены математические расчеты на основе данных химического и физического анализа дымовых газов и температуры дымохода с использованием стандартных графиков избытка воздуха и значений энтальпий компонентов дымовых газов. Измерение количества отходящих загрязняющих веществ осуществлялось при помощи газоанализаторов марки MRU Delta 65–3, которые идентифицируют суммарное количество газов (O_2 , CO , NO , H_2S), а также температуру, давление (разряжение), рассчитывают содержание CO_2 и коэффициент полезного действия установки. Для проверки математической модели использовалась программа Aspen Hysys. Получены данные о свойствах природного газа: химическом составе, молекулярной массе, теплотворной способности, избытке воздуха при сгорании. Также получены данные о газах сгорания: компонентах сгоревшего газа, молекулярных массах, энтальпии, теплотворной способности, соотношении газов сгорания при температуре от $94^\circ C$ до $316^\circ C$. Приведенные химические реакции горения с количеством молей, необходимых и образующихся для каждой реакции, использованы для расчета теплового коэффициента полезного действия отражательной печи для никелевых сплавов. Расчетные данные подтверждены с помощью программы Aspen Hysys. На основании проведенных исследований было установлено, что переменной, которая имеет наибольшее влияние на величину теплового коэффициента полезного действия, является низкая теплотворная способность, так как она зависит от состава природного газа. Предложенная методика расчета теплового коэффициента полезного действия с использованием компьютерной программы эффективна в случае, если оператор на месте хочет оценить эффективность работы технологической печи.

Ключевые слова: производство никеля, отражательные печи, природный газ, состав отходящих газов, управление, алгоритм

Информация о статье: поступила в редакцию 08 сентября 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 08 октября 2020 г.; принята к публикации 30 октября 2020 г.

Для цитирования: Кирос Кабасканго В.Э. Влияние состава природного газа на тепловой коэффициент полезного действия отражательной печи для никелевых сплавов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 1159–1167. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1159-1167>

Effect of natural gas composition on reverberatory furnace thermal efficiency for nickel alloys

Valeria Esthefania Quiroz Cabascango

St. Petersburg Mining University, Russia

Abstract: The purpose of the article is to develop and substantiate the principles of an energy model of an industrial reverberatory furnace taking into account chemical composition and properties of natural gas as well as to calculate the furnace thermal efficiency in order to estimate its industrial performance. To conduct the research mathematical calculations are performed based on the data of chemical and physical analysis of flue gases and chimney temperature using standard graphs of excess air and enthalpy values of flue gas components. The measurement of the amount of waste pollutants is carried out using MRU Delta 65-3 gas analyzers, which identify the total amount of gases (O_2 , CO , NO , H_2S). They determine the temperature, pressure (vacuum), calculate the content of CO_2 and installation efficiency as well. Aspen Hysys program is used to verify the mathematical model. The data on the properties of natural gas are obtained including the data on chemical composition, molecular weight, calorific value, excess air during combustion. The data on flue gases are also obtained, which include the data on the burnt gas components, molecular weights, enthalpy, calorific

value, flue gases ratio at the temperatures from 94°C to 316°C. The chemical reactions of combustion given with the number of moles required and formed for each reaction are used to calculate the thermal efficiency of a reverberatory furnace for nickel alloys. The calculated data are confirmed by Aspen Hysys software. Based on the studies conducted, it is found that the variable having the greatest influence on the thermal efficiency is the low calorific value, since it depends on the composition of the natural gas. The proposed methods for calculating the thermal efficiency using a computer program are effective if an operator wants to evaluate the furnace operation efficiency on site.

Keywords: nickel production, reverberatory furnaces, natural gas, flue gas composition, control, algorithm

Information about the article: Received September 08, 2020; revised October 8, 2020; accepted for publication on October 30, 2020.

For citation: Quiroz Cabascango VE. Effect of natural gas composition on reverberatory furnace thermal efficiency for nickel alloys. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1159–1167. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1159-1167>

ВВЕДЕНИЕ

В природе существует несколько типов минералов, из которых можно извлекать стратегические металлы, такие как никель, который используется в качестве сырья для промышленности по производству нержавеющей стали. Крупнейшие месторождения никельсодержащих руд расположены в Новой Каледонии, Японии, России, США, Бразилии, Греции, Кубе, Индонезии, Филиппинах, Доминиканской Республике, Австралии, Гватемале, Колумбии, Югославии, Венесуэле и Китае. В этих странах есть предприятия по извлечению никеля пирометаллургическим и гидрометаллургическим способами из никелевых латеритов [1].

Латериты – важный источник в производстве никеля. Восстановление латеритов является важным этапом для всех процессов, связанных с их производством. Основными видами латеритных минералов являются лимонит и серпентин, которые ведут себя по-разному в процессе восстановления [2].

В Латинской Америке есть месторождения никельсодержащих латеритов, которые могут представлять интерес для промышленности, производящей ферроникель, и до настоящего времени не сообщалось об исследованиях их поведения при воздействии высоких температур. Термодинамика и кинетика процесса производства ферроникеля в отражательных печах с горелками на природном газе среднего давления также не изучены глубоко [3].

Оценка производительности отражательной печи (ОП), используемой для получения никелевых сплавов, включая ферроникель,

очень важна для понимания основ и решения проблем производства. Термодинамические расчеты печи дают представление о получении информации и понимании операций как в целом в пирометаллургических процессах [4], так и при производстве никельсодержащих сплавов.

Для тех, кому необходимо регулярно выполнять расчеты теплового КПД, возможно разработать программу электронных таблиц. В статье показано, как возможно рассчитать тепловой КПД печи с помощью данных анализа состава дымовых газов.

Эффективность печи или тепловой КПД – это количество тепла, выделяемого в пламени, которое поглощается нагретой жидкостью (в %). Обычно значения варьируются от 70% до 95%. Источником неэффективности являются тепловые потери в стенках печи (2,5% – допустимое значение в проекте) и потери в образующихся газах. Температура газа на выходе должна быть на 25–40°C выше, чем температура жидкости на входе. Поскольку состав дымовых газов не сильно меняется, уравнения могут быть выведены для довольно точного определения температуры газа и потерь в печи [5].

Этот метод учитывает анализ дымовых газов и температуры дымохода для расчета теплового КПД. В процедуре разработки электронных таблиц используются стандартные графики избыточного воздуха и энтальпий компонентов дымовых газов для упрощения расчетов [6].

Описанный способ предназначен только для отражательных печей, работающих с горелками среднего давления на природном газе.

Чтобы понять описанную процедуру, рассчитаем следующие параметры и показатели:

- низкую теплотворную способность (Q_H) или теплоту сгорания топлива;
- температуру воздуха для горения и расход дымовых газов;
- состав дымовых газов (на «сухую» массу или влажных);
- тепловой КПД печи.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССА

Существует несколько способов расчета теплового КПД печи, например, на основе первого закона термодинамики или анализа дымовых газов [7]. В нашем случае мы основываемся на анализе характеристик дымовых газов и их температурах. Основные данные исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Температура дымовых газов
Table 1. Temperature of flue gases

Температура	°C
Температура сгоревшего газа на выходе	176
Температура окружающего воздуха	15
Температура воздуха для горения	20
Температура продуктов сгорания	25

Содержание кислорода в сжигаемом газе составляло 3,2% в пересчете на сухое вещество [8]. Нормальный расход в течение процесса – 100 моль/ч. Состав природного газа в соответствии с проведенными исследованиями приведен в табл. 2.

Схема отражательной печи, основанная на наших данных по расходу газа и воздуха, показана на рис. 1.

Исходя из данных топлива, воздуха для горения и принимая за основу расход газа для горения 100 моль/ч, рассчитаем общий вес топлива. Проводим следующие вычисления:

1. Находим молярный расход каждого компонента природного газа [9], умножая его молярную долю на расход газа (100 моль/ч), затем умножаем потоки каждого компонента газа на его соответствующую молекулярную массу и, суммируя, получим общий расход газа. Общий расход газа = 1815,00 фунт/ч = 823,27 кг/ч.

Таблица 2. Состав природного газа
Table 2. Natural gas composition

№ п/п	Компонент	Формула	Содержание, %
1	Метан	CH_4	90,08
2	Этан	C_2H_6	2,14
3	Этилен	C_2H_4	2,28
4	Пропан	C_3H_8	0,29
5	Пропилен	C_3H_6	2,95
6	Бутан	C_4H_{10}	0,11
7	Бутилен	C_4H_8	1,06
8	Пентан	C_5H_{12}	0,04
9	Азот	N_2	1,94
10	Моноксид углерода	CO	0,74
11	Углекислый газ	CO_2	0,39
12	Сероводород	H_2S	0,0048

2. Теперь умножим расход каждого газового компонента на его соответствующую низшую теплотворную способность, суммируя все теплотворные способности, а затем, разделив на общий расход газа, получим его более низкую теплотворную способность [10]. $Q_H = 20778,60 \text{ БТЕ/ч} = 6089,60 \text{ Вт}$ (БТЕ/ч – от англ. British thermal unit, Британская термическая единица).

3. Затем находим продукты сгорания газа, исходя из стехиометрии каждой реакции [11], реакции показаны в табл. 3.

4. С помощью данных табл. 3 рассчитаем необходимые теоретические моли O_2 : $nO_{2(необ.)} = 246,99 \text{ моль/ч}$.

5. Рассчитываем количество воздуха и получаем необходимый кислород, из воздуха 21% = O_2 [12]: $nO_{2(треб.)} = 287,50 \text{ моль/ч}$; $воздух_{(треб.)} = 1369,05 \text{ моль/ч}$.

6. Теперь рассчитаем поток сгоревшего газа и его связь с потоком дымовых газов [13]:

поток сгоревшего газа = природный газ для горения + воздух для горения,

$$\begin{aligned} \text{поток сгоревшего газа} &= \\ &= 41519 \text{ фунт/ч} = 18832,70 \text{ кг/ч}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{поток сгоревшего газа/поток} \\ \text{дымовых газов} \end{aligned} \quad (2)$$

$$18832,70 \text{ кг/ч} / 823,27 \text{ кг/ч} = 22,87 \text{ кг газа}.$$

7. Теперь рассчитаем состав сгоревшего газа, используя реакции горения в табл. 3. Как известно, на каждый моль CH_4 образуется 2 моля CO_2 .

Общее количество образовавшегося CO_2 = 137,36 моль/ч.

8. Рассчитаем общий молярный поток CO_2 на выходе [14]:

$$\begin{aligned} \text{общий } \text{CO}_2 &= \text{общий образованный } \text{CO}_2 + \\ &+ \text{исходный } \text{CO}_2, \\ \text{общий } \text{CO}_2 &= 137,53 \text{ моль/ч.} \end{aligned} \quad (3)$$

Мы применяем тот же подход расчета для других составляющих газов, выходящих из дымохода, и выражаем это на сухой основе, как показано в табл. 4. Измерение количества отходящих загрязняющих веществ осуществлялось при помощи газоанализаторов марки MRU Delta 65–3.

9. Чтобы рассчитать потери тепла в дымоходе, умножаем молярный расход каждого

компонента газа на его молекулярную массу, соответственно, получая его массовый расход. Делим каждый поток газа на выходе на поток продуктов сгорания и умножаем это значение на его энтальпию при 448,70 К, значения энтальпии можно найти в литературных источниках [15]. Суммарная теплотворная способность каждого газа на выходе при 176°C – это потери тепла в дымоходе [16]. В табл. 5 приведены результаты тепловых потерь сгоревших газов на выходе ОП.

10. Рассчитаем радиационные потери (Q_p) на основе более низкой теплотворной способности, которая составляет [17]:

$$Q_p = Q_n \cdot (\text{предполагаемый процент потерь}); \quad (4)$$

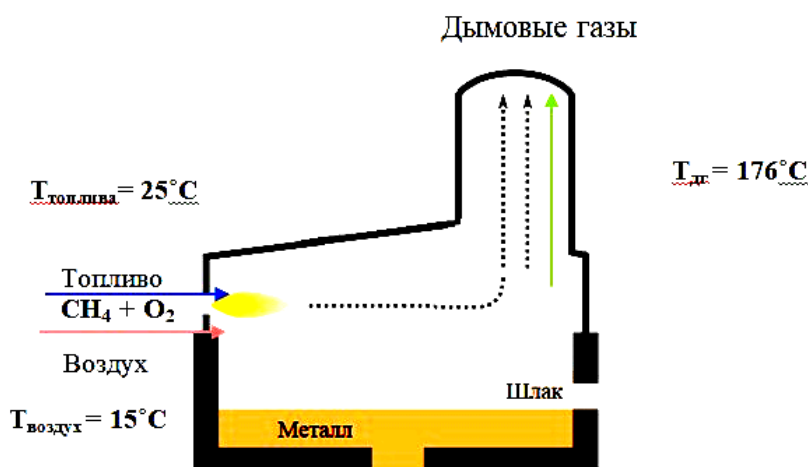


Рис. 1. Схема отражательной печи
 Fig. 1. Diagram of a reverberatory furnace

Таблица 3. Химические реакции горения природного газа
 Table 3. Chemical reactions of natural gas combustion

№ п/п	Химическая реакция	Требуемое количество молей O_2	Количество образовавшихся молей CO_2	Количество образовавшихся молей H_2O	Количество образовавшихся молей SO_2
1	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	2	1	2	0
2	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	3,5	2	3	0
3	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	3	2	2	0
4	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	5	3	4	0
5	$\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	4,5	3	3	0
6	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	6,5	4	5	0
7	$\text{C}_4\text{H}_8 + 6\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	6	4	4	0
8	$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2 \rightarrow 5\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	8	5	6	0
9	N_2 (не горит)	–	–	–	–
10	$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	0,5	1	0	0
11	CO_2 (не горит)	–	–	–	–
12	$\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	1,5	0	1	1

Таблица 4. Общий расход сгоревших газов на выходе отражательной печи в сухом и влажном виде
Table 4. Total consumption of burnt gases in dry and wet forms at the reverberatory furnace outlet

№ п/п	Компоненты сгоревшего газа	Единица измерения, моль/ч	С содержанием влаги (во влажном виде), %	Без содержания влаги (в сухом виде), %
1	CO ₂	137,53	9,29	10,91
2	H ₂ O	219,98	14,85	0,00
3	SO ₂	0,0048	0,0003	0,0004
4	O ₂	40,51	2,74	3,21
5	N ₂	1082,96	73,12	85,88
	Сумма	1480,99	100%	100%

Таблица 5. Тепловые потери сгоревших газов на выходе отражательной печи
Table 5. Heat losses of flue gases at reverberatory furnace outlet

№	Компоненты сгоревшего газа	Единица измерения, моль/ч	Молярная масса, г/моль	Вес, кг/ч	Общий вес топлива, кг	Энтальпия при 448 К	Теплотворная способность топлива, кДж/кг
1	CO ₂	137,53	44	6051,32	3,36	63,72	214,24
2	H ₂ O	219,98	18	3959,64	2,20	131,25	288,71
3	SO ₂	0,0048	64	0,31	0,0002	46,95	0,01
4	O ₂	40,51	32	1296,32	0,72	63,54	45,76
5	N ₂	1082,96	28	30322,88	16,85	74,56	1256,04
	Сумма	1480,98	–	–	–	Qs	1804,76

$$Q_p = 20778,60 \frac{\text{БТЕ}}{\text{ч}} \cdot 2,5\% =$$

$$519,46 \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт}} = 1207,45 \text{ кДж/кг.}$$

11. Наконец, вычисляем явное тепло воздуха ($Q_{\text{я}}$, Sensible heat) и продуктов сгорания по формуле [18]:

$$Q_{\text{я}}(\text{воздуха}) = \frac{\text{кг}_{\text{воздуха}}}{\text{кг}_{\text{ПС}}} \cdot C_{p_{\text{воздуха}}} \cdot (T_t - T_d); \quad (5)$$

$$Q_{\text{я}}(\text{воздуха}) = 21,87 \cdot 0,24 \cdot (20 - 15) =$$

$$= 26,24 \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт}} = 60,99 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{я}}(\text{продукты сгорания}) =$$

$$= C_{p_{\text{топлива}}} \cdot (T_f - T_d); \quad (6)$$

$$Q_{\text{я}}(\text{продукты сгорания}) = 0,53 \cdot (25 - 15) =$$

$$= 5,30 \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт}} = 12,31 \text{ кДж/кг.}$$

12. Чистый тепловой КПД (e) можно определить по следующему уравнению [19]:

$$e = \frac{(Q_H + Q_{\text{я}}(\text{воздуха}) \cdot Q_{\text{я}}(\text{ПС})) - Q_s - Q_p}{(Q_H + Q_{\text{я}}(\text{воздуха}) \cdot Q_{\text{я}}(\text{ПС})}; \quad (7)$$

$$e = \frac{(20778,60 + 26,24 \cdot 5,30) - 1804,76 - 519,46}{(20778,60 + 26,24 \cdot 5,30)} =$$

$$= 89,01\%.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПЕЧИ

Проведенные расчеты показали хорошее соответствие точному значению, потому что в расчетах мы используем интерполяцию некоторых графиков, что уменьшает погрешность, поэтому проверяли лист результатов с помощью программы для моделирования Aspen Hysys [20].

Схема на рис. 2 разработана в программе Aspen Hysys, для этой схемы использовался реактор, расход воздуха рассчитывался по содержанию кислорода (в %) в продуктах сгорания.

Сгоревшие продукты направляются в линию охлаждения, как показано на рис. 2, поток энергии в последнем теплообменнике дает общие тепловые потери в дымоходе, поскольку в конце концов достигается желаемая температура.

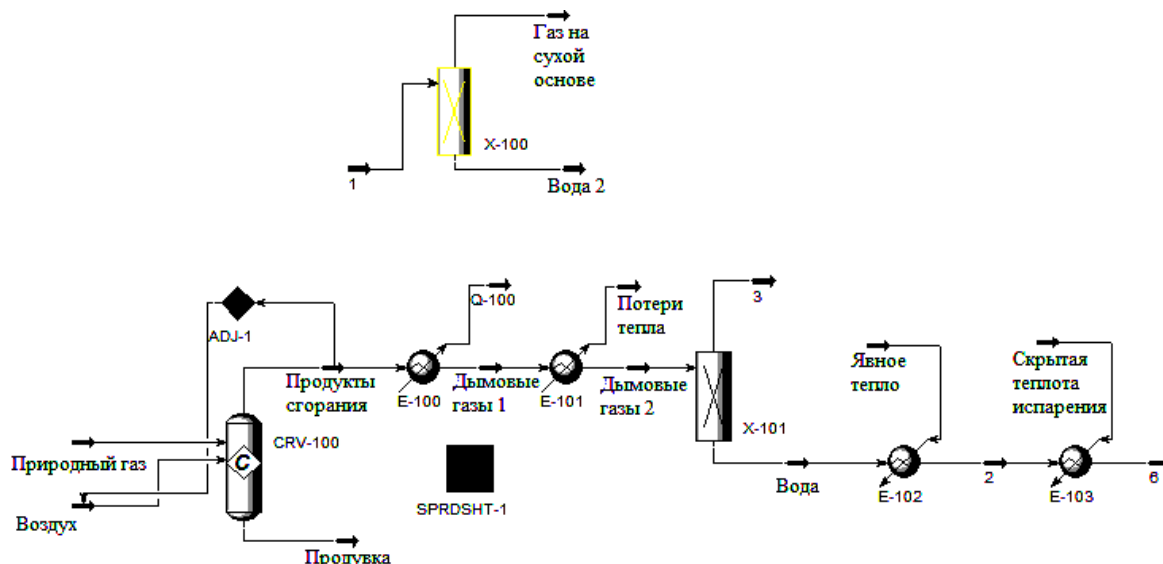


Рис. 2. Схема конструкции процесса горения в отражательных печах
 Fig. 2. Diagram of the combustion process in reverberatory furnaces

Однако в продуктах сгорания у нас будет водяной пар в качестве продукта реакции, затем поток пропускается через разделитель, где рассчитываем явную и скрытую теплоту воды, нас интересует энтальпия воды при 176°C [21].

Следовательно, отнимем поток энергии на выходе из последнего теплообменника за вычетом явной и скрытой теплоты, и это будут тепловые потери в дымоходе.

Рис. 2 позволяет нам оценить состав сжигаемого газа в сухом виде. Данные и результаты моделирования показаны на табл. 6.

Обладая уже полученными ранее знани-

ями, видно, что не все переменные имеют существенное влияние на рассчитываемый тепловой КПД печи. Ниже подробно рассмотрим переменные, которые следует учитывать при расчете теплового КПД печи:

1. Изменение температуры на выходе из дымохода. Из данных табл. 7 видно, как при небольшом изменении температуры тепловой КПД меняется примерно на 2%.

2. Изменение температуры воздуха для горения. Результаты, приведенные в табл. 8, показывают нам, что при изменении температуры тепловой КПД печи изменяется примерно на 0,02%.

Таблица 6. Данные и результаты моделирования
 Table 6. Simulation data and results

№	Компоненты природного газа	Состав природного газа, моль/ч	Молекулярный вес	Общий вес, фунт/ч	Теплотворная способность, БТЕ/фунт	Общая теплотворная способность, БТЕ/ч
1	Метан	90,08	16	1441,2	21500	30987520
2	Этан	2,14	30	64,2	20420	1310964
3	Этилен	2,28	28	63,84	20290	1295314
4	Пропан	0,29	44	12,76	19930	254307
5	Пропилен	2,95	42	123,9	19690	2439591
6	Бутан	0,11	58	6,38	19670	125495
7	Бутилен	1,06	56	59,36	19420	1152771
8	Пентан	0,04	72	2,88	19500	56160
9	Азот	0,43	28	12,04	–	–
10	Моноксид углерода	0,74	28	20,72	4345	90028
11	Углекислый газ	0,17	44	7,48	–	–
12	Сероводород	0,0048	34	0,1632	6550	1068,96
	Сумма	100	–	1815	–	37713219
	Qн	–	–	–	–	20778,60

Таблица 7. Изменение коэффициента полезного действия в зависимости от температуры дымовых газов
Table 7. Efficiency variation depending on flue gases temperature

N п/п	Температура дымовых газов, °C	Коэффициент полезного действия, %
1	149	91,27
2	177	90,00
3	205	88,73
4	233	87,45
5	260	86,18

Таблица 8. Изменение коэффициента полезного действия в зависимости от температуры воздуха для горения

Table 8. Efficiency variation depending on combustion air temperature

N п/п	Температура воздуха, °C	Коэффициент полезного действия, %
1	10	90,06
2	16	90,08
3	21	90,10
4	27	90,12
5	32	90,15

3. Изменение теплового КПД в зависимости от тепловых потерь [22]. Из данных табл. 9 видно, как при изменении температуры КПД изменяется примерно на 0,5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ влияния условий подачи природного газа различного состава через горелки среднего давления марок

ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2 в отражательную печь при получении черного никеля позволил определить условия управления тепловым балансом при контроле состава отходящих газов.

Переменная, которая имеет наибольшее влияние на расчет на тепловой КПД – это низшая теплотворная способность, поскольку она зависит от состава природного газа.

Таблица 9. Изменение коэффициента полезного действия в зависимости от тепловых потерь

Table 9. Efficiency variation depending on heat losses

N п/п	Температура воздуха, °C	Коэффициент полезного действия, %
1	2	90,60
2	2,5	90,08
3	3	89,60
4	3,5	89,10
5	4	88,60

Отражательные печи потребляют от 75 до 80% всей энергии, получаемой из топлива. Если мы увеличим их эффективность, мы сократим потребление энергии за счет потребления природного газа, что поможет сэкономить ресурсы.

Электронная таблица Excel или программа, разработанная в любом программном обеспечении, очень эффективны в том случае, если оператор на месте хочет определить эффективность технологической печи.

Библиографический список

1. Stanković S., Stopić S., Sokić M., Marković B., Friedrich B. Review of the past, present, and future of the hydro-metallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores // Metallurgical and Materials Engineering. 2020. Vol. 26. Issue 2. P. 199–208. <https://doi.org/10.30544/513>
2. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016. Vol. 4. Issue 6. P. 320–346. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2016.46028>
3. Barati M., Esfahani S., Utigard T.A. Energy recovery from high temperature slags // Energy. 2011. Vol. 36. Issue 9. P. 5440–5449. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.007>
4. Дружинин К.Е., Немчинова Н.В., Васюнина Н.В. Совершенствование основного и вспомогательного обогатительного пирометаллургических процессов и его испытания в условиях действующего производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 5. С. 144–152. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-144-152>
5. Bogusz A., Masset P.J. High temperature diffusion processes at the metal/slag interface // Defect and Diffusion Forum. 2012. Vol. 323-325. P. 115–120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.323-325.115>
6. Bunjaku A., Kekkonen M., Pietila K., Taskinen P. Effect of mineralogy and reducing agent on reduction of saprolitic nickel ores // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2013. Vol. 121. Issue 3. P. 156–165. <https://doi.org/10.1179/1743285512Y.0000000010>
7. Bains P., Psarras P., Wilcox J. CO₂ capture from the industry sector // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 63. P. 146–172. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.07.001>
8. Cruz R.A., Romero S.A., Vargas R.M., Hallen L.M. Thermodynamic analysis of the SiO₂-NiO-FeO system // Journal of Non-Crystalline Solids. 2005. Vol. 351. Issue 16-17. P. 1359–1365. <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.03.008>

9. Fernández-Tarrazo E., Sánchez-Sanz M., Sánchez A.L., Williams F.A. A multipurpose reduced chemical-kinetic mechanism for methanol combustion // *Combustion Theory and Modelling*. 2016. Vol. 20. Issue 4. P. 613–631. <https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1162330>
10. Gondaliya V., Pujara M., Mehta N. Transient heat transfer analysis of induction furnace by using finite element analysis // *Indian Journal of Applied Research*. 2013. Vol. 3. Issue 8. P. 231–234.
11. Reynolds W.C. The element potencial method for chemical equilibrium analysis: implementation in the interactive program STANJAN, version 3 // Department of Mechanical Engineering, Stanford University. 1986. [Электронный ресурс]. URL: https://web.stanford.edu/~cantwell/AA283_Course_Material/STANJAN_write-up_by_Bill_Reynolds.pdf (28.07.2020).
12. Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov Y.V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 327. Issue 2. P. 022033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022033>
13. Park Hyun Sik, Ha Min Chul, Kim Min Seok, Heo Jung Ho, Park Joo Hyun. Novel design of ferronickel smelting slag by utilizing red mud as a fluxing agent: Thermochemical computations and experimental confirmation // *Calphad*. 2017. Vol. 56. P. 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2017.01.006>
14. Bernhardt W. Combustion technology for the improvement of engine efficiency and emission characteristics // *Symposium (International) on Combustion*. 1977. Vol.16. Issue 1. P. 223–232. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80327-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80327-5)
15. Diaz C.M., Landolt C.A., Vahed A., Warner A.E.M., Taylor J.C. A review of nickel pyrometallurgical operations // *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 1988. Vol. 40. Issue 9. P. 28–33. <https://doi.org/10.1007/BF03258548>
16. Kim Sun-joong, Suzuki J., Gao X., Ueda S., Kitamura S. A kinetic model to simulate the reaction between slag and matte for the production of ferromanganese alloy from steelmaking slag // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. Vol. 2. P. 141–151. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0042-z>
17. Arkhazloo N.B., Bouissa Y., Bazdidi-Tehrani F., Jadidi M., Morin J.B., Jahazi M. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Vol. 14. P. 100428. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100428>
18. Veshkini A., Dworkin S.B. A computational study of soot formation and flame structure of coflow laminar methane/air diffusion flames under microgravity and normal gravity // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. Vol. 21. Issue 5. P. 864–878. <https://doi.org/10.1080/13647830.2017.1308558>
19. Zhu De-Ging, Tian Hong-Yu, Pan Jian, Liao Hui, Guo Zheng-Qi, Xue Yu-Xiao. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore // *Journal of Iron and Steel Research*. 2020. Vol. 5. P. 351–362. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20200019>
20. Taimoor A.A. Virtualization of the process control laboratory using ASPEN HYSYS // *Computer Applications in Engineering Education*. 2016. Vol. 24. Issue 6. P. 887–898. <http://doi.org/10.1002/cae.21758>
21. Pickles C.A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore // *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 54. P. 52–62. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029>
22. Pillai R., Galiullin T., Chyrkin A., Quadackers W.J. Methods to increase computational efficiency of CALPHAD-based thermodynamic and kinetic models employed in describing high temperature material degradation // *Calphad*. 2016. Vol. 53. P. 62–71. <http://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.03.004>

References

1. Stanković S, Stopić S, Sokić M, Marković B, Friedrich B. Review of the past, present, and future of the hydro-metallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores. *Metallurgical and Materials Engineering*. 2020;26(2):199–208. <https://doi.org/10.30544/513>
2. Elliott R, Pickles CA, Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2016;4(6):320–346. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2016.46028>
3. Barati M, Esfahani S, Utigard TA. Energy recovery from high temperature slags. *Energy*. 2011;36(9):5440–5449. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.007>
4. Druzhinin KE, Nemchinova NV, Vasyunina NV. Improving main and auxiliary equipment for pyrometallurgical processes and testing it in production conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;5:144–152. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-144-152>
5. Bogusz A, Masset PJ. High temperature diffusion processes at the metal/slag interface. *Defect and Diffusion Forum*. 2012;323-325:115–120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.323-325.115>
6. Bunjaku A, Kekkonen M, Pietila K, Taskinen P. Effect of mineralogy and reducing agent on reduction of saprolitic nickel ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2013;121(3):156–165. <https://doi.org/10.1179/1743285512Y.0000000010>
7. Bains P, Psarras P, Wilcox J. CO₂ capture from the industry sector. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017;63:146–172. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.07.001>
8. Cruz RA, Romero SA, Vargas RM, Hallen LM. Thermodynamic analysis of the SiO₂–NiO–FeO system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2005;351(16-17):1359–1365. <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.03.008>
9. Fernández-Tarrazo E, Sánchez-Sanz M, Sánchez AL, Williams FA. A multipurpose reduced chemical-kinetic mechanism for methanol combustion. *Combustion Theory*

- and *Modelling*. 2016;20(4):613–631. <https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1162330>
10. Gondaliya V, Pujara M, Mehta N. Transient heat transfer analysis of induction furnace by using finite element analysis. *Indian Journal of Applied Research*. 2013;3(8):231–234.
11. Reynolds WC. The element potencial method for chemical equilibrium analysis: implementation in the interactive program STANJAN, version 3. *Department of Mechanical Engineering, Stanford University*. 1986. Available from: https://web.stanford.edu/~cantwell/AA283_Course_Material/STANJAN_write-up_by_Bill_Reynolds.pdf [Accessed 28th September 2019].
12. Fetisov VG, Nikolaev AK, Lykov YV. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;327(2):022033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022033>
13. Park Hyun Sik, Ha Min Chul, Kim Min Seok, Heo Jung Ho, Park Joo Hyun. Novel design of ferronickel smelting slag by utilizing red mud as a fluxing agent: Thermochemical computations and experimental confirmation. *Calphad*. 2017;56:185–195. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2017.01.006>
14. Bernhardt W. Combustion technology for the improvement of engine efficiency and emission characteristics. *Symposium (International) on Combustion*. 1977;16(1):223–232. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80327-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80327-5)
15. Diaz CM, Landolt CA, Vahed A, Warner AEM, Taylor JC. A review of nickel pyrometallurgical operations. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 1988;40(9):28–33. <https://doi.org/10.1007/BF03258548>
16. Kim Sun-joong, Suzuki J, Gao X, Ueda S, Kitamura S. A kinetic model to simulate the reaction between slag and

- matte for the production of ferromanganese alloy from steelmaking slag. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016;2:141–151. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0042-z>
17. Arkhazloo NB, Bouissa Y, Bazdidi-Tehrani F, Jadidi M, Morin JB, Jahazi M. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019;14:100428. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100428>
18. Veshkini A, Dworkin SB. A computational study of soot formation and flame structure of coflow laminar methane/air diffusion flames under microgravity and normal gravity. *Combustion Theory and Modelling*. 2017;21(5):864–878. <https://doi.org/10.1080/13647830.2017.1308558>
19. Zhu De-Ging, Tian Hong-Yu, Pan Jian, Liao Hui, Guo Zheng-Qi, Xue Yu-Xiao. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore. *Journal of Iron and Steel Research*. 2020;5:351–362. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20200019>
20. Taimoor AA. Virtualization of the process control laboratory using ASPEN HYSYS. *Computer Applications in Engineering Education*. 2016;24(6):887–898. <http://doi.org/10.1002/cae.21758>
21. Pickles CA, Harris CT, Peacey J, Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*. 2013;54:52–62. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029>
22. Pillai R, Galiullin T, Chyrkin A, Quadackers WJ. Methods to increase computational efficiency of CALPHAD-based thermodynamic and kinetic models employed in describing high temperature material degradation. *Calphad*. 2016;53:62–71. <http://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.03.004>

Критерии авторства

Кирос Кабасканго В.Э. выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати, имеет на статью авторские права и несет полную ответственность за ее оригинальность.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирос Кабасканго Валерия Эстефания, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия;
✉ e-mail: valeritae111@mail.ru

Authorship criteria

Quiroz Cabascango V.E. carried out the research, made a generalization on the basis of the results obtained, prepared the manuscript for publication, has copyright for the article and bears full responsibility for article's originality.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valeria Esthefania Quiroz Cabascango, Postgraduate Student, St. Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: valeritae111@mail.ru